



**ШИНЖЛЭХ УХААН, ТЕХНОЛОГИЙН ИХ СУРГУУЛЬ  
МЭДЭЭЛЭЛ, ХОЛБООНЫ ТЕХНОЛОГИЙН СУРГУУЛЬ**

**ДОКТОР, ПРОФЕССОР Г.ЦОГБАДРАХЫН НЭРЭМЖИТ  
“МЭДЭЭЛЭЛ, ХОЛБООНЫ САЛБАРЫН ХӨГЖИЛД БИДНИЙ  
ГҮЙЦЭТГЭХ ҮҮРЭГ”**

**2025-2026 ОНЫ ХИЧЭЭЛИЙН ЖИЛИЙН ХАВРЫН УЛИРЛЫН ЭРДЭМ  
ШИНЖИЛГЭЭНИЙ ХУРЛЫН ЭМХЭТГЭЛ**

**MUST  
SICT**



**ШИНЖЛЭХ УХААН, ТЕХНОЛОГИЙН ИХ СУРГУУЛИЙН  
МЭДЭЭЛЭЛ, ХОЛБООНЫ ТЕХНОЛОГИЙН СУРГУУЛЬ**

ДОКТОР, ПРОФЕССОР Г.ЦОГБАДРАХЫН НЭРЭМЖИТ “МЭДЭЭЛЭЛ, ХОЛБООНЫ  
САЛБАРЫН ХӨГЖИЛД БИДНИЙ ГҮЙЦЭТГЭХ ҮҮРЭГ-2026”  
БАКАЛАВР, МАГИСТР, ДОКТОР ОЮУТНЫ ЭРДЭМ ШИНЖИЛГЭЭНИЙ ХУРАЛ

# **ЭРДЭМ ШИНЖИЛГЭЭНИЙ БҮТЭЭЛИЙН ЭМХЭТГЭЛ**

УЛААНБААТАР ХОТ  
2026 ОН



Бүтээлийн эмхэтгэл хянан магадалсан:

**Редакцын зөвлөлийн дарга:**

МХТС-ийн ЭНБ дарга, доктор /Ph.D/, дэд профессор Х.Загарзүсэм

**Редакцын зөвлөлийн гишүүд:**

Электроникийн тэнхимийн профессор, доктор /Ph.D/, дэд профессор А.Одгэрэл

Холбооны инженерчлэлийн тэнхимийн дэд профессор, доктор /Ph.D/, дэд профессор Ш.Ганболд

Компьютерын ухааны тэнхимийн профессор, доктор /Ph.D/, дэд профессор Д.Золзаяа

Мэдээллийн технологийн тэнхимийн дэд профессор, доктор /Ph.D/ Б.Золзаяа

Кибер аюулгүй байдлын тэнхимийн багш, /M.Sc/ Н.Даваасүрэн

Холбооны инженерчлэлийн тэнхимийн дэд профессор, доктор /Ph.D/ Б.Пүрэвцэрэн

Холбооны инженерчлэлийн тэнхимийн дэд профессор, доктор /Ph.D/ Л.Эрдэнэбаяр

Электроникийн тэнхимийн дэд профессор, доктор /Ph.D/ Ц.Тэнгис

Компьютерын ухааны тэнхимийн профессор, доктор /Ph.D/, дэд профессор Г.Ганчимэг

Эмхэтгэсэн: Т.Заяа

Хуудасны хэмжээ: А4

Бодит хэвлэлийн хуудас: 8.33 х.х

Үсгийн гарнитур: Times New Roman

Хэвлэсэн тоо: Онлайн

Улаанбаатар хот

**MONGOLIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**  
**SCHOOL OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY**

# **SCIENTIFIC TRANSACTIONS**

**ULAANBAATAR 2026**

## ГАРЧИГ

### ДОКТОР ОЮУТНЫ ЭРДЭМ ШИНЖИЛГЭЭНИЙ ӨГҮҮЛЛҮҮД

1. Англи хэлнээс Монгол хэл рүү орчуулга хийх загварын өгөгдлийн чанарыг сайжруулах .....1  
*Докторант Д.Чулуунцэцэг, доктор (Ph.D), дэд профессор Б.Туяацэцэг*
2. IEEE 802.11 сүлжээ бүхий дроны сүргийн системийн auction-based даалгавар хуваарилах механизмын DDOS халдлагын нөлөөллийг симуляциар үнэлэх нь .....7  
*Докторант Б.Түвшинбаяр, доктор (Ph.D), Ц.Энхтөр*
3. Их өгөгдөл ба хиймэл оюун: бүх нийтийн тоон бичгийн ур чадварыг нэмэгдүүлэх асуудлууд .....15  
*Докторант Г.Нямхүү, доктор (Ph.D), дэд профессор З.Буяннхишиг*

### МАГИСТР ОЮУТНЫ ЭРДЭМ ШИНЖИЛГЭЭНИЙ ӨГҮҮЛЛҮҮД

4. Нарны хавтангийн гадаргуу цэвэрлэх алсын удирдлагатай робот системийн судалгаа, хөгжүүлэлт .....19  
*Магистрант Л.Анужин, Э.Сумъяабазар, доктор (Ph.D), профессор Б.Зоригтбаатар, доктор (Ph.D), профессор Н.Чулуунбанди*
5. Оптик дамжуулах сүлжээнд нөөц хамгаалалтын оновчтой загварын судалгаа .....27  
*Магистрант Ө.Төгөлдөр, доктор (Ph.D), дэд профессор Ш.Ганболд*
6. AI-Enhanced virtual avatar framework for social vr with Mongolian speech driven lip-sync mapping .....34  
*Магистрант Liu Pei Feng, доктор (Ph.D), дэд профессор Б.Туяацэцэг*
7. Хөдөлгөөнт холбооны 5G болон түүнээс хойшхи үеийн сүлжээнд спектер менежментийн харьцуулсан судалгаа.....40  
*Магистрант Б.Цэрэндулам, доктор (Ph.D), дэд профессор Ж.Жавзансүрэн*
8. Дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн PD удирдлагын коэффициентуудыг хиймэл оюун ухаан ашиглан оновчлох нь.....48  
*Магистрант Д.Намуунаа, доктор (Ph.D) Ц.Тэнгис*
9. Хиймэл оюун ухаанд суурилсан SUVmax тооцооллоор умайн хүзүүний хорт хавдрын үе шат ба үсэрхийллийг үнэлэх нь.....54  
*Магистрант М.Түмэн-Аюуш, доктор (Ph.D) С.Өлзийбаяр*
10. Цуурайгүй чамберт антены техникийн үзүүлэлтүүдийг хэмжих аргачлалын судалгаа.....64  
*Магистрант А.Эрдэнэтуяа, доктор (Ph.D) П.Ууганбаяр*
11. Улаанбаатар хотын шилэн кабелийн дэд бүтцийн мэдээллийг нээлттэй өгөгдлийн системд хэрхэн нийтлэх жишиг загвар .....69  
*Магистрант Б.Бат-Өлзий, , доктор (Ph.D), дэд профессор Ш.Ганболд*
12. Хувийн орон сууцны гадна ба дотор холбооны (дохиоллын) ажлын зураг боловсруулах.....76  
*Магистрант Б.Сүх-Очир, доктор (Ph.D), дэд профессор Ц.Балжинням*
13. Замын хөдөлгөөний удирдлагын төвийн оптик кабелийн сүлжээний найдвартай ажиллагааг сайжруулах боломжийн судалгаа.....82  
*Магистрант Д.Дэлгэрням, доктор (Ph.D), дэд профессор З.Буяннхишиг*
14. 5G сүлжээнд дахин тохируулагдах ухаалаг ойлгогч гадаргуугийн судалгаа.....87  
*Магистрант М.Энхзориг, доктор (Ph.D) Б.Пүрэвцэрэн*

## БАКАЛАВР ОЮУТНЫ ЭРДЭМ ШИНЖИЛГЭЭНИЙ ӨГҮҮЛЛҮҮД

15. Машин сургалтад суурилсан утасгүй сүлжээний халдлага илрүүлэх системийн судалгаа.....91  
*Бакалавр Н.Шүрэнцэцэг, доктор (Ph.D), дэд профессор Я.Дашидорж*
16. Цээжний рентген зурагт суурилсан оношилгооны тайлан үүсгэх AI загварын судалгаа.....99  
*Бакалавр М.Энхболор, доктор (Ph.D) Б.Золзаяа*
17. Хиймэл оюунд суурилсан хөдөлмөрийн аюулгүй байдлыг системийн хөгжүүлэлт.....113  
*Бакалавр О.Төгөлдөр, доктор (Ph.D), дэд профессор А.Одгэрэл*
18. 5G, WiFi 6 сүлжээнд зориулсан давтамжийн дахин тохируулгатай антенны загварчлал.....122  
*Бакалавр Б.Урангуа, Э.Батжаргал, А.Саруулбуян, доктор (Ph.D) Б.Пүрэвцэрэн*
19. Улаанбаатар хотын халалтын бүсийн шинжилгээ ба ногоон байгууламжийн байршлыг хиймэл дагуулын өгөгдөл ба машин сургалтад үндэслэн оновчлох нь .....126  
*Бакалавр Н.Цацрал, Г.Оюунмин, доктор (Ph.D) Г.Ганбат*
20. Хиймэл оюун болон AR технологид суурилсан анхны тусламжийн системийн судалгаа, хөгжүүлэлт .....134  
*Бакалавр Ү.Мөнхтуяа, доктор (Ph.D), дэд профессор Б.Долгорсүрэн, (M.Sc) Н.Ганхуяг*
21. Квант компьютерын сорилтыг даван туулах шинэ үеийн түлхүүр солилцооны алгоритмыг интернетийн аюулгүй холболтын протоколд хэрэгжүүлэх судалгаа.....140  
*Бакалавр Б.Нямдэлгэр, М.Мөнхбагана, (M.Sc) Х.Уянгаа*
22. Хиймэл оюун ашигласан жолоочийн хяналтын системийн хөгжүүлэлт.....149  
*Бакалавр Б.Эрмүүн, доктор (Ph.D) Ц.Тэнгис*
23. Цаг хугацааны цуваа хэлбэрийн мэдрэгчийн өгөгдөл дээрх гажуудал тодорхойлох ба зүгшрүүлэх.....153  
*Бакалавр Н.Гантөмөр, доктор (Ph.D), дэд профессор Б.Батзолбоо*
24. “MISSING ALERT”: хиймэл оюунд суурилсан хяналтын систем .....160  
*Бакалавр С.Аэжаргал, О.Оюунжаргал, доктор (Ph.D) Б.Золзаяа*
25. Радарын хөндлөн огтлолын коэффициентийг бууруулах мета-гадаргуугийн загварчлал.....168  
*Бакалавр Д.Анударь, Б.Ундармаа, Д.Санжсүрэн, доктор (Ph.D) Б.Пүрэвцэрэн, доктор (Ph.D) П.Ууганбаяр*
26. Хиймэл оюунд суурилсан робот замын цагдаа.....173  
*Бакалавр Ө.Буянхангай, доктор (Ph.D) Ц.Тэнгис*
27. Бага харилцан үйлчлэлтэй Honeypot болон IDS-ийг хослуулан халдлага илрүүлэх систем хөгжүүлэх .....176  
*Бакалавр Б.Дөлгөөн, Б.Номинзул, Батч.Дөлгөөн, Д.Ижилцэцэг, доктор (Ph.D), дэд профессор, Б.Мөнхбаяр*
28. Чөлөөт орон зайд ОӨМ бүхий дохиог дамжуулахад турбуленсийн нөлөөлөх нөлөөллийн судалгаа.....184  
*Бакалавр Г.Намуундарь, Х.Содбилэг, доктор (Ph.D) А.Мөнхбаяр*
29. Монгол хэлэн дээрх аудио-зураг-текст оролттой мультимодал хэлний загварын үр ашиг: хурдын урьдчилсан судалгаа .....191  
*Бакалавр Б.Энхзул, доктор (Ph.D) Ж.Оргил*

# АНГЛИ ХЭЛНЭЭС МОНГОЛ ХЭЛ РҮҮ ОРЧУУЛГА ХИЙХ ЗАГВАРЫН ӨГӨГДЛИЙН ЧАНАРЫГ САЙЖРУУЛАХ НЬ

Дамирангийн ЧУЛУУНЦЭЦЭГ<sup>1,2</sup>, Бадарчийн ТУЯАЦЭЦЭГ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, Төмөр замын их сургууль

<sup>2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Компьютерын ухааны тэнхим

*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [chuka\\_tzd@yahoo.com](mailto:chuka_tzd@yahoo.com)*

*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [tuyatsetseg.b@must.edu.mn](mailto:tuyatsetseg.b@must.edu.mn)*

**Хураангуй:** Англи хэлнээс Монгол хэл рүү орчуулга хийх судалгааны ажлын хүрээнд өгөгдөлд тулгуурласан машин орчуулгын арга нь өгөгдлийн нөөц хангалтгүй үед сайжруулах боломж дутмаг хэвээр байна. Wikimatrix болон бусад нээлттэй эхүүдээс 1200000 гаруй мөр бүхий өгөгдлийг бэлтгэсэн. Суурь загвар болох Sequence-to-sequence трансформерын загвар дээр тулгуурлан эдгээр хос өгөгдлийг сурган  $N=10$  ба epochs = 20 байхаар туршилтыг явуулж BLEU –ийн дундаж утгыг 66.9 үр дүнд хүргэсэн. Энэ үр дүнд өгөгдлийн чанар нөлөөлсөн учраас илүү сайжруулах үүднээс эх өгөгдлийг дахин боловсруулж 900000 гаруй мөр өгөгдөл бэлэн болгосон. Сайжруулсан өгөгдөл дээр NUM\_HEADS = 16 болгон  $N=10$  ба epochs=50 байхаар туршилтыг явуулж BLEU –ийн дундаж утга 74.3, ROUGE утга 0.76-д хүргэсэн. Цаашид загвараа сайжруулан дээрх бэлэн болсон өгөгдлөөр дахин сургах зорилготой ажиллаж байна.

**Түлхүүр үг:** Sequence-to-sequence трансформер, өөртөө анхаарал хандуулах, олон удирдлагат анхаарал хандуулах, байршлын кодчилал, input embedding

## I. УДИРТГАЛ

Машин орчуулга гэдэг нь аль нэг төрөлх хэлээр бичсэн бичвэрийг өөр хэл рүү автоматаар орчуулах ажил юм. Бид машин орчуулгад гурван өөр хандлагыг тодорхойлж болно [1]. Нэгдүгээрт, эх бичвэрээс зорилтот хэл рүү шууд орчуулах хандлага. Энэ хандлага нь өгүүлбэрийн бүтэц болон утгыг үл харгалзан нэг бичвэрээс нөгөө бичвэр лүү орчуулахад чиглэдэг. Хоёр дахь нь “шилжүүлэх арга” бөгөөд орчуулгыг эх бичвэр болон зорилтот бичвэрийн хийсвэр дүрслэл хооронд үе шаттайгаар орчуулах арга юм. Энэхүү хийсвэр дүрслэлийг эх бичвэрт дүн шинжилгээ хийх замаар олж авдаг. Гурав дахь арга нь эх бичвэрийг хэлээс хамааралгүй хэл хоорондын төлөөлөл болгон орчуулах зорилготой бөгөөд зорилтот бичвэрийг энэхүү бүх хэлний хийсвэр дүрслэлийг гаргаж авдаг. Үүнийг дотор нь дүрэмд суурилсан болон өгөгдөлд суурилсан машин орчуулга гэж ялгаж болно. Монгол хэлний яриа таниулахад нуугдмал марковын загварыг ашигласан. Үг таних системүүд нь зөвхөн акустик загваруудад тулгуурлах хандлагатай байдаг; үүний эсрэгээр тасралтгүй яриа таних системүүд нь акустик болон хэл шинжлэлийн загваруудыг хоёуланг нь агуулдаг. [2]. Нейроны сүлжээнд суурилсан машин орчуулга нь хэдэн арван жилийн турш боловсруулагдсан бөгөөд машин орчуулгын салбарт давамгайлах хандлага болсон. Нейроны машин орчуулгын гарал үүслийг судлаачид машин орчуулга [3,4] болон кодлогч-декодерийн архитектурт [5-7] мэдрэлийн сүлжээнд суурилсан хандлагыг санал болгосон 1980-аад оны үеэс харж болно, гэхдээ тэдгээр нь тийм ч их анхаарал татаагүй. Байгалийн хэлний боловсруулалтын (NLP) [8] салбарт гүн гүнзгий суралцах, тархсан үг векторуудыг амжилттай ашигласнаар нейроны машин сургалт өөрийн боломжоо харуулж эхлэв.

Google [9], Facebook [10] зэрэг томоохон судалгааны байгууллагууд орж ирснээр нейроны машин орчуулгын хөгжлийг хурдасгасан.

2017 онд Google Brain нь бүхэлдээ анхаарлын механизм дээр суурилдаг Transformer загварыг [11] санал болгосон бөгөөд маш сайн гүйцэтгэлийн ачаар жишиг загвар болсон. Трансформерын загварт суурилсан хувилбарууд олширч, NLP-ийн чиглэлээр янз бүрийн ажлуудад чухал загвар болсон [12-16]. Дифференциал трансформер нь хүсэлт (query) болон түлхүүр (key) векторуудыг хоёр бүлэгт хувааж, анхаарлын зурагжуулалтаар хоёр тусдаа softmax-ыг тооцоолно. Дараа нь эдгээр хоёр зурагжуулалтыг хассан үр дүнг анхаарлын оноо гэж үзнэ. Дифференциал анхаарлын механизм нь анхаарлын чимээг (noise) арилгаж, загваруудыг чухал мэдээлэлд анхаарлаа төвлөрүүлэхийг дэмждэг [19]. Фото орчуулгын технологийг текст илрүүлэх, текст таних, текст орчуулга (трансформерийн загвар) гэсэн гурван үе шатанд хувааж болно [20].

## II. ОНОЛ, АРГА ЗҮЙ

Трансформер загварын гол цөм нь анхаарал хандуулах механизм бөгөөд энэ нь дарааллын янз бүрийн токеноудын ач холбогдлыг жигнэхдээ softmax функцийг ашигладаг.

Оновчтой гүйцэтгэлийг харуулсан загварууд нь анхаарал төвлөрүүлэх механизмыг ашиглан кодлогч болон декодлогчийг нэгтгэдэг. Зөвхөн давталт болон хязгаарлалтгүй анхаарал төвлөрүүлэх механизмд суурилсан гүнзгий сургалтын трансформаторын загвар (трансформатор)-ыг боловсруулсан. Энэ нь хялбаршуулсан сүлжээний шинэ архитектурыг төлөөлдөг [11, 17].

Энд кодлогч тэмдэгт дүрслэлийн оролтын дарааллыг  $(x_1, \dots, x_n)$  тасралтгүй дүрслэлийн дараалалд  $z = (z_1, \dots, z_n)$  буулгана. Өгөгдсөн  $z$  декодер нь дараа нь нэг элементийн тэмдэгтүүдийн гаралтын дарааллыг  $(y_1,$

...,  $u_m$ ) үүсгэдэг. Алхам бүрт загвар нь автоматаар регрессив бөгөөд дараагийн тэмдэгтийг үүсгэх үед өмнө нь үүсгэсэн тэмдэгтүүдийг нэмэлт оролт болгон ашигладаг [11].

Кодлогч ба декодерын стекүүд

Кодлогч нь нэгэн төрлийн давхаргын  $N = 6$  стекээс бүрдэнэ. Эдгээр давхарга бүр нь хоёр дэд давхаргаас бүрдэнэ. Эхний дэд давхарга нь олон хяналттай өөрийгөө хянах механизмыг ашигладаг бол дараагийн дэд давхарга нь байрлалын кодчилолтой нийцсэн энгийн, бүрэн холбогдсон дамжуулах сүлжээгээр тодорхойлогддог.

Декодер нь мөн нэгэн төрлийн давхаргын  $N = 6$  стекээс бүрдэнэ. Кодлогч давхарга бүрт байдаг хоёр дэд давхаргаас гадна декодер нь гуравдагч дэд давхаргыг агуулдаг.

Трансформаторын архитектурт дараах бүрэлдэхүүн хэсгүүд багтана [5]. Трансформаторын сүлжээ нь давтагдах мэдрэлийн сүлжээний (RNN) гол загвар бөгөөд зөвхөн байгалийн хэлний боловсруулалт төдийгүй компьютерийн хараа зэрэг олон салбарт маш сайн загвар болох нь батлагдсан [12]. Кодлогч загварыг зүүн талд, декодерыг баруун талд дүрсэлсэн болно. Хоёр бүтэц хоёулаа  $N$  удаа давтагддаг "анхаарал ба дамжуулах сүлжээ"-ний үндсэн блокийг агуулдаг.

Трансформер загвар нь өгүүлбэр дэх бусад бүх үгийн нэгжийн ач холбогдлыг үнэлдэг өөртөө анхаарал хандуулах механизмыг ашиглан үгийн нэгж бүрийн шинж чанарыг тодорхойлдог. Энэхүү өвөрмөц дүрслэлийг бий болгохын тулд загвар нь давтагдсан нэгжийг ашигладаггүй; харин жигнэсэн нийлбэр болон идэвхжүүлэлтийг ашигладаг бөгөөд энэ нь параллелизм ба үр ашгийн өндөр түвшинг баталгаажуулдаг.

**TextVectorization давхарга**

Текстийн онцлогийг бүхэл тоон дараалалд буулгадаг урьдчилан боловсруулах давхарга.

**Токенжуулалт**

Оролтын текстийг токенжуулсан болно. Өгүүлбэр нь түүнийг бүрдүүлэгч үгсийн жагсаалт хэлбэрээр илэрхийлэгддэг бөгөөд энэ нь бүх оролтын өгүүлбэрт зориулагдсан болно.

**Тайлбар толь үүсгэх**

Олж авсан бүх токенжуулсан үгсээс зөвхөн өвөрмөц үгсийг сонгож, үгсийн санг бий болгож, дараа нь цагаан толгойн дарааллаар эрэмбэлдэг.

**Вектор үүсгэх**

Үг хэллэгийн давтамжаас гадна оролтод зориулж сийрэг матриц үүсгэгддэг. Энэхүү сийрэг матрицад мөр бүр нь өгүүлбэрийн вектор бөгөөд урт нь (матрицын баганууд) үгсийн сангийн хэмжээтэй тэнцүү байна [17].

**Оролт оруулах (Input embedding)**

Input sentence	YOUR	CAT	IS	A	LOVELY	CAT
Input IDs	105	6587	5475	3578	65	6587
Embedding	952.207 5450.840 1853.448 ... 1.658 2671.529	171.411 3276.350 9192.819 ... 3633.421 8390.473	621.659 1304.051 0.565 ... 7679.805 4506.025	776.562 5567.288 58.942 ... 2716.194 5119.949	6422.693 6315.080 9358.778 ... 2141.081 735.147	171.411 3276.350 9192.819 ... 3633.421 8390.473

1-р зураг . Оролт оруулах (input embedding) хэсэг

Input IDs - тайлбар толь дахь байрлал (1-р зураг). Embedding - энэ нь үг бүрийн оруулах векторын хэмжээг илэрхийлнэ [6].

**Байрлалын кодчилол (Positional Encoding)**

Трансформерийн загварын байрлалын кодчилолын үеийг дараахь томъёогоор тодорхойлдог.

$$P(k, 2i) = \sin\left(\frac{k}{n} \cdot \frac{2i}{d}\right) \tag{1}$$

$$P(k, 2i + 1) = \cos\left(\frac{k}{n} \cdot \frac{2i}{d}\right) \tag{2}$$

Байршлын кодчилол нь тухайн объектын байршил эсвэл байрлалыг дарааллаар нь тодорхойлдог бөгөөд ингэснээр байрлал бүрт өвөрмөц дүрслэлийг хуваарилдаг. Байрлал/индекс бүрийг векторт буулгасан ухаалаг байрлалын кодчилолын схемийг ашигладаг. Тиймээс байрлалын кодчилолын давхаргын гаралт нь матриц бөгөөд матрицын мөр бүр нь байрлалын мэдээлэлтэй нийлсэн дарааллын кодлогдсон объектыг төлөөлдөг. Зөвхөн байрлалын мэдээллийг кодлодог матрицын жишээг доорх зурагт үзүүлэв.

Sequence	Index of token, k	Positional encoding matrix with d=4, n=100			
		l=0	l=0	l=1	l=1
l	0	$P_{00}=\sin(0/1)=0$	$P_{01}=\cos(0/1)=1$	$P_{02}=\sin(0/10)=0$	$P_{03}=\cos(0/10)=1$
am	1	$P_{10}=\sin(1/1)=0.84$	$P_{11}=\cos(1/1)=0.54$	$P_{12}=\sin(1/10)=0.10$	$P_{13}=\cos(1/10)=1.00$
a	2	$P_{20}=\sin(2/1)=0.91$	$P_{21}=\cos(2/1)=0.42$	$P_{22}=\sin(2/10)=0.20$	$P_{23}=\cos(2/10)=0.98$
Robot	3	$P_{30}=\sin(3/1)=0.14$	$P_{31}=\cos(3/1)=0.99$	$P_{32}=\sin(3/10)=0.30$	$P_{33}=\cos(3/10)=0.96$

2-р зураг . Байрлалын кодчилолын (Positional Encoding) жишээ

Байршлын кодчилолын давхаргын эцсийн үр дүн:

Input sequence	l	am	a	Robot
Word embedding	$V_0$ = Embedding vector(l)	$V_1$ = Embedding vector(am)	$V_2$ = Embedding vector(a)	$V_3$ = Embedding vector(Robot)
Positional Encoding Matrix	$P_0$ =Positional vector(l)	$P_1$ =Positional vector(am)	$P_2$ =Positional vector(a)	$P_3$ =Positional vector(Robot)
Output of positional encoding layer	$Y_0$ =Positional encoding(l)	$Y_1$ =Positional encoding(am)	$Y_2$ =Positional encoding(a)	$Y_3$ =Positional encoding(Robot)

3-р зураг. Байрлалын кодчиллын давхарга (Positional Encoding)

**Өөртөө анхаарал хандуулах ( Self Attention )**

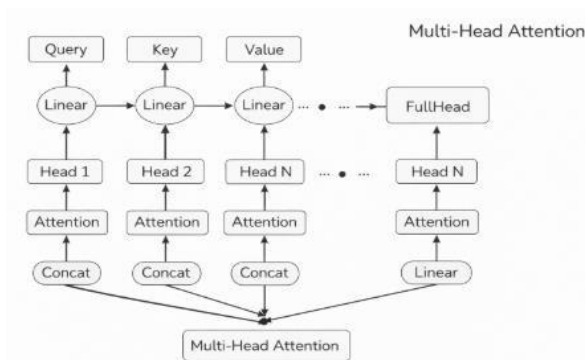
Өөртөө анхаарал хандуулах модель нь үгсийг хооронд нь холбох, тодорхой токеныг боловсруулахдаа дарааллын өөр өөр үгсийн ач холбогдлыг жинлэх боломжийг олгодог. Q, K, V матрицууд нь зөвхөн оролтын өгүүлбэр юм.

$$Attention(Q, K, V) = softmax(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}})V \tag{3}$$

**Олон удирдлагат анхаарал хандуулах (Multi-head Attention)**

Multi-Head Attention нь трансформерийн загварын дотор ашиглагддаг маш чухал механизм бөгөөд нэгэн зэрэг олон “анхаарал” (attention)-ыг өөр өөр өнцгөөс тооцоолох боломжийг олгодог. Multi-head attention нь олон төрлийн холбоог зэрэг харна.

- үгсийн синтакс холбоо
- утгын холбоо



Зураг 4. Олон удирдлагат анхаарал хандуулах (Multi-head Attention)

Кодлогч нь үг бүрийн утга болон байрлалаас гадна multi-head анхаарлын тусламжтайгаар бусад үгтэй харьцах векторыг гаргадаг [6].

$$MultiHead(Q, K, V) = Concat(head_1 \dots head_h)W^0 \tag{4}$$

$$head_i = Attention(QW_i^Q, KW_i^K, VW_i^V) \tag{5}$$

Трансформерын загвар дээр тулгуурлан суурь загварыг бүтээж 1100000 гаруй хос өгөгдлийг сурган N=5 ба epochs = 10 байхаар туршилтыг явуулж BLEU –ийн дундаж утга 36.8 үр дүн гаргаж байсан [12].

**Sequence-to-sequence (SEQ2SEQ) трансформер загвар:**

Орчуулга нь ихэвчлэн дарааллаас дараалал руу загварчлал (seq2seq) гэж нэрлэгддэг загварчлалын асуудлын ангилалд багтдаг.

- Keras TextVectorization давхаргыг ашиглан текстийг векторжуулна.
- TransformerEncoder давхарга, TransformerDecoder давхарга, PositionalEmbedding давхаргыг хэрэгжүүлэх.
- Дараалалаас дараалсан загварыг сургах өгөгдөл бэлтгэж сургалтыг явуулдаг.

**Дифференциал трансформер**

Дифференциал трансформер нь хүсэлт (query)болон түлхүүр (key) векторуудыг хоёр бүлэгт хувааж, анхаарлын зурагжуулалтаар хоёр тусдаа softmax-ыг тооцоолно. Дараа нь эдгээр хоёр зурагжуулалтыг хассан үр дүнг анхаарлын оноо гэж үзнэ. Дифференциал анхаарлын механизм нь анхаарлын шуугианыг (noise) арилгаж, загваруудыг чухал мэдээлэлд анхаарлаа төвлөрүүлэхийг дэмждэг [20]. Дифференциал анхаарлын механизм нь хүсэлт, түлхүүр болон утгын векторуудыг гаралттай холбодог. Хүсэлт болон түлхүүр векторуудыг ашиглан анхаарлын оноог тооцоолж, дараа нь утгын векторуудын жигнэсэн нийлбэрийг тооцоолдог. Хамгийн чухал загвар нь бид анхаарлын онооны шуугианыг (noise) арилгахын тулд хоёр softmax функцийг ашиглах явдал юм.

$$[Q_1Q_2] = XW^Q, [K_1K_2] = XW^K, V = XW^V \tag{6}$$

$$DiffAttn(X) = (softmax(\frac{Q_1K_1^T}{\sqrt{d}}) - \lambda softmax(\frac{Q_2K_2^T}{\sqrt{d}}))V \tag{7}$$

**III. ТУРШИЛТ, СУДАЛГААНЫ ХЭСЭГ**

**Өгөгдөл цуглуулах**

Wikimatrix болон бусад нээлттэй эхүүдэд EN-MN корпусын нөөц хангалтгүй учраас англи хэлнээс монгол хэл рүү хөрвүүлсэн 1200000 гаруй мөр бүхий корпусыг (5-р зураг ) бэлтгэсэн. Өмнөх үр дүнгүүдийг гаргахдаа Google-ийн Colab Pro эрхийг авч сургалтыг явуулж байсан. BLEU –ийн дундаж утгыг 66.9-өөс дээш нэмэгдүүлэхээр Google ийн Colab Pro+ эрхийг авч GPU 40Gb-тай сургалтыг явуулахад сургалт 25-26 epoch дээр зогсоод байсан юм. Ийм учраас сургалтын өгөгдөлд дахин цэвэрлэгээ хийсэн. Хэт урт өгүүлбэрийг хасах, хоосон мөрийг устгах, англи , монгол өгүүлбэрийн байр солигдсон, орчуулагдаагүй мөрүүд гэх мэт олон алдаануудыг програмаар цэвэрлэсэн. 300000 гаруй мөрийг устгаад 900000 гаруй мөр өгөгдөл дээр сургалтыг явуулж байгаа. Иймд загварын өгөгдлийг цэвэрлэх нь цаашид сургалт амжилттай явагдахад хамааралтай байна.

It seems that the Ministry of Finance is holding a small budget. Тэгэхээр манай өргөтгөл Салтдыг хан нь барууд байх шиг байна мн. So in any case I think that the truth was true. Тэгэхээр манай өргөтгөл үзэж байгаа мн уу даа гэж болгохдоо байгаа мн. And this figure is full of potential for 12 000 by 2020. Харин энэ үзүүлэлт 2020 гэхэд 12000 шилдэг болж бүрэн боловч бий гэнэ. The following foods are very bad for a child of all ages. Хүрээлэн гэрлүүлж буй эмчид хүүхдийг хүргэх ямар ч хэргийг хийж өгөх нь буруу юм байна. There is a strange logic that no one else exists in our country. Манай улсаас өөр ямар ч байгаагүй ажилчид мэддэг байгаа мн. The ship leaves at 5 pm 48 and it's 20 hours and 54 minutes. Бусдын хэрэг 05 цаг 08 минуттай урттай 22 цаг 54 минуттай шилдэг. When I looked up she was holding her daughter Anna. Баянбай дэвч өндийж харвал эгз өмөөр Аннаа гэдэг олонтой гэрлэж байсан байх. His attention was called selfish selfishness. Гүүнийг хэргийг үзэхэд нь эгз өмөөр хүүхдийг үзэхэд нь хүүхдийг үзэхэд нь хүүхдийг үзэхэд нь. This letter I asked you before what was the grandmaster's house. Хүүхдүүд дараа нь би хүүхдийг үзэхэд нь хүүхдийг үзэхэд нь. What would you have done if it was the last day of your life? Харин энэ тэмцээнд сүүлийн өдөр байсан бол хүүхдийг үзэхэд нь. But we must say that the Mongolian economy is very difficult. Гэхдээ Монголын эдийн засаг маш муу байна гэж байгаа мн. Currently one ton of coal is being paid at 500 thousand MNT. Одоо энэ тонн нүүрсийг 500 мянган төгрөгөөр авч болж байна. There was an image of someone walking upstairs to the picture. Хүүхдүүд урьдчилж харах ямар ч хэргийг үзэхэд нь. Parents say they want to make electronic registration. Хүүхдүүдийг хийж үзэхэд нь хүүхдийг үзэхэд нь. The company is working with Bosch a German brand matches. Харин тус компани нь хүүхдийг үзэхэд нь. After a while the lightning up a little work. Орчлон дээр байгаа ажилчид хийж өгөх ямар ч хэргийг үзэхэд нь. There was evidence that Harbin had given him a hat. Хөвсгөл хүүхдийг үзэхэд нь. The presence and actions of all these people must be observed. Салтдыг хан үзэхэд нь.

5-р зураг. Орчуулгын хослолыг агуулсан текст файл

**Сургалтын параметрууд:**

```
BATCH_SIZE = 64
EPOCHS = 50
MAX_SEQUENCE_LENGTH = 80
VOCAB_SIZE = 140000
EMBED_DIM = 512
INTERMEDIATE_DIM = 2048
NUM_HEADS = 16
```

Кодын хэсгээс-1

```
for _ in range(5):
    print(random.choice(text_pairs))
```

(' In general the private hospitals control system is very weak.', '[start] Ер нь хувийн эмнэлгүүдийг хянах тогтолцоо энэ тэр үнэхээр сул байна. [end]')

(' So it s a lie that the competition will not be held.', '[start] Тэгэхээр уг тэмцээн зохиогдохгүй гэсэн явган яриа худал болж таарах нь. [end]')

915420 total pairs  
640794 training pairs  
137313 validation pairs  
137313 test pairs

**Сургалтын загвар**

Машины орчуулгад BLEU оноо болон бусад хэмжүүрүүдийг ашигладаг. (1-р хүснэгт).

```
epochs = 50
transformer.summary()
transformer.compile(
    "rmsprop",
    loss=keras.losses.SparseCategoricalCrossentropy(ignor
e_class=0),
    metrics=["accuracy"],)
history=
transformer.fit(train_ds, epochs=epochs,
validation_data=val_ds)
```

Model: "transformer"

Layer (type)	Output Shape	Param #	Connected to
encoder_inputs (InputLayer)	(None, None)	0	-
decoder_inputs (InputLayer)	(None, None)	0	-
positional_embedding (PositionalEmbedding)	(None, None, 512)	71,720,960	encoder_inputs[0..]
not_equal (NotEqual)	(None, None)	0	encoder_inputs[0..]
positional_embedding (PositionalEmbedding)	(None, None, 512)	71,720,960	decoder_inputs[1..]
transformer_encoder (TransformerEncoding)	(None, None, 512)	18,984,064	positional_embedding_not_equal[0][0]
transformer_decoder (TransformerDecoding)	(None, None, 512)	35,707,392	positional_embedding_not_equal[0][0]
dropout_3 (Dropout)	(None, None, 512)	0	transformer_decoder
dense_4 (Dense)	(None, None, 140000)	71,820,000	dropout_3[0][0]

Total params: 269,873,376 (1.01 GB)  
Trainable params: 269,873,376 (1.01 GB)  
Non-trainable params: 0 (0.00 B)

6-р зураг. Sequence-to-sequence трансформерын загвар

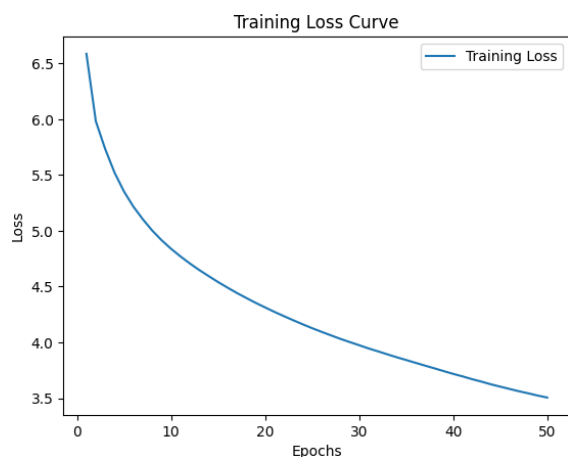
Гарсан үр дүн:

\*\* Example 0 \*\*  
During this government our ministry calculated the actual cost of health.  
[start] Энэ Засгийн газрын үед манай яам эрүүл мэндийн бодит зардлыг тооцож өгсөн [end]

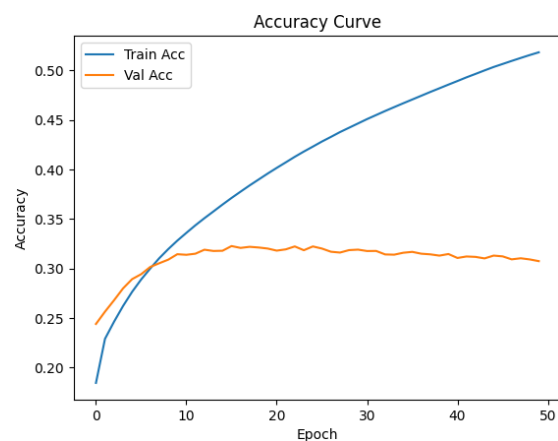
\*\* Example 1 \*\*  
However S.Odontuya acknowledges the position of a good law that must be adopted.  
[start] Гэхдээ СОдонтуяа сайн хууль батлах ёстой гэсэн байр суурь илэрхийлж байна [end]

1-р хүснэгт. Орчуулгын үнэлгээ

	Conditions	Avg. BLEU	ROUGE
Transformer	N=5, EPOCHS=10, MAX_SEQUENCE_LENGTH=65, ENG_VOCAB_SIZE=40000, MON_VOCAB_SIZE=40000	36.8	
Sequence-to-sequence transformer	N=10, EPOCHS=20, MAX_SEQUENCE_LENGTH=80, VOCAB_SIZE=80000	66.9	
Sequence-to-sequence transformer	N=10, EPOCHS=50, MAX_SEQUENCE_LENGTH=80, VOCAB_SIZE=140000	74.3	0.76



7-р зураг. Сургалтын алдагдлын (Loss) график



8-р зураг. Сургалтын нарийвчлалын график (Accuracy график)

### ДҮГНЭЛТ

Хиймэл оюуны машин орчуулга нь өгөгдөлд тулгуурласан машин орчуулгын арга бөгөөд корпусын нөөц хангалтгүй үед орчуулгын чанарыг сайжруулах боломжтой гэж дүгнэв. Wikimatrix болон бусад нээлттэй эхүүдэд EN-MN корпусын нөөц хангалтгүй учраас англи хэлнээс монгол хэл рүү хөрвүүлсэн 1200000 гаруй мөр бүхий корпусыг бэлтгэсэн. Өмнөх ажлаар трансформерын загвар дээр тулгуурлан 1200000 гаруй хос өгөгдлийг сурган  $N=5$  ба  $epochs = 10$  байхаар туршилтыг явуулж BLEU –ийн дундаж утгыг 36.8 хүргэсэн. Sequence-to-sequence трансформерын загвараар мөн 1200000 гаруй хос өгөгдлөө сурган  $N=10$  ба  $epochs=20$  байхаар туршилт явуулж BLEU –ийн дундаж утга 66.9 хүргэсэн. Хос өгөгдлийг дахин цэвэрлэж 900000 гаруй өгөгдөл дээр  $NUM\_HEADS = 16$  болгон  $N=10$  ба  $epochs=50$  байхаар туршилтыг явуулж BLEU –ийн дундаж утга 74.3, ROUGE утга 0.76-д хүргэсэн. Цаашид корпусыг нэмэгдүүлэх, цэвэрлэх, суурь загвараа

сайжруулж орчуулгын үр дүнгээ дээшлүүлэх боломжтой гэж дүгнэлээ.

### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] Jurafsky, D., Martin, J.H., “Speech and Language Processing,” , pp. 228-229, 2020. [Online]. Available: <https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/ed3book.pdf>
- [2] А.Алтангэрэл, “Study of conversational recognition of the Mongolian language,” Ph.d dissertation, School of Mongolian Science, Technology Univ., Ulaanbaatar, 2012.
- [3] Neco, R.P.; Forcada, M.L. Asynchronous translations with recurrent neural nets. In Proceedings of the International Conference on Neural Networks (ICNN’97), Houston, TX, USA, 12 June 1997; pp. 2535–2540.
- [4] Castano, A.; Casacuberta, F. A connectionist approach to machine translation. In Proceedings of the Fifth European Conference on Speech Communication and Technology, Rhodes, Greece, 22–25 September 1997; pp. 91–94.
- [5] Forcada, M.L.; Neco, R.P. Recursive hetero-associative memories for translation. In Proceedings of the International Work Conference on Artificial Neural Networks, Berlin, Germany, 4–6 June 1997; pp. 453–462.
- [6] Pollack, J.B. Recursive distributed representations. *Artif. Intell.* 1990, 46, 142–149. [CrossRef]
- [7] Chrisman, L. Learning recursive distributed representations for holistic computation. *Connect. Sci.* 1991, 3, 345–366. [CrossRef]
- [8] Mikolov, T.; Sutskever, I.; Chen, K.; Corrado, G.S.; Dean, J. Distributed representations of words and phrases and their compositionality. In Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems, Stateline, NV, USA, 5–10 December 2013; pp. 3111–3119.
- [9] Wu, Y.; Schuster, M.; Chen, Z.; Le, Q.V.; Norouzi, M.; Macherey, W.; Krikun, M.; Cao, Y.; Gao, Q.; Macherey, K.; et al. Google’s neural machine translation system: Bridging the gap between human and machine translation. *arXiv* 2016, arXiv:1609.08144.
- [10] Gehring, J.; Auli, M.; Grangier, D.; Yarats, D.; Dauphin, Y.N. Convolutional sequence to sequence learning. In Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning, Sydney, Australia, 6–11 August 2017; pp. 1243–1252.
- [11] Waswani, A. [et.al](#), “Attention Is All You Need,” in *31st Conference on Neural Information*
- [12] Д.Чулуунцэцэг, Б.Туяацэцэг, “Нейрон сүлжээний санд суурилсан гүн сургалтын Англи-Монгол хэлний орчуулгын трансформер загвар хөгжүүлэх нь” “Эрдмийн чуулган-2024” магистр, доктор оюутны эрдэм шинжилгээний бүтээлийн эмхэтгэл №24(08)332, Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургууль, 2024.
- [13] Qing-dao-er-ji, R.; Cheng, K.; Pang, R., “Research on Traditional Mongolian-Chinese Neural Machine Translation Based on Dependency Syntactic Information and Transformer Model,” *Appl. Sci.*, October. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app121910074>
- [14] B. Bat-Erdene, “Neural machine translation hybrid model,” Ph.d dissertation, School of Lang. and Cult., Humanities Univ., Ulaanbaatar, 2022.
- [15] Wei, Y., Naimannaran, C., Badarch, T., & Ayush, A, (2024), “Mongolian Text Recognition Based on CRNN Algorithm”, *Data Intelligence. Scopus, WoS (ESCI) IF1.8* (2024).
- [16] Wei Yong Hui, Keyu Zhao, Xueqiang Lv, Jianzhou Feng, Hai Bin Hu, Tuyatsetseg Badarch and ZeYu Zhao, “Research on Intelligent Embedded Fan System Based on YOLOv2 Lightweight Algorithm.” *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022
- [17] Bozkurt, A., Karadeniz, A., Baneres, D., Guerrero-Roldán, A.E., Rodríguez, M.E., “Artificial Intelligence and Reflections from Educational Landscape: A Review of AI Studies in Half a Century,” *Sustainability*, vol. 13, no. 800, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su13020800>

- [18] Д.Чулуунцэцэг, Т.Мөнхцэцэг, “Хөдлөх бүрэлдэхүүн, чингэлэгийн дугаар, тэмдэг тэмдэглэгээг таньж бүртгэх систем ” “Хөдөө Аж Ахуйн инженерийн шинжлэх ухаан, технологи” эрдэм шинжилгээний хурлын бүтээлийн эмхэтгэл №20(01)123, Хөдөө Аж ахуйн Их Сургууль, 2023.
- [19] Tianzhu Ye, Li Dong, Yuqing Xia, Yutao Sun, Yi Zhu, Gao Huang, Furu Wei. Microsoft Research, Tsinghua University. “Differential Transformer”. Published as a conference paper at ICLR 2025.
- [20] Subrota Kumar Mondal, Yijun Chen, Yuning Cheng, Hong-Ning Dai, Syed B. Alam, H.M. Dipu Kabir. “On English-Chinese Neural Machine Translation leveraging Transformer model”. Natural Language Processing Journal 12 (2015). [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.nlp.2025.100166>

# IEEE 802.11 СҮЛЖЭЭ БҮХИЙ ДРОНЫ СҮРГИЙН СИСТЕМИЙН AUCTION-BASED ДААЛГАВАР ХУВААРИЛАХ МЕХАНИЗМЫН DDOS ХАЛДЛАГЫН НӨЛӨӨЛЛИЙГ СИМУЛЯЦИАР ҮНЭЛЭХ НЬ

Пүрэвийн Түвшинбаяр<sup>1</sup>, Цогбаатарын Энхтөр<sup>1</sup>, Ямхины Дашдорж<sup>1</sup>, Чулууны Эрдэнэбат<sup>1</sup>, Хүчитгийн Уянгаа<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Кибер аюулгүй байдлын  
ТЭНХИМ

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [tuvshinbayar.tend@gmail.com](mailto:tuvshinbayar.tend@gmail.com)

## Хураангуй:

Нисгэгчгүй нисэх төхөөрөмжийн (UAV) сүргийн систем дэх өрсөлдөөнт санал өргөх (auction-based) механизм нь 2.4 ГГц-ийн зурваст нэг алхамт (single-hop) UDP broadcast протоколоор ажилладаг тул үйлчилгээ тасалдуулах (DDoS) халдлагад нэн өртөмтгий байдаг. Тус халдлага нь координацийн мэдэгдэл-санал-шийдвэр-баталгаажуулалт гэсэн дөрвөн үе шатын аль нэгэнд хугацаа хэтрэлт (timeout) үүсгэснээр сүргийн үйл ажиллагааг бүхэлд нь доголдуулдаг. Энэхүү судалгаагаар PHY-MAC-Transport-Application давхаргыг нэгтгэсэн cross-layer загварыг SimPy дискрет үйл явдлын симулятор болон ITU-R P.1238 стандартаар өргөтгөсөн FSPL загварт суурилан боловсруулж, халдлагын нөлөөллийг системчлэн үнэлэв. Системийн тэсвэртэй байдлыг тодорхойлоходоо даалгавар биелүүлэлтийн харьцаа (TCR) болон хоцрогдлын харьцаа (TDR)-аас гадна сүргийн сэргэлтийн хугацаа (SRT) хэмжүүрийг Degree Centrality алгоритмд суурилсан LeaderFailover механизмаар анхлан тодорхойлж, 36 параметрийн сценариар туршилт явуулсан. Туршилтын үр дүнд халдлагагүй горимд TCR=0.528, пакет дамжуулалтын харьцаа PDR=0.826 байсан бол, хүчтэй халдлагын үед (bw=0.90) PDR=0.098 болж буурснаар 550 удаагийн туршилтын аукцион (experimental trials) нэг ч амжилтгүй болж, TCR=0.000 үзүүлэлтээр сүргийн зохион байгуулалт бүрэн зогсоныг нотоллоо. MAC давхаргад мөргөлдөөний магадлал 0.745 хүртэл өсөж, Transport давхаргад M/M/1 дарааллын ачаалал  $\rho=0.765$ -д хүрсэн нь давхарга дамнан шатлан үүсэх (cascade) доголдлын механизмыг тоон байдлаар баталгаажуулав. SRT хэмжүүр дунджаар 1.033 секунд бүртгэгдсэн нь LeaderFailover механизмын тогтвортой байдлыг харуулж байна. Судалгааны үр дүнд бүрдүүлсэн 41 шинж чанар (багана), 200 бичлэг (мөр) бүхий шошгожуулсан өгөгдлийн сан нь машин сургалтад суурилсан DDoS илрүүлэлт болон кибер тэсвэртэй байдлын цаашдын судалгааны онол, практикийн чухал суурь болно.

Түлхүүр үг: UAV swarm, auction протокол, тэсвэртэй байдал, cross-layer үнэлгээ, симуляци

## I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд нисгэгчгүй нисэх төхөөрөмж (UAV)-ийн сүрэг (swarm)-ийн технологи нь цэргийн тагнуул хяналт, гал түймэр унтраах ажиллагаа, хилийн хамгаалалт зэрэг хүний нөөц хязгаарлагдмал буюу амь насанд аюултай орчинд өргөнөөр нэвтэрч, практик хэрэглээний ач холбогдол нь улам бүр нэмэгдэж байна [1], [2]. Гэвч энэхүү технологи нь анхнаасаа гүйцэтгэлд чиглэн зохиогдсон тул кибер аюулгүй байдлын хувьд нэн эмзэг хэвээр байна.

UAV сүргийн үр ашигтай хамтын ажиллагааны гол механизм болох өрсөлдөөнт санал өргөх зарчимд суурилсан даалгавар хуваарилалт нь 2.4 ГГц-ийн зурваст UDP (User Datagram Protocol) broadcast протоколоор ажилладаг тул DDoS (Distributed Denial of Service) халдлагад онцгойлон өртөмтгий байдаг [3], [5]. DDoS халдлага нь зорилтот сүлжээнд их хэмжээний хуурамч пакет илгээснээр сувгийн хүчин чадлыг дүүргэж, мэдэгдэл-санал-шийдвэр-баталгаажуулалт гэсэн дөрвөн үе шатын аль нэгийг тасалдуулснаар бүхэл сүргийн координацийг доголдуулдаг. Jamming (радио дарангуйлалт) халдлагаас ялгаатай нь UDP flooding халдлага нь физик давхарга (PHY)-ын дохионы чанарт биш хандалтын хяналт (MAC) болон дамжуулалтын (Transport) давхаргын нөөцөд нөлөөлдөг тул илрүүлэхэд хэцүү бөгөөд хэрэглээний давхаргын логикт шууд бус байдлаар хүрдэг.

Өмнөх судалгаанууд сүлжээний давхарга бүрийн нөлөөллийг тусад нь судалсан бөгөөд давхарга дамнан нэгдсэн үнэлгээний хандлага хязгаарлагдмал байсаар байна [6], [8]. Мөн өрсөлдөөнт санал өргөх зарчимд суурилсан UAV сүргийн тэсвэртэй байдлыг үнэлэхдээ системийн уналтыг хэмжихэд анхаарч, сэргэлтийг тодорхойлох нэгдсэн хэмжүүр дутагдалтай байсан. Энэхүү судалгаанд дөрвөн сүлжээний давхаргыг (PHY-MAC-Transport-Application) нэгтгэсэн давхарга дамнан үнэлгээний загвар боловсруулж, даалгавар биелүүлэлтийн харьцаа (TCR), даалгавар хоцрогдлын харьцаа (TDR)-ийн зэрэгцээ сүргийн сэргэлтийн хугацаа (SRT) шинэ хэмжүүрийг графын онолын Degree Centrality алгоритмд суурилсан LeaderFailover механизмаар анх тодорхойлсноор системийн тэсвэртэй байдлыг цогцоор үнэлэх боломжийг бүрдүүлэв. Мөн DDoS халдлагын эрч нэмэгдэхэд PHY-MAC-Transport-Application давхаргуудаар шатлан нөлөөлөл үүсч даалгавар хуваарилалт бүхэлдээ доголдог болохыг тоон хэмжүүрээр нотоллоо.

Энэхүү судалгаанд SimPy дискрет үйл явдлын симулятор болон чөлөөт орон зайн дохионы алдагдлын загвар (FSPL — Free Space Path Loss)-ыг ITU-R P.1238 стандартын орчны хүчин зүйлээр өргөтгөн нэгтгэсэн нэгдсэн симуляцийн платформ боловсруулсан бөгөөд уг платформ нь гучин зургаан параметрийн сценарийг судалж, машин сургалтад бэлэн өгөгдлийн багц үүсгэдэг. Цаашид II дүгээр хэсэгт холбогдох судалгааны

тойм, III дүгээр хэсэгт арга зүй, IV дүгээр хэсэгт туршилтын үр дүн, V дүгээр хэсэгт дүгнэлтийг тус тус авч үзнэ.

## II. ХОЛБОГДОХ СУДАЛГААНЫ ТОЙМ

### A. UAV сүргийн аюулгүй байдал

Liu et al. [1] нь UAV сүргийн аюулгүй байдлын тоймд DDoS халдлагыг дурдсан боловч өрсөлдөөнт санал өргөх зарчимд суурилсан даалгавар хуваарилалтад үзүүлэх нарийвчилсан нөлөөг тоон хэмжүүрээр үнэлээгүй байна. Zhang & Chen [2]-ийн судалгаа нь дотоод үнэлгээ болон гадаад өрсөлдөөний хоёр үе шаттай өрсөлдөөнт санал өргөх механизмын үр ашгийг сайжруулсан боловч DDoS халдлагын орчинд туршилт хийгээгүй тул тэсвэртэй байдлыг баталгаажуулаагүй байна.

### B. DDoS илрүүлэлт

Ahmed et al.-ийн [6], Nguyen & Park-ийн [7] урт богино хугацааны санах ойн автокодлогч (LSTM Autoencoder) судалгаанууд нь сүлжээний DDoS илрүүлэлтэд сайн үр дүн үзүүлсэн боловч UAV сүргийн даалгаврын тэсвэртэй байдлын хэмжүүрийг тусгаагүй тул дроны сүргийн системд шууд хэрэглэх боломжгүй байна. Zhao et al. [8] нь сүлжээний аномали илрүүлэлтийн загварыг оновчлосон боловч UAV сүргийн өрсөлдөөнт санал өргөх протоколд тусгайлан хэрэглэсэн туршилтын үр дүн дутагдалтай байна.

### B. Өмнөх судалгааны хязгаарлалтууд

Доорх нэгдүгээр хүснэгтэд өмнөх судалгаануудын харьцуулалтыг харуулав. Аль нь ч дөрвөн шалгуурыг бүрэн хангахгүй байгаа нь энэхүү судалгааны шаардлагатай байдлыг илэрхийлж байна. Тухайлбал, UAV сүрэг болон DDoS халдлагыг хамтад нь авч үзсэн боловч чөлөөт орон зайн дохионы алдагдлын загварчлал болон даалгавар биелүүлэлтийн харьцаа, даалгавар хоцрогдлын харьцаа, сүргийн сэргэлтийн хугацааг нэгтгэсэн цогц үнэлгээний аргачлал дутагдалтай хэвээр байна.

1-Р ХҮСНЭГТ. ХОЛБОГДОХ СУДАЛГААНЫ ХАРЬЦУУЛАЛТ

#	Зохиогч, он	UAV+A uction	DDoS	FSPL 2.4G	TCR/TDR /SRT
[1]	Liu et al., 2024	✓	✓	X	X
[2]	Zhang & Chen, 2024	✓	X	X	X
[3]	Torres et al., 2025	✓	X	X	X
[5]	Patel et al., 2025	✓	✓	X	X
[6]	Ahmed et al., 2023	X	✓	X	X
*	Бидний судалгаа, 2026	✓	✓	✓	✓

## III. АРГА ЗҮЙ

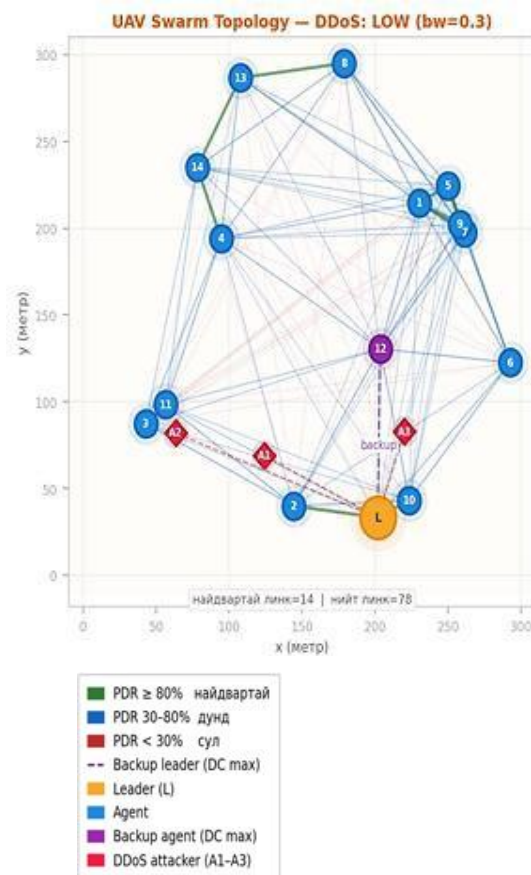
### A. Судалгааны ерөнхий дизайн

Энэ судалгаа нь тоон (quantitative) судалгааны арга зүйг баримтална. Туршилтын загвар нь SimPy дискрет үйл явдлын симулятор болон FSPL загварт суурилах бөгөөд эмпирик туршилтаар явагдана.

### B. Симуляцийн орчны гол параметрууд

Давтамж 2.4 ГГц (IEEE 802.11n), UAV тоо 10/15/20 агент, DDoS эрч 0–1000 пакет/сек (none/low/medium/high), DDoS botnet халдагчийн тоо 3 ( $n_{attackers}=3$ ), хөдөлгөөний загвар Gauss-Markov ( $\alpha=0.75$ ), Rayleigh сүүдрийн стандарт хазайлт  $\sigma=8$  дБ, сүлжээний орчин нээлттэй (ITU-R N=20) болон хот орчин (ITU-R N=30), нийт сценарийн тоо 36. Туршилтын дизайн:  $seed \times 3 \times DDoS \times 4 \times N \times 3 = 36$  сценари.

### B. Симуляцийн орчны тохиргоо



1-р зураг. Дроны сүргийн топологи — бага DDoS горимд ( $bw=0.30$ ) линкийн чанар ба графын холбоосын зэрэглэлийн алгоритм

Бага горимд найрвартай линк=14, нийт=78. A1–A3 халдагч дронууд удирдагч (L)-руу шууд чиглэсэн бөгөөд нөөц удирдагч (12-р зангилаа)-ийг графын холбоосын зэрэглэлийн алгоритмаар сонгосон.

### Г. Давхарга дамнансан онолын загварчлал

Судалгааны гол шинэлэг тал болох давхарга дамнансан нэгдсэн загвар нь дөрвөн давхаргыг нэгтгэдэг. РНУ давхаргын дохионы алдагдлыг тооцоолохдоо FSPL загварыг ITU-R P.1238 стандартын орчны хүчин зүйлээр өргөтгөн ашигладаг. Нэгдүгээр тэгшитгэлд  $d$  нь зай (метр),  $f$  нь давтамж (Гц),  $N$  нь орчны хүчин зүйл (нээлттэй орчинд 20, хот орчинд 30),  $L_f(n)$  нь давхрын алдагдлын хүчин зүйлийг тус тус илэрхийлнэ.

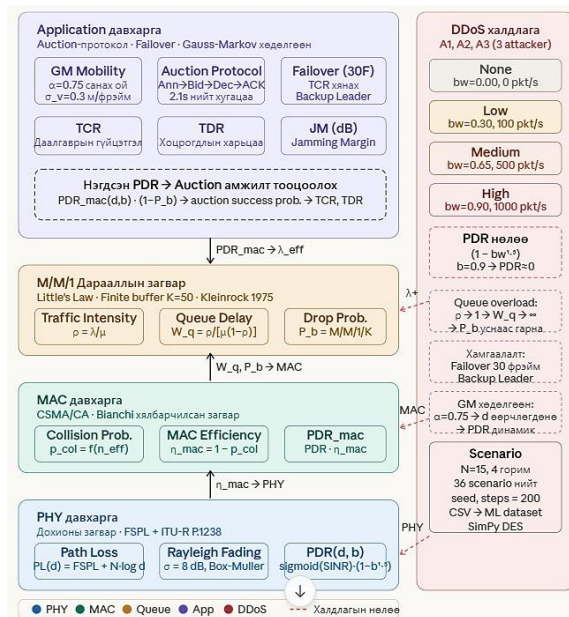
UAV сүрэг нь нэг үсрэл(Single-hop)ийн утасгүй нэвтрүүлгийн горим ашигладаг тул IP чиглүүлэлт буюу сүлжээний давхаргын дамжуулалт энэ загварын хүрээнд хамааралгүй

бөгөөд энэ нь зориудын хялбарчилсан загвар юм. Хоёрдугаар тэгшитгэлд пакет дамжуулалтын харьцаа (PDR)-г тооцоолохдоо  $b$  нь DDoS-ийн зурвасын ачааллын хувь, SINR нь дохио-дуу шуугианы харьцаа,  $\Phi(\text{SINR})$  нь пакет хүргэлтийн магадлалыг тооцоолох логистик (сигмоид) хувиргалтыг илэрхийлнэ. Гуравдугаар тэгшитгэлд  $\lambda$  нь пакет ирэлтийн хурд,  $\mu$  нь сувгийн үйлчлэлийн хурд,  $W_q$  нь M/M/1 дарааллын дундаж хүлээлтийн хугацааг тус тус илэрхийлнэ.

$$PL(d) = FSPL(d, f) + N \cdot \log_{10}(d) + Lf(n) - 28 \text{ (dB)} \quad (1)$$

$$PDR(d, b) = \Phi(\text{SINR}) \times (1 - b^{1.5}) \quad (2)$$

$$\rho = \lambda / \mu, \quad W_q = \rho / [\mu(1 - \rho)] \text{ (M/M/1 дарааллын загвар)} \quad (3)$$



2-р зураг. PHY-MAC-дарааллын загвар-хэрэглээний дөрвөн давхаргын давхарга дамнансан нэгдсэн загварын бүтэц

Физик давхаргад FSPL болон Rayleigh fading загвараар пакет хүргэлтийн харьцааг тооцоолно. MAC давхаргад CSMA/CA мөргөлдөөний загвараар хандалтын үр ашгийг тодорхойлно; дарааллын загварт DDoS халдлагын нэмэлт трафик зурвасын ачааллыг ихэсгэж хүлээлтийн хугацааг нэмэгдүүлж Application давхаргад Gauss-Markov хөдөлгөөний загвар болон өрсөлдөөнт санал өргөх протоколоор даалгавар биелүүлэлтийн харьцаа, хоцрогдлын харьцаа, сүргийн сэргэлтийн хугацааг тооцоолно.

**Д. Хэмжүүрүүдийн тодорхойлолт**

Судалгааны хүрээнд UAV сүргийн тэсвэртэй байдлыг үнэлэхийн тулд PHY-MAC-Transport-Application дөрвөн давхаргыг нэгтгэсэн давхарга дамнансан үнэлгээний дараах гурван хэмжүүрийг ашиглав.

**2-РХҮСНЭГТ. ДАВХАРГА ДАМНАСАН ТЭСВЭРТЭЙ БАЙДЛЫН ҮНЭЛГЭЭНИЙ ХЭМЖҮҮРҮҮД**

(★ = ШИНЭ ХУВЬ НЭМЭР)

Хэмжүүр	Томьёо	Тайлбар
TCR	$TCR = N_{completed} / N_{total}$	Даалгаврын амжилтын хувь. Хэрэглээний давхаргын нөлөөлөл.
TDR	$TDR = N_{delayed} / N_{total}$	Хоцорсон даалгаврын хувь. Сүлжээ/хандалтын давхаргын саатал.
SRT ★	$SRT = t_{stable} - t_{leader\_down}$	Систем сэргэх хугацаа (сек) — шинэ хувь нэмэр.

DDoS халдлагын улмаас удирдагч зангилаа доголдсон тохиолдолд системийн тасралтгүй ажиллагааг хангахын тулд удирдагчийн нөхөн сэргэлтийн механизмыг хэрэгжүүлсэн. DDoS горимд гурван тархсан халдагч зангилаа нь нийтдээ тохируулсан зурвасын ачааллын хувийг хамтран ашиглан UDP flooding халдлага явуулдаг.

Удирдагчийн нөхөн сэргэлтийн механизм нь графын холбоосын зэрэглэлийн (Degree Centrality) алгоритмыг ашиглан сүлжээний хамгийн их холбоостой агентийг шинэ удирдагчаар динамикаар сонгодог.

Сүргийн сэргэлтийн хугацаа (SRT) нь DDoS халдлагад өртөж удирдагч зангилаа доголдсон цагаас удирдагчийн нөхөн сэргэлтийн алгоритм дуусч систем тогтвортой болох хүртэлх хугацааг хэмждэг ( $SRT = t_{stable} - t_{leader\_down}$ ) бөгөөд уг хэмжүүрийн DDoS эрчтэй хамаарлын нарийвчилсан шинжилгээг дараагийн судалгаанд хийнэ.

**Е. Gauss-Markov хөдөлгөөний загвар**

UAV-уудын хөдөлгөөнийг Gauss-Markov загвараар ( $\alpha=0.75$ ) симуляцлана.

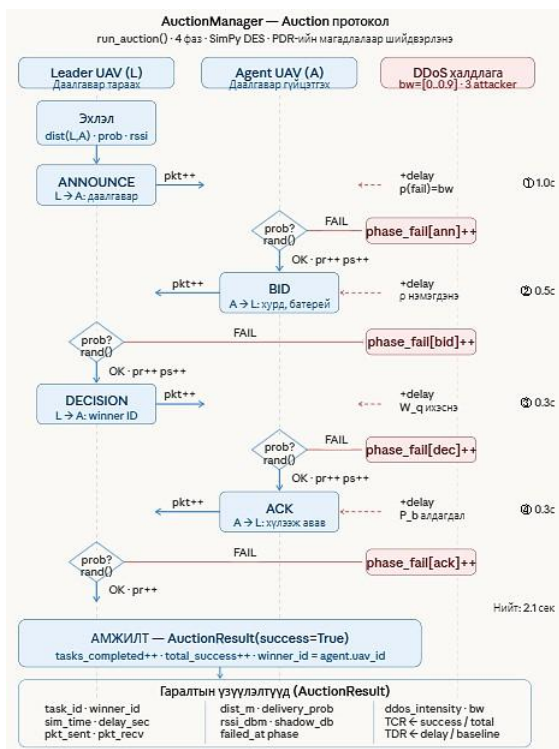
$$v(t) = \alpha \cdot v(t-1) + (1-\alpha) \cdot \bar{v} + \sqrt{(1-\alpha^2)} \cdot \sigma_v \cdot \epsilon(t) \quad (4)$$

Нэгдэх тэгшитгэлд  $\alpha=0.75$  нь санах ойны коэффициент,  $\bar{v}$  нь дундаж хурдны зорилт (target mean speed),  $\sigma_v$  нь хурдны стандарт хазайлт,  $\epsilon(t)$  нь  $N(0,1)$  хуваарилалтай цагаан шуугиан бөгөөд UAV судалгаанд  $\alpha=0.75$  хамгийн тохиромжтой утга болно [9].

Дээрх томьёо нь нэгдүгээр зэргийн авторегрессив процесс (AR(1)) бөгөөд UAV-ийн хөдөлгөөн нь өмнөх хугацааны тугас хамаарх хамаарлын коэффициент (correlation coefficient)-тайгаар болохыг илэрхийлнэ. Тухайлбал,  $\alpha=0$  бол тохиолдолд бүрэн санамсаргүй алхам (Random Walk),  $\alpha=1$  бол тохиолдолд бүрэн шугаман хөдөлгөөн болно —  $\alpha=0.75$  нь хоёр хооронд завсрын тохиромжтой утга болбоос UAV нь 75%-ийн магадлалтаар өмнөх чиглэлээ хадгалж, 25%-ийн магадлалтаар өөрчлөн бодит нислэгийн зан чанарыг сайн дуурайдаг. Уг загвар нь фрэйм бүрт UAV-уудын зайг шинэчлэх боломжтой болгоос FSPL загварын оролцлон PHY давхаргын PDR болон RSSI хэмжүүрт шууд нөлөөлөх суурь бишгүй давхаргад хэмжүүрт шатлан нөлөөлөх циклийн суурь болно.

**Ж. Өрсөлдөөнт санал өргөх протоколын загварчлал**

Өрсөлдөөнт санал өргөх зарчимд суурилсан даалгавар хуваарилалт нь Choi et al. [9]-д тодорхойлсон зөвшилцлийн суурьт боодлын аукцион (CBBA — Consensus-Based Bundle Algorithm) зарчмыг үндэслэн дараах дөрвөн үе шатаар явагддаг бөгөөд үе шат бүрийн хугацааны утгыг утасгүй UAV орчны дундаж утгад тулгуурлан тохируулсан [10]. DDoS халдлага нь эдгээр үе шатын аль нэгийг хугацаа хэтрэлтэд (timeout) оруулснаар аукцион бүхэлдээ амжилтгүй болж TCR буурч TDR нэмэгддэг.



3-р зураг. Өрсөлдөөнт санал өргөх протоколын дөрвөн үе шатын урсгал диаграм

- (1) **Announce үе шат (1.0 сек):** Удирдагч (Leader) агент шинэ даалгаврын мэдэгдлийг нэвтрүүлгийн горимоор бүх агентад илгээнэ. Нэвтрүүлгийн нэмэлт хугацааг тооцон 1.0 сек тохируулсан [10]. DDoS халдлага нь энэ мэдэгдлийг хугацаа хэтрэлтэд оруулвал агентууд даалгаврын мэдээлэл хүлээн авч чадахгүй болно.
- (2) **Bid үе шат (0.5 сек):** Агент бүр өөрийн нөөц, байршлаас хамааран санал (bid) үүсгэж удирдагчид илгээнэ. Unicast reply-ийн хугацааг 0.5 сек тохируулсан [10]. DDoS flooding нь сувгийг дүүргэснээр bid мессежүүд удирдагчид хүрэхгүй алдагдана.
- (3) **Decision үе шат (0.3 сек):** Удирдагч хамгийн өрсөлдөөнт санал тавьсан агентыг ялагчаар зарлаж, даалгавар хуваарилалтын шийдвэрийг илгээнэ. Тооцоолол болон нэвтрүүлгийн нийт хугацааг 0.3 сек тохируулсан [10]. Энэ үе шат тасалдвал даалгавар хуваарилагдахгүй, TCR буурна.
- (4) **ACK үе шат (0.3 сек):** Ялагч агент даалгаврыг хүлээн авснаа баталгаажуулах ACK мессеж илгээнэ. Нэг хаягт дамжуулалтын (unicast) хугацааг 0.3 сек тохируулсан [10].

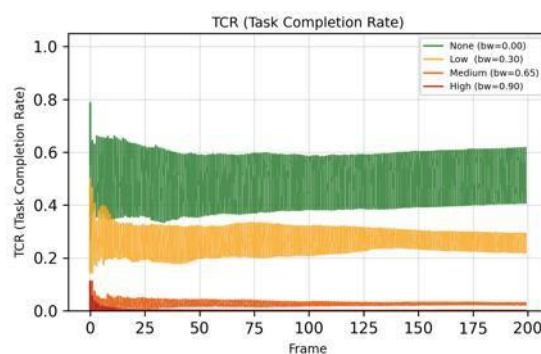
Хугацаа хэтрэлтэд орвол удирдагч даалгаврыг амжилтгүй гэж тэмдэглэж, TDR нэмэгдэнэ.

Мэдэгдэл, санал, шийдвэр, баталгаажуулалт гэсэн дөрвөн үе шат бүрт DDoS халдлага хугацаа хэтрэлт үүсгэж болох бөгөөд амжилтгүй болоход үе шатын алдааны тоолуур нэмэгдэж, TCR буурч TDR өсдөг. Өрсөлдөөнт санал өргөх протоколын нийт хугацаа 2.1 секунд.

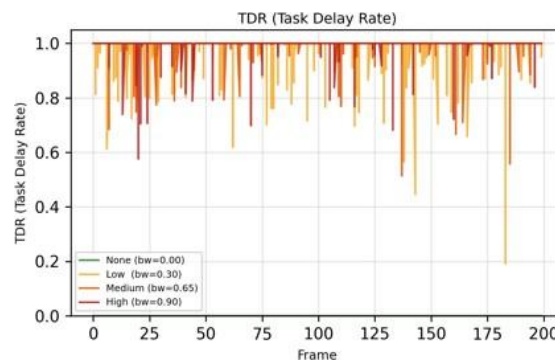
**IV. ТУРШИЛТЫН ҮР ДҮН**

**A. Тэсвэрлэх чадварын үндсэн хэмжүүрүүдэд дэх халдлагын нөлөөлөл**

4-р зурагт Халдлагагүй горимд  $TCR \approx 0.50-0.65$  тогтвортой хэлбэлзэнэ; бага горимд  $TCR \approx 0.20-0.30$ ; дунд болон хүчтэй горимд  $TCR \approx 0.00-0.02$  хүртэл огцом унаж өрсөлдөөнт санал өргөх протоколын дөрвөн үе шат бүгд симуляцийн нөхцөлд бүрэн доголдоно.

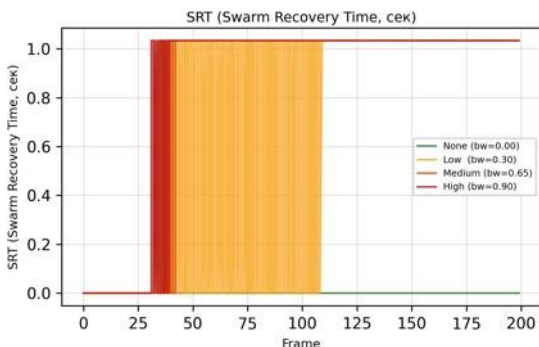


4-р зураг. Даалгавар биелүүлэлтийн харьцаа (TCR) — DDoS халдлагын эрчмийн нөлөөллийн цаг хугацааны динамик (200 фрэйм, гучин зургаан сценари)



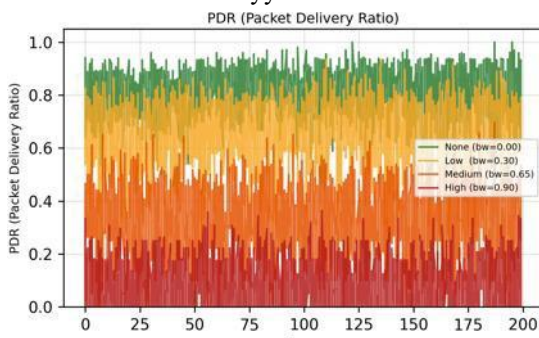
5-р зураг. Даалгавар хоцрогдлын харьцаа (TDR) — DDoS халдлагын эрчмийн нөлөөллийн цаг хугацааны динамик (200 фрэйм, гучин зургаан сценари)

Халдлагагүй горимд  $TDR \approx 0.05-0.15$  доод утгатай тогтворжиж хоцрогдол хязгаарлагдмал байна. Бага горимд  $TDR \approx 0.30-0.45$  болж мэдэгдэхүйц өснө; дунд болон хүчтэй горимд  $TDR \approx 0.75-1.00$  хүртэл огцом нэмэгдэж Bid болон ACK үе шатуудад хугацаа хэтрэлт масс хэмжээгээр үүсч хоцорсон даалгаврын хувь системийн нийт даалгаврын дийлэнхийг эзлэнэ. TDR-ийн өсөлт нь TCR-ийн уналттай шууд урвуу хамааралтай бөгөөд DDoS эрч нэмэгдэхэд Transport болон Application давхаргын хамтарсан доголдлыг тоон байдлаар баталгаажуулж байна.



6-р зураг. Сүргийн сэргэлтийн хугацаа (SRT) — DDoS халдлагын эрчмийн нөлөөллийн цаг хугацааны динамик (200 фрэйм, гучин зургаан сценари)

(Халдлагагүй болон бага горимд (bw=0.00, bw=0.30) LeaderFailover механизм идэвхжихгүй тул SRT=0.00 хэвээр байж дунд горимд (bw=0.65) 34-р фрэймээс эхлэн SRT≈1.033 сек болж нийт 50 фрэймийн 16-д удирдагч солих үйл явц идэвхжиж байна. Харин хүчтэй горимд (bw=0.90) 32-р фрэймээс эхлэн SRT≈1.033 сек — нийт 50 фрэймийн 18-д идэвхжиж байна. SRT-ийн утга Degree Centrality алгоритмын нэг давталтын хугацаатай нийцэж байгаа нь LeaderFailover механизмын тогтвортой ажиллагааг баталгаажуулна.



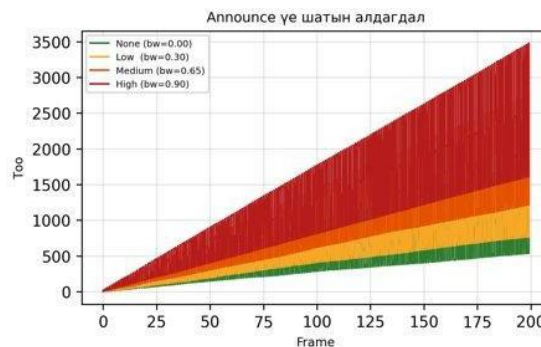
7-р зураг. Пакет дамжуулалтын харьцаа (PDR) — DDoS халдлагын эрчмийн нөлөөллийн цаг хугацааны динамик (200 фрэйм, гучин зургаан сценари)

Халдлагагүй горимд PDR≈0.74–0.95 (avg=0.826) тогтвортой хэлбэлзэнэ; бага горимд PDR≈0.52–0.84 (avg=0.642) болж мэдэгдэхүйц буурч дунд горимд PDR≈0.15–0.47 (avg=0.327) хүртэл огцом унаж зурвасын ачааллын хувь (bw=0.65)-аас үүдэлтэй М/М/1 дарааллын хэт ачааллын нөлөөл трэндээс тодорхой харагдаж байна. Хүчтэй горимд PDR≈0.00–0.27 (avg=0.098) хүртэл бараг тэгт ойртсон нь 2.4 ГГц-ийн суваг UDP flooding-аар бүрэн дүүрч пакет хүргэлт системийн хэмжээнд алдагдаж байгааг харуулж байна.

**Б. Auction протоколд DDoS халдлагын эрчмийн нөлөөллийн үр дүн**

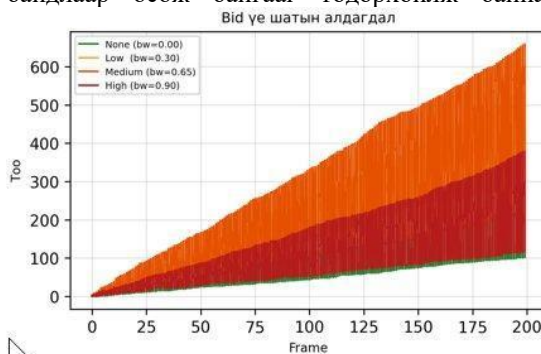
8–11-р зурагт өрсөлдөөнт санал өргөх протоколын Announce, Bid, Decision, ACK гэсэн дөрвөн үе шат бүрт DDoS халдлагын эрчмийн нөлөөгөөр хуримтлагдсан алдагдлын тоог харуулав. Халдлагагүй горимд ч Announce үе шатад хамгийн их алдагдал (4,979) тохиолдож байгаа нь UDP broadcast механизмын суурь өртөмтгий байдлыг илэрхийлж байна. Хүчтэй горимд (bw=0.90) Announce алдагдал 12,968 хүрч аукционы эхний шатнаас тасалдал үүсдэг тул Decision (155) болон ACK (35) үе шагуудад хүрэх

протоколын дуусгавар болох нь бараг боломжгүй болж байгааг симульцийн орчинд бүрэн харуулж байна.



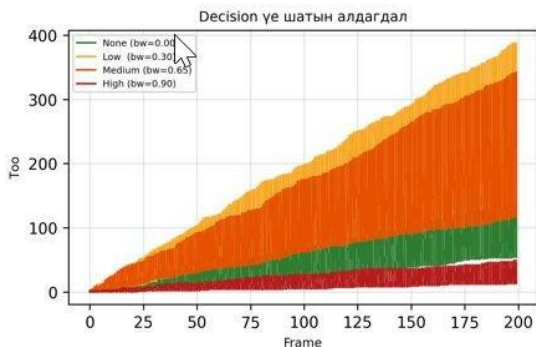
8-р зураг. Announce үе шатын хуримтлагдсан алдагдлын цаг хугацааны динамик (200 фрэйм, гучин зургаан сценари)

Халдлагагүй (None) горимд 200 фрэймийн турш Мэдэгдэл (Announce) үе шат дахь багцын алдагдал 4,979 буюу фрэйм тутамд дунджаар 99.6 хугацаа хэтрэлт (timeout) бүртгэгдсэн нь DDoS халдлагаас үл хамааран UDP нэвтрүүлгийн (broadcast) механизмын суурь эмзэг байдал тогтмол илэрч байгааг харуулж байна. Халдлагын эрч нэмэгдэхэд алдагдлын хэмжээ бага горимд 6,354 (+27.6%), дунд горимд 9,644 (+51.8%), хүчтэй горимд 12,968 (+34.5%) болж өссөн нь халдлагагүй горимтой харьцуулахад харгалзах утгууд нь 1.28x, 1.94x, 2.60x дахин ихэссэн үзүүлэлт юм. DDoS халдлагын эрчмээс хамаарсан алдагдлын өсөлтийн зөрүүг (Δ) авч үзвэл: халдлагагүйгээс бага горим руу (Δ1,375), багаас дунд руу (Δ3,290), дундаас хүчтэй рүү (Δ3,324) тус тус нэмэгдсэн нь халдлагын нөлөөлөл , тэнцвэргүй байдлаар өсөж байгааг тодорхойлж байна..



9-р зураг. Bid үе шатын хуримтлагдсан алдагдлын цаг хугацааны динамик (200 фрэйм, гучин зургаан сценари)

Бага горимд Bid алдагдал 2,085 болж мэдэгдэхүйц өссөн, дунд горимд 2,771 буюу хамгийн өндөр утгад хүрсч байна. Хүчтэй горимд 867 хүртэл огцом буурсан нь сувгийн бүрэн дүүрэлтээс үүдэн Bid мессэж хүргэгдэхийн өмнө Announce үе шатад алдагдаж байгааг илтгэнэ.



10-р зураг. Decision үе шатын хуримтлагдсан алдагдлын цаг хугацааны динамик (200 фрэйм, гучин зургаан сценари)

Халдлагагүй горимд шийдвэр гаргах (Decision) үе шат дахь багцын алдагдал 625-аар хязгаарлагдсан бол халдлагын бага горимд (bw=0.30) энэ үзүүлэлт 1,310-д хүрч, хамгийн өндөр алдагдлын харьцааг үзүүлэв. Харин дунд горимд 869, хүчтэй горимд 155 болтлоо огцом буурсан байна. Хүчтэй халдлагын үед Шийдвэр гаргах үе шат дахь алдагдал ийнхүү багассан нь уг шатанд хүрэх өгөгдлийн урсгал эрс багассантай холбоотой бөгөөд энэ нь аукционы процесс эхний үе шатууддаа (Мэдэгдэл, Санал) аль хэдийн тасалдаж, доголдож байгааг илэрхийлж байна.



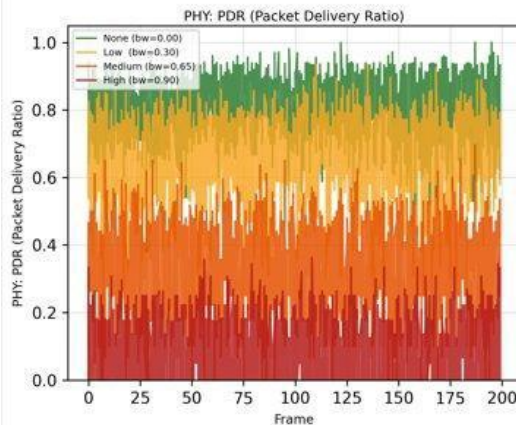
11-р зураг. ACK үе шатын хуримтлагдсан алдагдлын цаг хугацааны динамик (200 фрэйм, гучин зургаан сценари)

Халдлагагүй горимд баталгаажуулах мэдээллийн (ACK) алдагдал нийт 307 буюу нийт алдагдлын 4.6%-ийг эзэлж байна. Сүлжээний зурвасын ачаалал бага горимд (bw=0.30) байх үед энэ үзүүлэлт 997 болж, 224.8%-иар огцом өсөж оргилдоо хүрсэн нь Мэдэгдэл (Announce), Санал (Bid), Шийдвэр (Decision) гэсэн гурван үе шатыг амжилттай давсан аукционы процесс сувгийн ашиглалтын коэффициент ( $\rho=0.255$ )-оос хамааран баталгаажуулах мэдээллийн хугацаа хэтрэлт (ACK timeout) нэмэгдэж байгааг харуулж байна. Харин дунд горимд (bw=0.65) 464, хүчтэй горимд (bw=0.90) 35 болж, нийт алдагдлын 0.2% хүртэл буурсан байна. Энэ нь халдлагын эхэн үе шатуудад хуримтлагдсан багцын алдагдлаас шалтгаалан баталгаажуулах (ACK) шатанд хүрэх аукционы тоо эрс цөөрснийг илтгэх бөгөөд хүчтэй халдлагын горимд 550 аукционаас нэг нь ч амжилттай болоогүй (бүгд эхний шатандаа тасалдсан) үр дүн үүнийг илэрхийлж байна.

**B. PHY-MAC-Transport-Application давхарга дамнасан халдлагын нөлөөлөл**

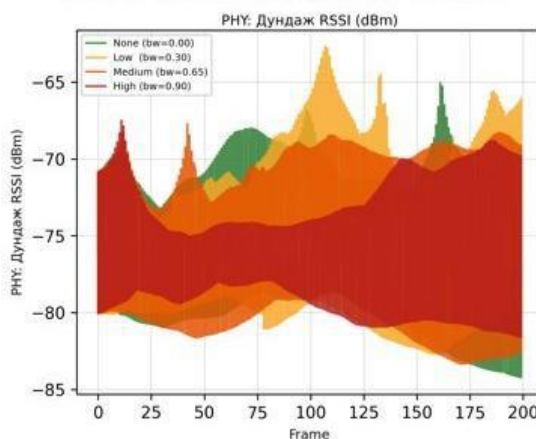
**B. PHY-MAC-Transport-Application давхарга дамнасан халдлагын нөлөөллийн шинжилгээ**

12–17-р зурагт PHY, MAC, Transport давхарга бүрийн хэмжүүрүүд DDoS халдлагын эрчмийн шатласан нөлөөллийг харуулав. PHY давхаргад дохионы чанар буурч, MAC давхаргад мөргөлдөөн өсч, Transport давхаргад дарааллын хугацаа нэмэгдэх замбаруулалыг чинээлэн харуулаж байна.



12-р зураг. PHY давхаргын пакет дамжуулалтын харьцаа (PHY PDR) — DDoS халдлагын эрчмийн нөлөөллийн цаг хугацааны динамик (200 фрэйм, гучин зургаан сценари)

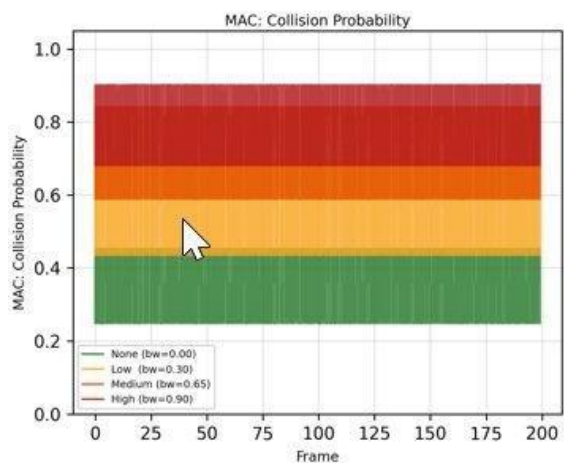
Физик давхаргын багц хүлээн авах магадлал (PHY PDR) халдлагагүй горимд 0.47–0.85 (дундаж нь 0.654) утгын хооронд тогтвортой хэлбэлзэж байна. Халдлагын бага горимд энэ үзүүлэлт дунджаар 0.549 болж буурсан бол дунд горимд 0.311, хүчтэй горимд 0.05–0.12 (дундаж нь 0.097) хүртэл огцом унасан байна. Энэхүү үзүүлэлт нь Рэлейн сааралтын (Rayleigh fading) нөлөө болон DDoS халдлагын улмаас үүссэн сувгийн хэт ачаалал хавсарсанаар физик давхарга дахь өгөгдлийн дамжуулалт бараг бүрэн зогсож, багц хүргэлт боломжгүй болсныг илэрхийлж байна.



13-р зураг. PHY давхаргын дундаж RSSI — DDoS халдлагын эрчмийн нөлөөллийн цаг хугацааны динамик (200 фрэйм, гучин зургаан сценари)

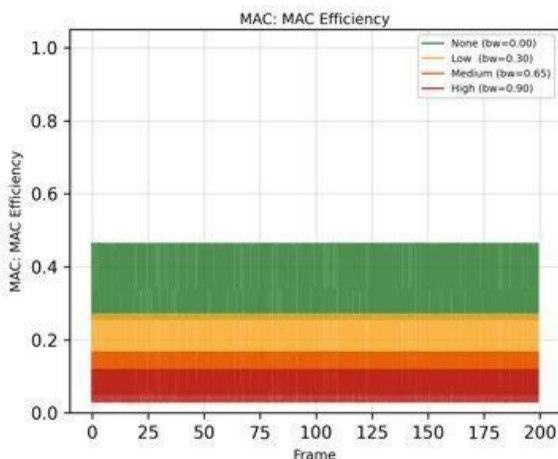
Хүлээн авсан дохионы хүч (RSSI) халдлагагүй горимд дунджаар -75.0 дБм байгаа бол халдлагын бага горимд -76.0 дБм, дунд горимд -75.5 дБм, хүчтэй горимд -76.4 дБм хүртэл тус тус буурсан байна. RSSI-ийн энэхүү уналт нь DDoS халдлагын улмаас үүссэн интерференцийн (interference) нөлөөгөөр физик (PHY) давхарга дахь дохионы чанар муудаж байгааг илтгэж

байна.



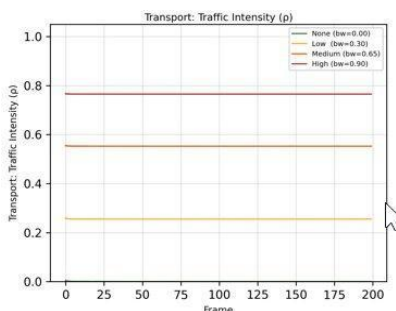
14-р зураг. MAC давхаргын мөргөлдөөний магадлал (Collision Probability) — DDoS халдлагын эрчмийн нөлөөллийн цаг хугацааны динамик (200 фрэйм, гучин зургаан сценари)

Халдлагагүй горимд багцын мөргөлдөөний магадлал (collision probability) 0.295 утгатай тогтвортой байгаа бол халдлагын бага горимд 0.487, дунд горимд 0.660, хүчтэй горимд 0.745 хүртэл шатлан өссөн байна. DDoS урсгал (traffic) нэмэгдэхийн хэрээр CSMA/CA хандалтын хяналтын механизм бүхий сувагт мөргөлдөөний магадлал ийнхүү огцом өсөж байгаа нь сүлжээний нөөцийн өрсөлдөөн дээд цэгтээ хүрч, өгөгдөл дамжуулалт саатах үндсэн шалтгаан юм.



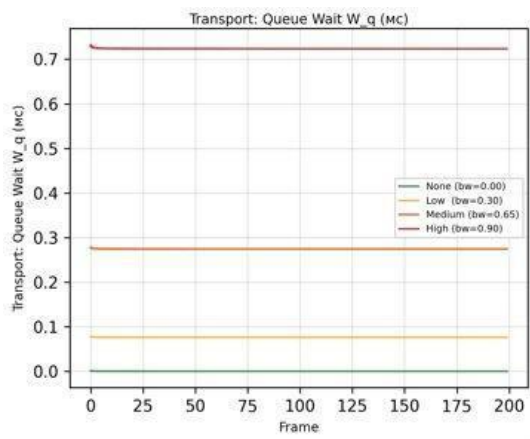
15-р зураг. MAC давхаргын үр ашиг (MAC Efficiency) — DDoS халдлагын эрчмийн нөлөөллийн цаг хугацааны динамик (200 фрэйм, гучин зургаан сценари)

Халдлагагүй горимд MAC үр ашиг 0.406 байна бол бага горимд 0.232, дунд горимд 0.128, хүчтэй горимд 0.089 болж тус тус шатлан буурсан нь DDoS эрч нэмэгдэхэд CSMA/CA мөргөлдөөний огцом өссөнөөс сувгийн ашиглалт буурч пакет дамжуулалт улам бүр доголдож байгааг илтгэнэ.



16-р зураг. Transport давхаргын трафикийн эрчмэл ( $\rho$ ) — DDoS халдлагын эрчмийн нөлөөллийн цаг хугацааны динамик (200 фрэйм, гучин зургаан сценари)

Халдлагагүй горимд сувгийн ашиглалтын коэффициент  $\rho = 0.000$  байгаа нь M/M/1 дарааллын загвар дахь ачаалал хамгийн бага түвшинд байгааг илтгэнэ. Харин халдлагын бага горимд  $\rho = 0.255$ , дунд горимд  $\rho = 0.553$ , хүчтэй горимд  $\rho = 0.765$  хүртэл тус тус өссөн байна. Сувгийн ашиглалтын түвшин ийнхүү нэмэгдэж байгаа нь дарааллын (buffer) хэт ачааллыг үүсгэж, улмаар багцын алдагдал (packet loss) болон дамжуулалтын саатал огцом ихсэх шалтгаан болж байна.



17-р зураг. Transport давхаргын дарааллын хүлээлтийн хугацаа ( $W_q$ ) — DDoS халдлагын эрчмийн нөлөөллийн цаг хугацааны динамик (200 фрэйм, гучин зургаан сценари)

Халдлагагүй горимд  $W_q \approx 0.000$  ms — хүлээлт бараг 0 байгаа бол бага горимд  $W_q = 0.076$  ms, дунд горимд  $W_q = 0.275$  ms, хүчтэй горимд  $W_q = 0.724$  ms хүртэл өсч M/M/1 дарааллын Литтльсийн хууль  $\rho / [\mu(1-\rho)]$  нь  $\rho = 0.765$  уед огцом өсөөр дараалалын хүлээлт нэмэгдсэн болохыг илтгэнэ.

### ДҮГНЭЛТ БА ЦААШДЫН АЖИЛ

Энэ судалгааны хүрээнд дараах гурван үндсэн үр дүнд хүрэв. Үүнд: (1) 2.4 ГГц-ийн давтамжийн зурваст ажилладаг өрсөлдөөнт санал өргөх зарчимд суурилсан UAV сүргийн DDoS халдлагад тэсвэртэй байдлыг PHY-MAC-Transport-Application дөрвөн давхарга дамнасан нэгдсэн загвараар үнэлэх тоон хэмжүүрийн систем боловсруулсан; (2) сүргийн тэсвэртэй байдлын шинэ хэмжүүр болох SRT (Swarm Recovery Time)-ийг тодорхойлж өгөгдлийн багцад нэвтрүүлсэн; (3) машин сургалтын алгоритмд зориулсан 36 сценари бүхий, 41 баганатай шошгожуулсан CSV өгөгдлийн багцыг үүсгэсэн.

Туршилтын үр дүнгээс үзэхэд дунд горимд (зурвасын ачааллын хувь  $bw = 0.65$ ) PDR=32.7% болж бага горимын ( $bw = 0.30$ , PDR=64.2%) -тай харьцуулахад 49.2%-иар харьцангуй буурсан нь DDoS эрч нэмэгдэх тусам системийн найдвартай ажиллагаа огцом доройтдог болохыг илтгэнэ. TDR хэмжүүр халдлагагүй горимд 0.000 байснаа бага горимоос эхлэн 0.995 хүртэл огцом өсч бүх

даалгавар хугацаа хэтрэлтэд орсон нь протоколын дараалсан доголдлыг тодорхойлсон. Хүчтэй горимд ( $bw=0.90$ )  $TCR=0.000$  буюу 550 аукционы нэг ч амжилтгүй болсон нь сүргийн даалгавар хуваарилалт бүхэлдээ доголдсоны нотолгоо болно.

Цаашдын судалгааны хүрээнд TCR, TDR болон SRT хэмжүүрүүдийн хоорондын хамаарлыг ANOVA болон t-test статистик шинжилгээгээр баталгаажуулна. Мөн LSTM Autoencoder-г суурилсан хэвийн бус үйлдэл илрүүлэлтийн загварыг хэрэгжүүлж, ablation study (LSTM AE vs CNN vs Vanilla AE)-ээр загваруудын гүйцэтгэлийг харьцуулан үнэлэхээр төлөвлөнө.

## ТАЛАРХАЛ

Судалгааны ажлыг чиглүүлж, мэргэжлийн удирдлагаар хангасан удирдагч багш, доктор Ц.Энхтөр болон туслалцаа дэмжлэг үзүүлсэн ШУТИС-ийн МХТС-ийн Кибер аюулгүй байдлын тэнхимийн багш нарт талархал илэрхийлье.

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by KOICA (Korea International Cooperation Agency) through the "Capacity Building Project for the School of Information and Communication Technology at Mongolian University of Science and Technology" (Contract No. P2019-00124).

## НОМ ЗҮЙ

- [1] Liu, J. et al., "A Survey on Security of UAV Swarm Systems," ACM Compute. Surv., 2024.
- [2] Zhang, W. & Chen, L., "Two-Stage Auction-Based Task Allocation in UAV Swarms," IJMLC, vol. 14, no. 3, 2024.
- [3] Torres, M. et al., "Resilient Task Allocation for UAV Swarms Using PSO-ILP," Drones, vol. 9, no. 1, 2025.
- [4] Nguyen, T. & Kim, S., "Swarm Benefit Optimization via Cooperative Auctions," IEEE Access, 2024.
- [5] Patel, R. et al., "Simulation of Cyberattacks on UAV Swarm Coordination," Preprints, 2025.
- [6] Ahmed, F. et al., "LSTM Autoencoder for DDoS Attack Detection in IoT Networks," arXiv:2309.12345, 2023.
- [7] Nguyen, H. & Park, J., "LSTM-AE Anomaly Detection for Network Traffic," IEEE TNNLS, vol. 31, no. 8, 2020.
- [8] Zhao, Y. et al., "Optimized AE-LSTM for Network Anomaly Detection," Comput. Secur., 2025.
- [9] Choi, H.-L., Brunet, L. & How, J. P., "Consensus-Based Decentralized Auctions for Robust Task Allocation," IEEE Trans. Robot., vol. 25, no. 4, pp. 912–926, 2009.

# ИХ ӨГӨГДӨЛ БА ХИЙМЭЛ ОЮУН: БҮХ НИЙТИЙН ЦАХИМ УР ЧАДВАРЫГ НЭМЭГДҮҮЛЭХ АСУУДЛУУД

Ганболдын НЯМХҮҮ<sup>1</sup>, Зундуйн БУЯНХИШИГ<sup>2</sup>, Шагдарын ГАНБОЛД<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Монгол Улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Холбооны инженерчлэлийн  
ТЭНХИМ

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [Nyak@mnagency.mn](mailto:Nyak@mnagency.mn)<sup>3</sup>

**Хураангуй:** Хиймэл оюун болон их өгөгдлийн технологи нийгмийн бүх салбарт нэвтэрч буй өнөө үед Монгол Улсад бүх нийтийн тоон бичгийн (цахим) ур чадварын агуулга, үнэлгээний шалгуурыг шинэчлэх шаардлага тулгарч байна. Энэхүү судалгаанд баримт бичгийн шинжилгээ, харьцуулсан нэгтгэлийн аргыг ашиглан "Алсын Хараа–2050", DigComp 2.2, НҮБХХ, АХБ болон ЮНЕСКО-гийн холбогдох материалд тулгуурлав. Шинжилгээний үр дүнд дөрвөн үндсэн асуудал тогтоогдов: дэд бүтцийн тэгш бус хүртээмж; суурь болон ахисан чадамжийн хоорондын зөрүү; өгөгдлийн засаглал, ёс зүйн орчны дутагдал; мэргэжилтний хүний нөөцийн хомсдол. Эдгээр асуудлыг шийдвэрлэхийн тулд тоон ур чадварыг суурь, хэрэглээний, шүүн тунгаах-аналитик, ёс зүй-хариуцлагын гэсэн шаталсан хүрээнд тодорхойлж, бодлогын цогц загвар хэрэгжүүлэх шаардлагатай гэсэн дүгнэлтэд хүрэв.

Түлхүүр үг: *Тоон бичгийн ур чадвар, Тоон бичиг ур чадварын хүрээ, Хиймэл оюун, их өгөгдөл*

## I. УДИРТГАЛ

Дэлхий дахинд хиймэл оюун, их өгөгдөлд суурилсан шийдвэр гаргалт, платформ эдийн засаг эрчимтэй тэлж буй энэ үед иргэдийн “тоон бичгийн ур чадвар” ойлголт улам өргөжиж байна. Өмнө нь төхөөрөмж ашиглах, интернэтэд холбогдох, энгийн програмтай ажиллах чадварыг голлон ойлгодог байсан бол өнөөдөр өгөгдлийг унших, эх сурвалжийг шүүх, алгоритмын нөлөөллийг ойлгох, хувийн мэдээллээ хамгаалах, хиймэл оюуныг ёс зүйтэй ашиглах чадвар хүртэл уг хүрээнд багтаж байна [1]-[3].

Монгол Улс төрийн цахим шилжилт, нээлттэй өгөгдөл, хиймэл оюуны стратегийн чиглэлээр ахиц гаргаж байгаа хэдий ч эдгээр өөрчлөлтийг бүх нийтийн бодит чадвар болгон хувиргах асуудал бүрэн шийдэгдээгүй хэвээр байна. “Алсын хараа-2050”-д бүх түвшний боловсролд нээлттэй систем, нэгдсэн цахим сургалтын платформ, хиймэл оюунд суурилсан технологи нэвтрүүлэх зорилт туссан [1]. Гэвч бодлогын зорилт, бодит хэрэглээ, иргэдийн өдөр тутмын чадавхын хооронд зөрүү оршиж байна.

Иймд энэхүү өгүүлэл нь Монголын нөхцөлд бүх нийтийн тоон бичгийн ур чадварыг нэмэгдүүлэхэд нөлөөлж буй хүчин зүйлсийг тодорхойлж, их өгөгдөл ба хиймэл оюуны үед тохирсон чадамжийн хүрээний шинэчлэлийн чиглэлийг санал болгохыг зорив.

## II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Энэ судалгаа нь анхдагч түүвэр судалгаа бус, хоёрдогч мэдээлэлд тулгуурласан чанарын шинжилгээ юм. Судалгаанд 2021-2025 онд хэвлэгдсэн бодлогын болон үнэлгээний зургаан гол баримт бичгийг сонгон авч, агуулгын кодчилал, харьцуулсан нэгтгэл, асуудал-шийдлийн шинжилгээг хийв. Сонгосон баримт бичигт боловсрол дахь МХХТ-ийн бодлогын үнэлгээ [2], Монголын хиймэл оюуны бэлэн байдлын үнэлгээ [3], цахим ил тод байдлын индекс [4], цахим засаглалын техникийн туслалцааны тайлан [5], дижитал бэлэн байдлын

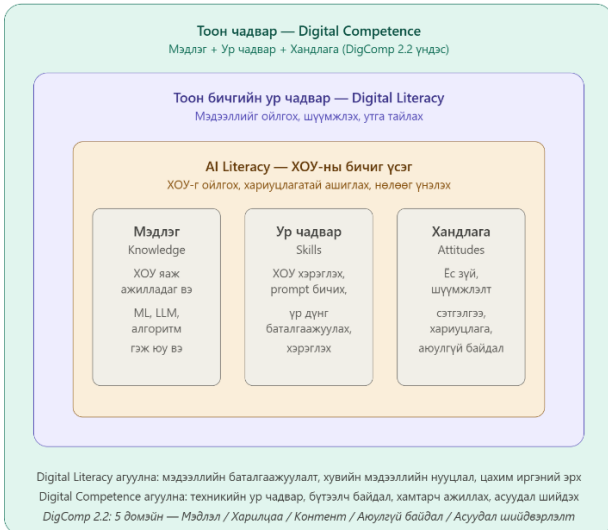
үнэлгээ [6] болон урт хугацааны хөгжлийн бодлого [1] багтав.

Шинжилгээний нэгжийг дараах дөрвөн хэмжээсээр байгуулсан. Үүнд: 1) хүртээмж ба дэд бүтэц, 2) ур чадварын агуулга ба түвшин, 3) өгөгдлийн засаглал ба ёс зүй, 4) институц ба хүний нөөцийн тогтвортой байдал. Ийнхүү бодлогын баримт бичгүүдээс нийтлэг хэв шинж, зөрчил, давхардал, хэрэгжилтийн сул талыг нэгтгэн дүгнэв.

## III. ТООН УР ЧАДВАРЫН ОЙЛГОЛТ БА СОРИЛТУУД

### 1. Бүх нийтийн тоон бичгийн нэн шинэ ур чадвар

Их өгөгдөл ба хиймэл оюуны үед тоон бичгийн ур чадварыг дөрвөн түвшинд авч үзэх шаардлагатай байна. Нэгдүгээр түвшин нь суурь хэрэглээний чадвар бөгөөд төхөөрөмж ашиглах, холболт хийх, цахим үйлчилгээ авах, аюулгүй нууц үг хэрэглэх зэрэг энгийн чадамжуудыг хамарна. Хоёрдугаар түвшин нь мэдээлэл, өгөгдөлтэй ажиллах чадвар буюу хүснэгт, график, индикатор, цахим эх сурвалжийг ойлгож тайлбарлах, өгөгдөлд тулгуурлан шийдвэр гаргах ур чадвар юм. Гуравдугаар түвшин нь хиймэл оюуны хэрэглээний чадвар бөгөөд генератив системтэй ажиллах, асуулт боловсруулах, гарсан хариуг нягтлах, эрсдэл таних зэрэг чадамжийг агуулна. Дөрөвдүгээр түвшин нь ёс зүй, эрх зүй, иргэний оролцооны чадвар бөгөөд хувийн мэдээлэл хамгаалах, алгоритмын ялгаварлал, ташаа мэдээлэл, зохиогчийн эрх, хариуцлагатай хэрэглээг ойлгох асуудлыг багтаана [3], [4].



1-р зураг. Тоон чадвар, тоон бичгийн ур чадвар, Хиймэл оюуны чадварын давхцлын харьцаа

## 2. Хүртээмжийн тэгш бус байдал суурь саад хэвээр байна

Бүх нийтийн тоон бичгийн ур чадварыг хөгжүүлэхэд хамгийн эхний нөхцөл бол дэд бүтэц, хүртээмж юм. НҮБХХ-ийн зорилтот бүлгийн үнэлгээгээр зөвхөн 20 хувь нь гэртээ хувийн компьютертой, 70 хувь нь найдвартай өндөр хурдны интернэтгүй байгаа нь хиймэл оюунд суурилсан үйлчилгээ, цахим сургалт, өгөгдөлтэй ажиллах дадалд бодит хязгаар үүсгэж байна [3]. Дижитал бэлэн байдлын судалгаанд мөн хот-хөдөөгийн ялгаа, гэр хороолол, орлогын түвшин, сургуулийн байршлаас шалтгаалах суралцах боломжийн зөрүүг онцолсон байдаг [6].

Өөрөөр хэлбэл, тоон бичгийн ур чадварын бодлого нь зөвхөн сургалтын агуулга бус, тоног төхөөрөмж, нийтийн сүлжээ, эрчим хүч, нийтийн үйлчилгээний хүрэлцээтэй уялдах ёстой. Дэд бүтэц муу орчинд хиймэл оюуны хүртээмжийг ярьсан ч үр дүн нь тэгш бус үлдэнэ.

## 3. Суурь цахим чадвараас ахисан өгөгдөл, хиймэл оюуны чадвар руу шилжих гүүр сул байна

Монгол Улсын хиймэл оюуны бэлэн байдлын үнэлгээнд “ур чадвар” чиглэл 3.1 оноотой, “ялгарах” үе шатанд үнэлэгдсэн нь суурь дижитал чадамж бүрэлдэж буйг харуулсан ч ахисан техникийн ур чадвар, авьяас татах ба тогтоон барих нөхцөл дутмаг байгааг тодруулсан [3]. Тус тайланд 2024 оны Дижитал бичиг үсгийн хүрээ батлагдсан, E-Mongolia Academy нь иргэд, залуус, төрийн албан хаагчийн чадавхыг дэмжиж буйг дурдсан боловч хиймэл оюуны мэргэжлийн ур чадварын бодлого хангалтгүй байгааг мөн тэмдэглэсэн [3].

ЮНЕСКО-гийн тоймд Монголын боловсролын салбарт нээлттэй эхийн хичээл, цахим сурах бичиг, даалгаврын сан, багшийн туршлагын платформууд үүссэн ч эдгээрийг системтэйгээр өгөгдөл

тайлбарлах, алгоритм ойлгох, хиймэл оюуны хэрэглээтэй холбосон сургалтын залгамж холбоо сул хэвээр байгааг харуулж байна [2]. Иймээс суурь компьютер хэрэглээнээс ахиж, STEM, өгөгдлийн соёл, асуудал шийдвэрлэх сэтгэлгээг дунд болон ахлах боловсролоос эхлэн шаталсан байдлаар шингээх шаардлагатай.

## 4. Өгөгдлийн чанар, нээлттэй байдал, ёс зүйн асуудал

Их өгөгдөл, хиймэл оюуны хэрэглээ өргөжихийн хэрээр зөвхөн өгөгдөл “их” байх нь хангалтгүй, чанартай, цэвэрлэгээтэй, бүтэцжсэн, тайлбарлахад бэлэн байх шаардлага тавигдана. Хиймэл оюуны бэлэн байдлын үнэлгээнд төрийн өгөгдлийн экосистемд эрх зүйн суурь бүрдсэн ч өгөгдлийн чанар, AI-ready байдлыг сайжруулах, стандартчилал, цэвэрлэгээг эрчимжүүлэх шаардлагатай гэж зөвлөсөн [3]. Цахим ил тод байдлын индекс ч мэдээлэл байршуулах журам, нөөц, тогтвортой шинэчлэлтийн чадавх байгууллага бүрт жигд биш байгааг харуулж



байна [4].

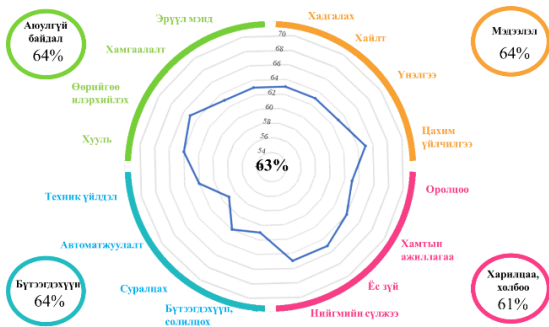
2-р зураг. НҮБХХ-ийн Дижитал хөгжлийн тайлан, 2024,

Энэ нөхцөл нь бүх нийтийн тоон бичгийн ур чадварыг зөвхөн “ашиглах чадвар” гэж бус, өгөгдлийн гарал үүсэл, найдвартай байдал, хязгаарлалтыг ойлгох “өгөгдлийн шүүлтүүр”-тэй хослуулах хэрэгцээг бий болгож байна. Ялангуяа төрийн үйлчилгээ, боловсрол, хөдөлмөрийн зах зээлд хиймэл оюуны гаралт буруу эсвэл ялгавартай байж болзошгүйг таних иргэний чадвар чухал.

## 5. Хүний нөөц ба институцийн тогтвортой байдлын сорилт

Ахисан түвшний ур чадварын бодит хэрэгжилт нь багш, сургагч, төрийн албан хаагч, бодлого боловсруулагчийн чадавхаас шууд шалтгаална. НҮБХХ-ийн үнэлгээнд STEM боловсрол, техникийн сургалтын чанар, мэргэжлийн боловсон хүчний хомсдол, гадагшлах урсгал нь хиймэл оюуны экосистемийн гол саад гэж дүгнэжээ [3]. Энэ нь зөвхөн инженерүүдийн асуудал биш бөгөөд сургалтын хөтөлбөр зохиогч, дата менежер, төрийн үйлчилгээний ажилтан, хэвлэл мэдээллийн салбарынхан хүртэл шинэ ур чадвар шаардаж байна.

Азийн хөгжлийн банкны тайланд ч төрийн байгууллагуудын дижитал шилжилтэд процессын шинэчлэл, кибер аюулгүй байдал, дасан зохицох ур чадвар дутагдаж байгааг онцолсон [5]. Иймд бүх нийтийн тоон бичгийн ур чадварын бодлого нь “иргэдэд сургалт өгөх” түвшнээс давж, байгууллагын чадавх, салбар хоорондын уялдаа, багш бэлтгэх, насан туршийн боловсролын санхүүжилттэй холбогдох ёстой.



3-р зураг Цахим ур чадварын нэгтгэсэн үнэлгээ

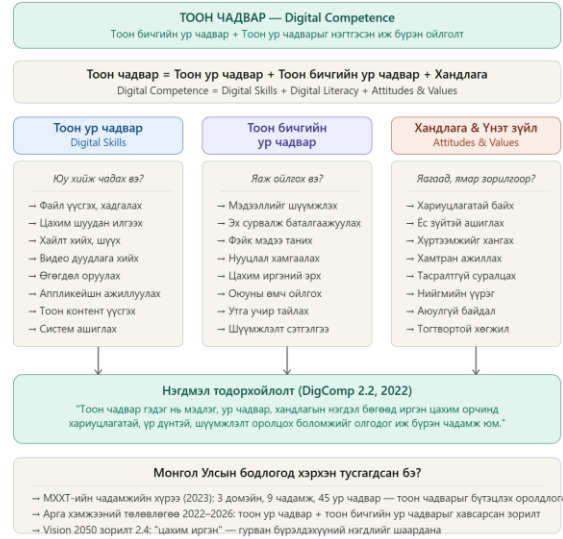
**6. Хүртээмжтэй бодлогын зарчим, тэргүүлэх чиглэл**

Хиймэл оюун, өгөгдөлд суурилсан хөгжлийн бодлого нь жендер, хөгжлийн бэрхшээл, орон нутгийн ялгаа, орлогын түвшин, хэлний хүртээмж зэрэг нийгмийн ялгаатай нөхцөлийг харгалзан үзэхгүй тохиолдолд тоон ялгарал, оролцооны тэгш бус байдлыг улам гүнзгийрүүлэх эрсдэлтэй. Иймд бүх нийтийн тоон бичгийн ур чадварыг хөгжүүлэх бодлого нь технологийн хүртээмжийг нэмэгдүүлэхээс гадна хүн төвтэй дизайн, эмзэг бүлгийн оролцоо, монгол хэл дээрх агуулгын хүртээмж, туслах технологийн хэрэглээ, бүсчилсэн сургалтын уян хатан загварыг цогцоор нь хамарсан байх шаардлагатай. Ялангуяа орон нутгийн интернэтийн хүртээмжийн хязгаарлалт, эмэгтэйчүүдийн дижитал оролцооны ялгаа, төлөөлөл муутай өгөгдлийн асуудал нь хиймэл оюун, их өгөгдлийн үр өгөөжийг бүх нийтэд тэгш хүртээхэд саад болж буй тул эдгээрийг бодлогын түвшинд системтэй авч үзэх нь зүйтэй.

Энэ үндсэн дээр бодлогын тэргүүлэх чиглэлийг тоон бичгийн ур чадварын үндэсний хүрээг шинэчлэн тодорхойлох, боловсролын түвшин хоорондын залгамж холбоотой агуулгын матриц бүрдүүлэх, зорилтот бүлэг бүрийн хэрэгцээнд нийцсэн модуль сургалтыг өргөжүүлэх, өгөгдлийн чанар, кибер аюулгүй байдал, хувийн мэдээлэл хамгааллыг сургалтын агуулгатай уялдуулах, мөн хүртээмжтэй сургалтын механизмыг тусгайлан санхүүжүүлэх чиглэлээр тодорхойлж болно. Үүнийг хэрэгжүүлэхдээ сургалтын агуулгын шинэчлэл, багш болон төрийн албан хаагчийн давтан сургалт, өгөгдлийн засаглалын стандарт, орон нутгийн дэд бүтцийн дэмжлэгийг харилцан уялдаатайгаар хэрэгжүүлэх шаардлагатай. Түүнчлэн бодлогын үр дүнг зөвхөн хамрагдалтын тоон үзүүлэлтээр бус, өгөгдөлтэй ажиллах чадвар, эх сурвалжийг шүүн

үнэлэх дадал, хиймэл оюуны хэрэгслийг хариуцлагатай ашиглах түвшнээр үнэлэх нь илүү үндэслэлтэй юм.

**ДҮГНЭЛТ**



Эх сурвалж: Vuorikari et al. (2022) DigComp 2.2; Ferrari (2012) DIGCOMP хүрээний анхны загвар

**4-р зураг. Монгол Улсын нөхцөлд тохирсон тоон бичгийн ур чадварын дөрвөн шаталсан загвар, нэгдмэл тодорхойлолт**

Их өгөгдөл ба хиймэл оюуны эрин үед бүх нийтийн тоон бичгийн ур чадвар нь төхөөрөмж ашиглах энгийн чадвараас давж, өгөгдлийг тайлбарлах, хиймэл оюуныг шүүн хэрэглэх, ёс зүйн эрсдэлийг ойлгох, иргэний хариуцлагатай оролцоог багтаасан нийлмэл чадавх болж өөрчлөгджээ. Монгол Улсад бодлогын суурь баримт бичиг, дижитал шилжилтийн институт, нээлттэй боловсролын сан, цахим үйлчилгээний экосистем бүрэлдэж байгаа ч хүртээмж, ахисан ур чадвар, өгөгдлийн чанар, мэргэжилтний тогтвортой байдал зэрэг асуудал бодит ахицыг сааруулж байна.

Иймээс бүх нийтийн тоон бичгийн ур чадварыг улс орны дижитал тусгаар тогтнол, боловсролын чанар, хөдөлмөрийн бүтээмж, иргэний эрхийн асуудалтай холбож авч үзэх шаардлагатай. Цаашдын судалгаанд зорилтот бүлэг тус бүрийн ур чадварын түвшинг эмпирик аргаар хэмжих, хөтөлбөрийн нөлөөллийн үнэлгээ хийх нь оновчтой.

**АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ**

[1] Монгол Улсын Их Хурал, “Алсын хараа-2050” Монгол Улсын урт хугацааны хөгжлийн бодлого, Улаанбаатар, 2020.  
 [2] ЮНЕСКО, Монгол улсын боловсролын салбар дахь мэдээлэл, харилцаа холбооны технологийн бодлогын тойм шинжилгээ, Улаанбаатар, 2021.  
 [3] Ministry of Digital Development, Innovation and Communications & UNDP, Artificial Intelligence Landscape Assessment of Mongolia, Ulaanbaatar, 2025.

- [4] IRIM, Цахим ил тод байдлын индекс 2024: Төрийн байгууллагын цахим хуудасны ил тод байдлын мониторингийн тайлан, Улаанбаатар, 2024.
- [5] Asian Development Bank, Mongolia: e-Government and Digital Transformation, Technical Assistance Report, Manila, 2022.
- [6] Access Solutions LLC, Mongolia in the Digital Age: Digital Readiness Assessment Final Draft, Ulaanbaatar, он тодорхойгүй.
- [7] Г.Цэрэнжаргал, Г.Нямхүү, Б.Лхагвадолгор, "Төрийн албан хаагчдын цахим засаглалын шилжилт дэх бэлэн байдлын үнэлгээний зарим асуудал," eNATION ICT100 хурлын эмхэтгэл, ШУТИС, 2021.
- [9] A. Ferrari, DIGCOMP: A Framework for Developing and Understanding Digital Competence in Europe, Joint Research Centre, European Commission, Sevilla, 2012.
- [10] UNESCO, Digital Literacy Global Framework (DLGF), UNESCO Institute for Statistics, Paris, 2018.
- [11] J. van Dijk, The Digital Divide, Polity Press, Cambridge, 2020.
- [12] ITU, Digital Skills Assessment Guidebook, International Telecommunication Union, Geneva, 2020.
- [13] ҮСХ, Өрхийн болон хувь хүний мэдээлэл, харилцаа холбоо, технологийн хэрэглээ, Улаанбаатар, 2021.
- [14] NSO, National Digital Skills Survey Results, National Statistics Office of Mongolia, Ulaanbaatar, 2023.

# НАРНЫ ХАВТАНГИЙН ГАДАРГУУ ЦЭВЭРЛЭХ АЛСЫН УДИРДЛАГАТАЙ РОБОТ СИСТЕМИЙН СУДАЛГАА, ХӨГЖҮҮЛЭЛТ

Лхагвасүрэнгийн АНУЖИН<sup>1</sup>, Энхбаатарын СУМБЯАБАЗАР<sup>2</sup>, Баатарын ЗОРИГТБААТАР<sup>3</sup>, Найманнаран  
ЧУЛУУНБАНДИ<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Электроникийн тэнхим

<sup>4</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Холбооны инженерчлэлийн  
ТЭНХИМ

*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: anujin.l@mobicom.mn<sup>1</sup>*

**Хураангуй:** Энэхүү судалгааны ажлаар алслагдсан бүс нутагт байрлах нарны эрчим хүчинд суурилсан системд нарны хавтангийн гадаргуугийн бохирдол, сүүдэрлэлт, халхлалтын нөлөөг үнэлэх зорилгоор нарны хавтан цэвэрлэгч роботын хэрэглээний үндэслэлийг судлав. Судалгаанд системийн математик загварчлал, хэмжилтэд суурилсан туршилтын шинжилгээ, харьцуулсан үнэлгээний аргуудыг ашигласан болно. Мөн нарны хавтанг хэсэгчлэн сүүдэрлэн (гуравдагч биетийн сүүдэр туссан), хэсэгчлэн халхалсан (гадаргуу дээр гэрэл тусах боломжгүй болгон халхалсан) нөхцөлд гаралтын хүчдэлийн өөрчлөлтийг туршилтаар хэмжиж, мөн 2026 оны 3 дугаар сарын 1-ний өдрийн 09:00 цагаас эхлэн 530 цагийн турш тасралтгүй мониторинг хийж үзлээ. Үр дүнгээс харахад энгийн сүүдэрлэлт нь хүчдэлийг аажмаар бууруулдаг бол цас тогтсон мэт халхлалт нь хүчдэлийг огцом бууруулдаг байна. Урт хугацааны мониторингийн өгөгдөлд өдөр-шөнийн мөчлөгөөс гадна өдрийн ажиллах үеийн хүчдэлийн түвшин хугацааны явцад буурч, дараа нь эргэн сэргэсэн хандлага ажиглагдсан нь хавтангийн гадаргуугийн бохирдол, халхлалт, цэвэрлэгээний нөлөөг илтгэж байна. Иймээс гаралтын хүчдэлийн урт хугацааны өөрчлөлтөд үндэслэн, бохирдлын индексийг тодорхойлон гаргаж, уг индексийн үзүүлэлтээр робот цэвэрлэгээ эхлүүлэх шалгуур болгон ашиглах боломжтой гэж дүгнэв.

**Түлхүүр үг:** бүлэг, нарны хавтан, цэвэрлэгч робот, алсын хяналт, математик загварчлал, эрчим хүчний баланс, үүрэн холбооны суурь станц

## I. ОРШИЛ

Сүүлийн жилүүдэд Монгол Улсад сэргээгдэх эрчим хүчний хэрэглээ, тэр дундаа нарны эрчим хүчний ашиглалт эрчимтэй нэмэгдэж байна. Монгол Улсад сэргээгдэх эрчим хүч ашиглах эрх зүйн болон бодлогын орчин бүрдсэн бөгөөд 2030 он гэхэд сэргээгдэх эрчим хүчний эзлэх хэмжээг 30 хувьд хүргэх зорилт дэвшүүлсэн байна [21]–[23]. Нарны эрчим хүч нь төвлөрсөн цахилгаан сүлжээнээс алслагдсан бүс нутагт эрчим хүчний хүртээмжийг нэмэгдүүлэх, дизель генераторын хэрэглээг бууруулах, ашиглалтын зардлыг багасгах стратегийн ач холбогдолтой эх үүсвэр бөгөөд ялангуяа үүрэн холбооны суурь станц, хяналтын байгууламж, алслагдсан техникийн зангилаануудын хувьд нарны эрчим хүч нь бие даасан тэжээлийн чухал эх үүсвэр болдог [24], [26]. Гэвч нарны хавтангийн гадаргуу дээр тоос, шороо, цас, мөс, бохирдол хуримтлагдах, эсвэл ойролцоох биетийн сүүдэр тусах нь фотоцахилгаан хувиргалтын үр ашигт сөргөөр нөлөөлдөг[1][2]. Үүний улмаас үйлдвэрлэлийн чадал буурч, зай хураагуурын цэнэг хангалтгүй болох, улмаар үүрэн холбооны суурь станцын тэжээлийн систем доголдох эрсдэл нэмэгддэг. Иймд нарны хавтанг тогтмол цэвэрлэх, цэвэрлэгээний үйл ажиллагааг автоматжуулах, шаардлагатай үед алсын зайнаас удирдах систем бий болгох нь чухал асуудал болж байна[3][4]

Ялангуяа алслагдсан үүрэн холбооны станцуудын хувьд эрчим хүчний тасалдал нь зөвхөн техникийн бус, харилцаа холбооны үйлчилгээний чанарт шууд нөлөөлөх асуудал болдог. Үүрэн холбооны нэгэн

оператор компанийн **50 суурь станцад** 2025 оны 12 дугаар сарын хугацаанд нарны батарейн цэнэг дууссанаас шалтгаалсан **270 удаагийн, нийт 1954.47 цагийн доголдол** бүртгэгдсэн нь энэхүү асуудлын бодит ач холбогдлыг харуулж байна.

Ийм нөхцөлд нарны хавтангийн гадаргуугийн бохирдол, цасжилт, хэсэгчилсэн халхлалтын нөлөөг эрт илрүүлэх, алсын зайнаас хянах, шаардлагатай үед робот ашиглан цэвэрлэх систем боловсруулах нь практик ач холбогдолтой юм. Энэхүү өгүүллийн зорилго нь алсын хяналт, удирдлагад суурилсан нарны хавтан цэвэрлэгч роботын судалгааны онолын үндэс, хүчдэлд суурилсан математик загвар, бодит туршилтын үр дүнг нэгтгэн танилцуулахад оршино.

Монгол орны нөхцөлд тархмал нарны эрчим хүчний системийг хэрэглээнд нэвтрүүлэх, бие даасан нарны системийн бүтцийг оновчлох, мөн нарны хавтангийн туршилтын үзүүлэлтүүдийг үнэлэх чиглэлээр тодорхой судалгаанууд хийгдсэн байна [24], [25], [27]. Мөн сэргээгдэх эрчим хүчний хэрэглээ нь тогтвортой хөгжлийн бодлого, эрчим хүчний хүртээмжтэй нягт холбоотой болохыг дотоодын судалгаанд онцолсон байдаг [26]. Эдгээр ажлууд нь манай судалгааны хэрэглээний орчин, практик ач холбогдлыг тодорхойлоход чухал суурь болж байна.

**II. СИСТЕМИЙН МАТЕМАТИК ЗАГВАРЫН  
ЕРӨНХИЙ ТОДОРХОЙЛОЛТ**

*A. Нарны хавтангийн чадлын математик загвар*

Нарны хавтангийн тухайн агшинд гаргаж буй чадлыг ерөнхий байдлаар дараах илэрхийллээр тодорхойлж болно.

$$P(t) = G(t) \times A \times \eta(t) \quad (1)$$

Энд  $G(t)$  нь нарны цацрагийн нягтрал,  $A$  нь хавтангийн талбай,  $\eta(t)$  нь хугацааны функц хэлбэртэй үр ашиг болно.

Бодит хэмжилтийн нөхцөлд гаралтын чадлыг хүчдэл ба гүйдлийн үржвэрээр тодорхойлно.

$$P(t) = V(t) \times I(t) \quad (2)$$

Энэ нь, онолын загвар болон туршилтын үр дүнг харьцуулан үнэлэх боломжийг олгоно. Нарны хавтангийн үр ашиг нь зөвхөн цацрагийн нягтралаас гадна температур, тусах өнцөг, бохирдлын түвшин зэрэг хүчин зүйлсээс хамаарч өөрчлөгдөнө.

*B. Бохирдлын математик загвар*

Нарны хавтангийн гадаргуугийн бохирдлыг шууд чадлаар бус, хүчдэлийн төлөвөөр үнэлэхийн тулд эмпирик бохирдлын индексийг дараах байдлаар тодорхойлов.

$$S(t) = 1 - V_d(t) / V_{ref} \quad (3)$$

Энд:

$S(t)$  – бохирдлын индекс  
 $V_d(t)$  – тухайн агшин дах гаралтын хүчдэл  
 $V_{ref}$  – цэвэр, хэвийн үеийн хүчдэл

Энэхүү судалгаанд  $V_{ref}$  хүчдэлийн утгыг туршилтад ашигласан хавтангийн задгай хэлхээний гаралт болох 24.98 В гэж авсан.

Хэрэв бохирдол хугацааны явцад аажмаар хуримтлагдана гэж үзвэл түүнийг ерөнхийд нь дараах экспоненциал хуулиар загварчилж болно.

$$S(t) = 1 - e^{(-kt)} \quad (4)$$

Энд  $k$  нь бохирдлын хуримтлалын коэффициент юм.

Практикт бохирдлын нөлөө нь зөвхөн тоосжилтоос бус цасжилт, халхлалт, орчны нөлөөллөөс хамаардаг тул энэхүү индексийг туршилтын өгөгдөл дээр тулгуурлан засварлах шаардлагатай.

*C. Хүчдэлийн бууралтад суурилсан үнэлгээ*

Гаралтын хүчдэлийн харьцангуй өөрчлөлтийг үнэлэхийн тулд дараах коэффициентийг ашиглав.

$$K_v = V / V_{ref} \quad (5)$$

Мөн хүчдэлийн бууралтын хувийг дараах байдлаар тодорхойлов.

$$D_v = (V_{ref} - V) / V_{ref} \times 100\% \quad (6)$$

Эдгээр үзүүлэлт нь гүйдэл хэмжигдээгүй нөхцөлд хавтангийн ажиллагааны доройтлыг харьцангуй байдлаар үнэлэх боломж олгоно.

**III. ХЭМЖИЛТ БА ҮР ДҮН**

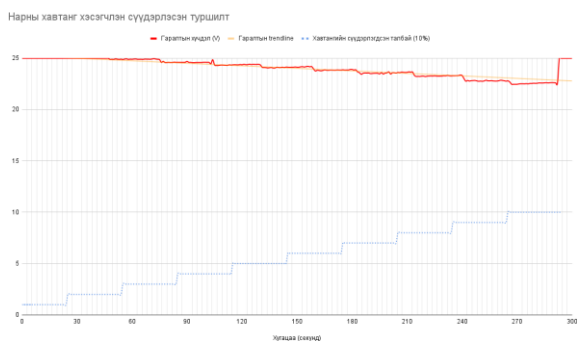
*A. Хэсэгчлэн сүүдэрлэлттэй туршилт*

Хавтангийн сүүдэрлэгдсэн талбайг 10 хувиас 100 хувь хүртэл нэмэгдүүлж, гаралтын хүчдэлийг хэмжив. Туршилтын дундаж үр дүнгээс харахад сүүдэрлэгдсэн талбай нэмэгдэхийн хэрээр гаралтын хүчдэл аажмаар буурсан. Сүүдэрлэлтийн хувь болон гаралтын хүчдэлийг  $V_{ref}$  24.98В утгатай харьцуулан Хүснэгт 1 -д үзүүлэв.

Сүүдэрлэлт (%)	Дундаж хүчдэл (В)	Хүчдэлийн бууралт (%)
10	24.98	0.00
20	24.96	0.09
30	24.80	0.73
40	24.49	1.95
50	24.23	3.00
60	23.97	4.05
70	23.62	5.45
80	23.36	6.48
90	22.90	8.35
100	22.71	9.08

Хүснэгт 1. НАРНЫ ХАВТАНГИЙН ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ҮЙЛДВЭРЛЭЛД СҮҮДЭРЛЭЛТИЙН ҮЗҮҮЛЭХ НӨЛӨӨЛЛИЙГ ХЭМЖСЭН ХЭМЖИЛТИЙН ҮР ДҮН

Хавтангийн сүүдэрлэгдсэн талбайг 10 хувиас 100 хувь хүртэл өсгөж гаралтын хүчдэлийг хэмжив. Туршилтын дундаж үр дүнгээс харахад сүүдэрлэлт ихсэхийн хэрээр хүчдэл аажмаар буурч байсан. Энэ нь хэсэгчилсэн сүүдэрлэлт нь хавтангийн гаралтад нөлөөлөх боловч хүчдэлийн өөрчлөлт харьцангуй аажуу, шаталсан шинжтэй байгааг Зураг 1 -т үзүүлсэн үр дүн илтгэж байна.



Зураг 1. Нарны хавтанг хэсэгчлэн сүүдэрлэсэн туршилтын үр дүн

**В. Хэсэгчлэн халхалсан туршилт**

Хавтангийн гадаргууг хэсэгчлэн халхалж, үүнийг цас тогтсон нөхцөлтэй дүйцүүлэн авч үзсэн туршилтаар гаралтын хүчдэл илүү огцом буурсан.

Халхлалтын хувь болон гаралтын хүчдэлийг  $V_{ref}$  24.98 В утгатай харьцуулан Хүснэгт 2 -г үзүүлэв.

Халхлалт (%)	Дундаж хүчдэл (В)	Хүчдэлийн бууралт (%)
10	24.43	2.20
20	9.61	61.55
30	7.76	68.95
40	8.04	67.80
50	5.63	77.48
60	4.68	81.28
70	3.54	85.83
80	3.07	87.71
90	4.49	82.01
100	4.58	81.69

Хүснэгт 2. НАРНЫ ХАВТАНГИЙН ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ҮЙЛДВЭРЛЭЛД ХАЛХЛАЛТЫН ҮЗҮҮЛЭХ НӨЛӨӨЛЛИЙГ ХЭМЖСЭН ХЭМЖИЛТИЙН ҮР ДҮН



Зураг 2. Нарны хавтанг хэсэгчлэн халхалсан туршилтын үр дүн

Эндээс харахад хавтангийн гадаргууг цас тогтсон мэтээр халхлах үед хүчдэл маш хурдан буурч байгаа нь ажиглагдсан. Ялангуяа 20 хувийн халхлалтаас эхлэн хүчдэлийн утга огцом унаж, системийн хэвийн ажиллагаанд ноцтой нөлөөлөх түвшинд хүрсэн ба 80–100 хувийн халхлалтын үед гаралтын хүчдэл 3–5 В орчимд хэлбэлзэж байгаа нь хавтангийн ашигтай ажиллагаа бараг алдагдсан гэж үзэх үндэслэлтэй.

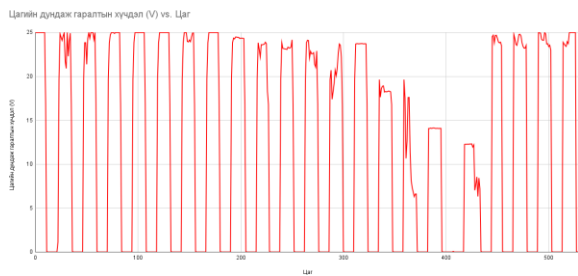
Мөн 40 хувь, 90 хувь, 100 хувийн үед хүчдэлийн утга өмнөх үе шаттай харьцуулахад бага зэрэг өссөн хэлбэлзэл ажиглагдсан. Энэ нь туршилтын үед орчны гэрлийн өөрчлөлт, хэмжилтийн тогтворжилт, хавтангийн дотоод хэлхээ, bypass диодын нөлөө зэрэг хүчин зүйлтэй холбоотой байж болно. Иймээс халхлалтын нөлөө нь шугаман бус шинжтэй болох нь харагдаж байна.

Хоёр туршилтын үр дүнг харьцуулахад хавтангийн гадаргуу дээр үүсэх энгийн сүүдэрлэлт болон шууд халхлалтын нөлөө хоорондоо мэдэгдэхүйц ялгаатай байв. Сүүдэрлэлттэй туршилтад 100 хувь хүртэл сүүдэрлэсэн үед ч дундаж хүчдэл 22.71 В байсан бөгөөд энэ нь анхны 24.98 В утгаас ойролцоогоор 9.08 хувиар буурсан үзүүлэлт юм. Харин халхлалтын туршилтад 20 хувийн халхлалтаас эхлэн хүчдэл 9.61 В хүртэл буурч, 60–100 хувийн үед 3–5 В орчимд хүрч огцом унасан байна.

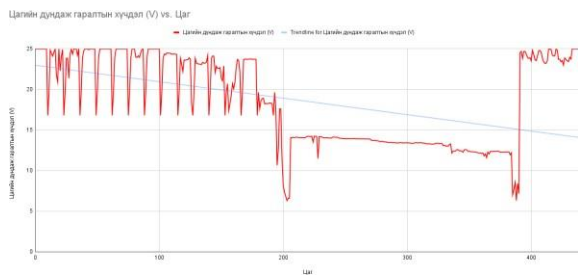
Иймээс нарны хавтангийн ажиллагаанд саад болж буй хүчин зүйл нь зөвхөн сүүдэр үүсгэж байгаа эсэхээс гадна хавтангийн гадаргууг гэрэл нэвтрүүлэхгүйгээр шууд халхалж байгаа эсэхээс ихээхэн хамаарч байна. Энэ нь цас, мөс, зузаан тоосон бүрхүүл зэрэг бохирдол нь энгийн сүүдэрлэлтээс хавьгүй аюултай болохыг харуулж байна. Бохирдол нэмэгдэхэд хавтангийн үр ашиг буурна гэж үзэх нь өмнөх судалгааны үр дүнтэй нийцэж байна [1][4].

**С. Урт хугацааны хэмжилт**

Нарны хавтангийн гаралтын хүчдэлийг 2026 оны 3 дугаар сарын 1-ний өдрийн 09:00 цагаас эхлэн 530 цагийн турш тасралтгүй хэмжиж, бохирдол болон бусад гадны нөлөөг үнэлэв. Хэмжилтийн өгөгдөлд өдөр-шөнийн мөчлөг тодорхой ажиглагдсан (Зураг 3). Шөнийн үед хүчдэл бараг 0 В орчимд хүрч байсан бол өдрийн идэвхтэй хугацаанд 24.98 В хүртэл өсөж байв. Иймээс бохирдлын үнэлгээг бүх өгөгдөл дээр бус, зөвхөн өдрийн ажиллах үеийн хүчдэлийн түвшинд (Зураг 4) үндэслэн хийсэн.



Зураг 3. Нарны хавтангийн гаралтыг 530 цаг хэмжсэн үр дүн



Зураг 4. Нартай байх үеийн хэмжилтийг ялгасан байдал

Шинжилгээний үр дүнгээс харахад хэмжилтийн эхний хэсэгт өдрийн гаралтын хүчдэл 24.8–24.98 В орчим тогтвортой байсан бол дунд үеэс эхлэн 23 В, 18 В, цаашлаад 6–14 В хүртэл буурсан хэсгүүд ажиглагдсан нь хавтангийн гадаргуу дээр бохирдол, цасжилт, эсвэл хэсэгчилсэн халхлалт нэмэгдсэнийг илтгэж байна. Харин хэмжилтийн төгсгөлийн хэсэгт хавтанг цэвэрлэснээр хүчдэл дахин 24.5–24.98 В орчимд хүрч сэргэсэн.

Иймээс 530 цагийн хэмжилтийн үр дүн нь хавтангийн гадаргуугийн төлөв болон гаралтын хүчдэлийн хооронд шууд хамаарал байгааг харуулж байна.

Урт хугацааны өгөгдөлд үндэслэн бохирдлын индексийг өдрийн төлөөлөх хүчдэлээр илэрхийлж болно.

$$S(t) = 1 - Vd(t) / 24.98 \quad (7)$$

Энд  $Vd(t)$  нь тухайн өдрийн идэвхтэй хугацааны төлөөлөх хүчдэл юм.

Хэмжилтийн үр дүнгээс харахад бохирдлын индексийн өөрчлөлтийг ерөнхийд нь дараах 3 үе шаттайгаар авч үзэж болно.

Нэгдүгээр үе шат – эхний тогтвортой үе:

Хэмжилтийн эхний хэсэгт хүчдэл хэвийн байсан тул бохирдлын индекс бага,  $S(t) \approx 0$ .

Хоёрдугаар үе шат – бууралтын үе: Хугацааны дунд хэсэгт өдрийн гаралтын хүчдэл буурсан тул  $S(t)$  өсөж, хавтангийн ажиллагаа доройтсон.

Гуравдугаар үе шат – сэргэлтийн үе: Хэмжилтийн төгсгөлд цэвэрлэсний дараа хүчдэл хэвийн түвшинд дөхөн сэргэсэн тул  $S(t)$  буурсан.

Иймээс энэхүү өгөгдөлд тохирсон хэсэгчилсэн эмпирик загварыг дараах байдлаар санал болгож болно.

- $S(t) = 0$ , тогтвортой цэвэр үе
- $S(t) = a + bt$ , бохирдол нэмэгдэх үе
- $S(t) = S_{max} - c(t - tr)$ , цэвэрлэсний дараах үе

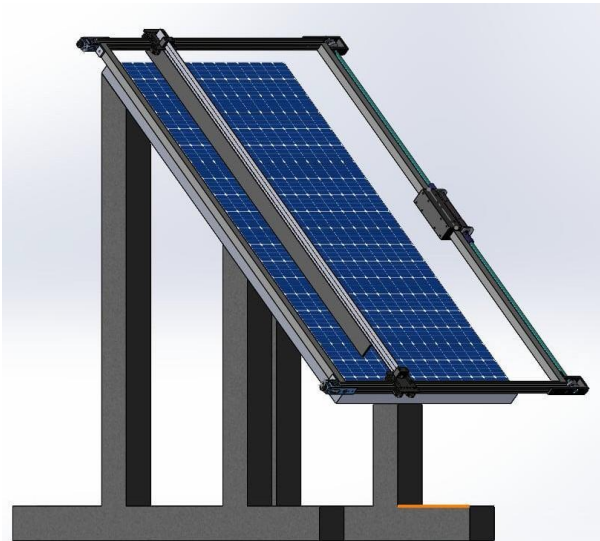
Энд:

- $a, b$  – бохирдлын өсөлтийн параметрууд
- $c$  – сэргэлтийн коэффициент
- $tr$  – сэргэлт эхэлсэн хугацаа
- $S_{max}$  – хамгийн их бохирдлын индекс

Энэхүү загвар нь робот цэвэрлэгээ эхлүүлэх босго нөхцөлийг тодорхойлоход ашиглагдаж болно. Жишээлбэл,  $S(t)$  нь тодорхой шугаман босго утгаас их болсон үед хавтанг цэвэрлэх команд өгч болно.

#### IV. ЦЭВЭРЛЭГЧ РОБОТЫН МЕХАНИК ХИЙЦИЙН ЗАГВАР

Нарны хавтан цэвэрлэгч роботын механик хийцийг ремен дамжуургад суурилсан шүүрэн системийн зарчмаар боловсруулав. Системийн үндсэн хийц нь нарны хавтангийн гадна хүрээг дагуулан байрласан тэгш өнцөгт рам, рамын хоёр хажуу талд байрлах ремен дамжуурга, рамын голын хэсэгт суурилагдсан хөдөлгүүр, мөн рементэй харьцан шилжих хөндлөн ачаанаас (шүүр) бүрдэнэ. Ийм зохион байгуулалт нь хавтангийн гадаргууг бүхэлд нь хамруулан цэвэрлэх, хөдөлгөөнийг чиглүүлэн тогтворжуулах, мөн бүтцийн жинг харьцангуй бага байлгах давуу талтай. Ийм төрлийн усгүй болон механик шүүрэн цэвэрлэгээний шийдлүүд нь ус хомс бүс нутагт тохиромжтой бөгөөд роботжуулсан цэвэрлэгээний системийн нийтлэг хөгжүүлэлтийн чиглэлд тооцогддог [6], [7], [10]–[13].



Зураг 5. Алсын хяналт, удирдлагатай нарны хавтан цэвэрлэгч роботын ерөнхий механик хийц

Механик ажиллагааны үндсэн зарчим нь дараах байдалтай. Рамны голын хэсэгт байрлах мотор нь дамжуулах голоор дамжин хөндлөн тэнхлэгийн хоёр үзүүрт байрлах араануудыг эргүүлнэ. Эдгээр араа нь тус бүр рементэй шүдэн холбоогоор харьцаж, хоёр талын ременийг синхрон хөдөлгөөнд оруулна. Ременүүдтэй холбогдсон шүүр нь рамын дагуу урагш, хойш шилжин хөдөлснөөр нарны хавтангийн гадаргууг арчиж цэвэрлэнэ. Ремен болон track-based хөдөлгөөний системийн хувьд налуу болон нойтон гадаргуу дээрх гулсалт, хөдөлгөөний тогтвортой байдал, шүүрний чичиргээ зэрэг нь механик хийцийн чухал асуудал болдог [14]–[16]. Иймээс энэхүү судалгаанд хоёр талын симметр ремен дамжуулга, төвлөрсөн моторын байрлал, шүүрний тогтвортой хөдөлгөөнийг хангах хийцийг сонгосон.

Механик тооцоонд арааны шүдний тоо 20, ремений алхам 0.002 м, моторын эргэлтийн хурд 296 rpm, carriage-ийн масс 0.5 кг, үрэлтийн коэффициент 0.15, шүүрний эсэргүүцлийн хүч 3 Н, хурдатгал 0.1 м/с<sup>2</sup>, хавтангийн налуу өнцөг 45° гэж авч үзсэн. Эдгээрээс шүүрний шугаман хурд

$$v = (z \cdot p \cdot N) / 60 \quad (8)$$

хамаарлаар 0.197 м/с гэж тодорхойлогдсон. Энэ нь шүүр хавтангийн гадаргуу дээгүүр дунджаар секундэд 0.197 м хурдтай шилжих боломжтойг харуулж байна.

Цэвэрлэгээний хөдөлгөөний хугацааг замын урт ба шугаман хурдаар үнэлэхэд 0.58 м замыг 2.94 с, 1.1 м замыг 5.58 с хугацаанд туулах боломжтой гэж гарсан. Өөрөөр хэлбэл уртын дагуух хөдөлгөөн нь хөндлөн чиглэлийн хөдөлгөөнөөс ойролцоогоор 1.9 дахин удаан байна. Энэ нь рамын налуу дагуух хөдөлгөөнд ажлын цикл уртсах, түүнчлэн хөдөлгүүрт илүү их ачаалал үүсэхийг илтгэнэ.

Хэвтээ чиглэл дэх хөдөлгөөнд шаардлагатай нийт хүчийг инерц, үрэлт болон шүүрний эсэргүүцлийн нийлбэрээр тооцоход 3.79 Н, харгалзах момент 0.024 Н·м, механик чадал 0.75 Вт гарсан. Энэ нь хэвтээ чиглэл дэх шилжилт тогтвортой, ачаалал багатай, энергийн хувьд харьцангуй үр ашигтай болохыг харуулж байна. Харин 45° налуу дагуу дээш хөдөлгөөн хийх үед хүндийн хүчний бүрэлдэхүүн нэмэгдэж нийт хүч 7.04 Н, момент 0.045 Н·м, чадал 1.38 Вт болж өссөн. Доош чиглэлд эсрэгээрээ шаардагдах хүч 0.10 Н орчим болж буурч, хөдөлгөөн бараг чөлөөтэй шинжтэй болсон байна.

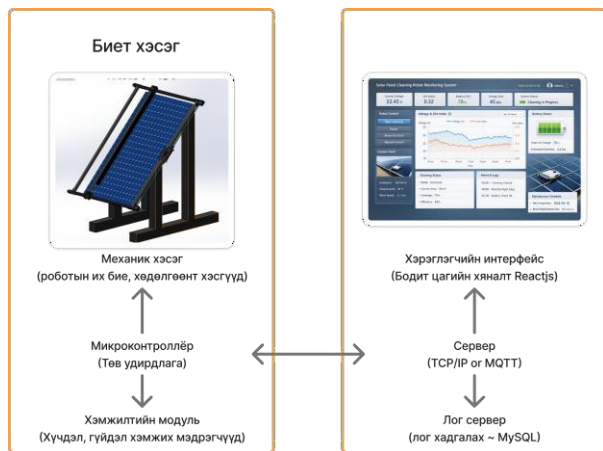
Эдгээр үр дүнгээс харахад механик хийцийн хамгийн ачаалалтай горим нь налуу гадаргуугаар дээш чиглэсэн цэвэрлэгээний хөдөлгөөн байна. Иймээс хөдөлгүүр сонголт, ремений суналт, хязгаар мэдрэгчийн байрлал, удирдлагын алгоритм зэргийг энэ горимоор үндэслэн тооцох нь зүйтэй. Харин хэвтээ чиглэлийн шилжилт нь бага хүч шаарддаг, хурдан гүйцэтгэгддэг, тогтвортой ажиллагаатай тул механик болон энергийн хувьд илүү ашигтай гэж үзэж болно.

Иймд ремен дамжуургат шүүрэн систем бүхий энэхүү механик хийц нь нарны хавтангийн гадаргууг бүхэлд нь хамруулан цэвэрлэхэд тохиромжтой, бүтэц энгийн, дамжуулгын хувьд найдвартай, алслагдсан хэрэглээнд хэрэгжүүлэх боломж зэргээрээ өмнөх робот цэвэрлэгээний судалгаануудтай нийцэж байгаа [11]–[16] тул цаашд бодит загвар болон туршилтын системд хэрэгжүүлэх боломжтой инженерийн шийдэл гэж дүгнэв.

## V. АЛСЫН ХЯНАЛТ, УДИРДЛАГЫН СИСТЕМ ИЙН АРХИТЕКТУР

Нарны хавтан цэвэрлэгч роботын алсын хяналт, удирдлагын системийн архитектур нь механик хэсэг, хэмжилтийн модуль, төв удирдлагын микроконтроллер, холбооны сервер, лог хадгалах сан, хэрэглэгчийн интерфейс гэсэн үндсэн давхаргуудаас бүрдэнэ. Сүүлийн үеийн PV (photovoltaic) мониторинг системийн судалгаануудад бодит цагийн өгөгдөл цуглуулах, алсын хяналт, түүхэн өгөгдөл хадгалах, бохирдол илрүүлэх, цэвэрлэгээний шийдвэр гаргалтыг нэгтгэсэн IoT суурьтай архитектур өргөн хэрэглэгдэж байна [17]–[19]. Энэхүү архитектурын зорилго нь нарны хавтангийн гаралтын төлөв, роботын ажиллагаа, цэвэрлэгээний процесс, алдааны мэдээллийг бодит цагт хянах, шаардлагатай үед алсаас команд өгөх, мөн системийн түүхэн өгөгдлийг хадгалж дараагийн шийдвэр гаргалтад ашиглахад оршино. Алсын хяналт, удирдлагын систем нь газар зүйн хувьд алслагдсан объект, төхөөрөмжийн ажиллагааг холбооны сүлжээгээр дамжуулан хянах, удирдах, төлөв байдлыг үнэлэх цогц систем бөгөөд бодит цагийн мониторинг, удирдлагын команд дамжуулалт, өгөгдөл хадгалалт,

алдааны мэдэгдлийн механизмуудаас бүрддэг гэсэн ерөнхий ойлголттой нийцэж байна.



Зураг . Алсын хяналт, удирдлагатай нарны хавтан цэвэрлэгч роботын системийн ерөнхий архитектур

Систем ерөнхийдөө гурван үндсэн ажиллагааны нөхцөлд ажиллана. Эхнийх нь тогтсон цагийн цэвэрлэгээний горим юм. Энэ горимд робот урьдчилан өгөгдсөн хуваарь, цагийн төлөвлөгөөний дагуу автоматаар ажиллана. Тогтсон цагийн горимын давуу тал нь хэрэгжүүлэхэд хялбар, алгоритмын хувьд энгийн бөгөөд бохирдлын мэдрэгчийн нарийвчилсан дүгнэлт шаардахгүй. Гэвч шаардлагагүй үед цэвэрлэгээ хийх эрсдэлтэй тул эрчим хүчний хэрэглээ болон механик элэгдлийг нэмэгдүүлж болно.

Хоёр дахь нь ээлжийн инженерийн алсын командын горим юм. Энэ нөхцөлд оператор веб интерфэйсээр дамжуулан системийн төлөвийг бодит цагт ажиглаж, шаардлагатай үед роботод шууд команд өгнө. Энэхүү горим нь туршилтын шатанд, эсвэл онцгой нөхцөл үүссэн үед хүний туршлага, шийдвэрт тулгуурлан уян хатан удирдлага хэрэгжүүлэхэд тохиромжтой. Ялангуяа алслагдсан үүрэн холбооны суурь станцын хувьд байршил дээр очих боломж хязгаарлагдмал байдаг тул алсаас команд өгөх чадвар нь системийн практик хэрэглээний чухал шаардлага болно. Алсын хяналтын сүлжээний түвшинд MQTT зэрэг publish-subscribe бүтэцтэй хөнгөн жинтэй протоколууд нь resource-constrained эмбэддэд төхөөрөмжүүдэд тохиромжтой бөгөөд PV системийн бодит хэрэглээнд мэдээлэл дамжуулалтын үр ашиг, хурдыг сайжруулдаг [9], [20]. Иймээс микроконтроллер–серверийн хооронд MQTT эсвэл TCP/IP протокол ашиглах архитектур нь техник хэрэгжилтийн хувьд тохиромжтой юм.

Гурав дахь нь гэнэтийн байгалийн үзэгдлийн үеийн автоматаар идэвхжих ухаалаг горим юм. Энэ нь судалгааны хүрээнд боловсруулсан хүчдэлийн босго, бохирдлын индекс, эрчим хүчний өгөөж, зай хураагуурын төлөвт суурилсан алгоритмуудаар хэрэгжинэ. Өөрөөр хэлбэл, цасжилт, тоосжилт,

хүчтэй салхи, хэсэгчилсэн халхлалт зэрэг нөлөөллөөс шалтгаалан гаралтын хүчдэл хэвийн лавлах утгаас огцом буурвал систем эхлээд бууралтыг илрүүлнэ, дараа нь бохирдлын индексийг тооцож нөхцөл байдлыг баталгаажуулна, улмаар роботын цэвэрлэгээ хийх нь үр ашигтай эсэхийг үнэлж шийдвэр гаргана. Ийм шаталсан логик нь системийг энгийн таймерт горимоос илүү ухаалаг, нөхцөлд дасан зохицох чадвартай болгоно.

Өгөгдлийн урсгалыг авч үзвэл доороос дээш чиглэлтэй мэдээллийн урсгал болон дээрээс доош чиглэлтэй удирдлагын урсгал гэсэн хоёр үндсэн шугамтай. Мэдрэгчүүдийн хэмжилтийн өгөгдөл микроконтроллерт, тэндээс сервер болон өгөгдлийн санд дамжиж, эцэст нь хэрэглэгчийн интерфэйст дүрслэгдэнэ. Харин интерфэйсээс өгсөн команд серверээр дамжин микроконтроллерт хүрч, хөдөлгүүрийн драйвер болон механик хэсэгт хэрэгжинэ. Энэ бүтэц нь системийг зөвхөн пассив хяналтын бус, идэвхтэй удирдлагын цогц систем болгон хөгжүүлэх суурь болж байна.

Ерөнхийд нь дүгнэхэд боловсруулсан алсын хяналт, удирдлагын архитектур нь механик цэвэрлэгээний робот, бодит цагийн мониторинг, лог хадгалалт, хүний оролцоотой алсын удирдлага, мөн алгоритмд суурилсан автомат шийдвэр гаргалтыг нэг системд нэгтгэж өгч байна. Ийм архитектур нь үүрэн холбооны суурь станц зэрэг алслагдсан хэрэглээнд нарны эрчим хүчний эх үүсвэрийн найдвартай ажиллагааг нэмэгдүүлэх, засвар үйлчилгээний хугацааг багасгах, бохирдлын нөлөөг бууруулах практик ач холбогдолтой юм.

### ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлаар алсын хяналт, удирдлагад суурилсан нарны хавтан цэвэрлэгч роботын онолын үндэс, хэмжилтэд суурилсан математик загвар, туршилтын үр дүн, механик хийц болон системийн архитектурыг нэгтгэн авч үзлээ. Судалгааны гол зорилго нь нарны хавтангийн гадаргуугийн бохирдол, халхлалтын нөлөөг бууруулах боломжтой цэвэрлэгээний робот системийн инженерийн шийдлийг боловсруулахад оршсон бөгөөд уг зорилгын хүрээнд дараах үндсэн үр дүнг гаргав.

**Нэгдүгээрт,** нарны хавтангийн ажиллагаанд гадаргуугийн төлөв мэдэгдэхүйц нөлөөтэй болохыг туршилтаар тогтоов. Хэсэгчлэн сүүдэрлэсэн туршилтаар сүүдэрлэлт ихсэхийн хэрээр гаралтын хүчдэл аажмаар буурч байсан бол хавтангийн гадаргууг цас тогтсон мэтээр халхалсан үед гаралтын хүчдэл огцом буурч, системийн хэвийн ажиллагаанд ноцтой нөлөөлөх түвшинд хүрч байгааг тогтоов. Энэ нь нарны хавтангийн ажиллагаанд энгийн сүүдэрлэлтээс илүүтэйгээр гадаргуугийн

шууд халхлалт, цасжилт, зузаан бохирдол илүү хортой болохыг харуулж байна.

**Хоёрдугаарт**, 2026 оны 3 дугаар сарын 1-ний өдрийн 09:00 цагаас эхлэн 530 цагийн турш хийсэн тасралтгүй мониторингийн үр дүнд өдөр-шөнийн мөчлөгөөс гадна өдрийн ажиллах үеийн хүчдэлийн түвшин хугацааны явцад буурч, цэвэрлэгээний дараа эргэн сэргэсэн хандлага ажиглагдсан. Иймээс гаралтын хүчдэлийн урт хугацааны өөрчлөлтөд тулгуурлан бохирдлын индексийг тодорхойлох боломжтой бөгөөд үүнийг робот цэвэрлэгээ эхлүүлэх шалгуур болгон ашиглах үндэслэлтэй гэж үзэв.

**Гуравдугаарт**, ремен дамжуургат шүүрэн систем бүхий механик хийц нь нарны хавтангийн гадаргууг бүхэлд нь хамруулан цэвэрлэхэд тохиромжтой болохыг хийсэн тооцооллоор нотлов. Тооцооны үр дүнгээс харахад хэвтээ чиглэлийн хөдөлгөөн харьцангуй бага ачаалалтай, харин 45° налуу дагуу дээш чиглэсэн хөдөлгөөн хамгийн их хүч, момент шаарддаг тул хөдөлгүүрийн сонголт, ремений суналт, удирдлагын алгоритмыг энэ нөхцөлд тулгуурлан боловсруулах шаардлагатай.

**Дөрөвдүгээрт**, алсын хяналт, удирдлагын системийн архитектур нь механик хэсэг, хэмжилтийн модуль, микроконтроллер, сервер, өгөгдлийн сан, хэрэглэгчийн интерфэйсийг нэгтгэн модульчлагдсан бүтэцтэй байхаар боловсруулагдсан. Уг архитектур нь бодит цагийн мониторинг, лог хадгалалт, алсын команд, мөн алгоритмд суурилсан автомат шийдвэр гаргалтыг хэрэгжүүлэх боломжтой.

**Тавдугаарт**, системийг тогтсон цагийн цэвэрлэгээ, ээлжийн инженерийн алсын команд, мөн гэнэтийн байгалийн үзэгдлийн үед автоматаар идэвхжих гэсэн гурван үндсэн горимоор ажиллуулахаар төлөвлөсөн. Энэ нь системийг зөвхөн туршилтын түвшинд бус, бодит хэрэглээнд ойртуулсан уян хатан шийдэл болж байна.

Иймд энэхүү судалгааны ажлын үр дүн нь нарны хавтангийн гадаргуугийн бохирдлыг хүчдэлийн өөрчлөлтөөр үнэлэх, алсын хяналттай цэвэрлэгээний роботын ажиллагааг үндэслэх, улмаар алслагдсан үүрэн холбооны суурь станц зэрэг хэрэглээнд нарны эрчим хүчний системийн найдвартай ажиллагааг сайжруулах инженерийн суурь шийдэл болж байна.

Цаашдын судалгааны хүрээнд дараах ажлуудыг хийхээр төлөвлөж байна. Үүнд:

- Хүчдэлээс гадна гүйдэл, чадал, эрчим хүчний бодит хэмжилтийг системд нэмж, бохирдлын нөлөөг илүү нарийвчлалтай үнэлэх;

- Ремен дамжуургат шүүрэн системийн бодит туршилтын хувилбарын бүрэн угсарч, лабораторийн болон хээрийн туршилтаар баталгаажуулах;
- Алсын хяналтын интерфэйсийг хөгжүүлж, операторын команд, анхааруулга, лог мэдээллийг нэгтгэсэн хэрэглэгчийн орчинг бүрдүүлэх;
- Гаралтын хүчдэлийн бууралт, бохирдлын индекс, зай хураагуурын төлөвт суурилсан автомат цэвэрлэгээ эхлүүлэх алгоритмыг туршилтаар сайжруулах;
- Бодит цасжилт, тоосжилт, салхины нөхцөлд урт хугацааны туршилт хийж системийн найдвартай ажиллагаа, эдэлгээ, үр ашгийг үнэлэх зэрэг болно.

## АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] M. Mani, R. Pillai, "Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 3124–3131, 2010.
- [2] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, L. L. Kazmerski, "A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 698–733, 2013.
- [3] W. J. Jamil, H. Abdul Rahman, S. Shaari, Z. Salam, "Performance degradation of photovoltaic power system: Review on mitigation methods," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 876–891, 2017.
- [4] K. Ilse, L. Micheli, B. W. Figgis, et al., "Techno-Economic Assessment of Soiling Losses and Mitigation Strategies for Solar Power Generation," *Joule*, vol. 3, pp.
- [5] M. U. Khan, M. Abbas, M. M. Khan, A. Kousar, M. Alam, Y. Massoud, S. Jafri, "Modeling and design of low-cost automatic self cleaning mechanism for standalone micro PV systems," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 43, art. 100922, 2021.
- [6] B. Parrott, P. Carrasco Zanini, A. Shehri, K. Kotsovos, I. Gereige, "Automated, robotic dry-cleaning of solar panels in Thuwal, Saudi Arabia using a silicone rubber brush," *Solar Energy*, vol. 171, pp. 526–533, 2018.
- [7] S. Fan, W. Liang, G. Wang, Y. Zhang, S. Cao, "A novel water-free cleaning robot for dust removal from distributed photovoltaic (PV) in water-scarce areas," *Solar Energy*, vol. 241, pp. 553–563, 2022.
- [8] N. Khadka, A. Bista, B. Adhikari, A. Shrestha, D. Bista, B. Adhikari, "Current Practices of Solar Photovoltaic Panel Cleaning System and Future Prospects of Machine Learning Implementation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 135948–135962, 2020.
- [9] OASIS, *MQTT Version 3.1.1*, OASIS Standard, 2014.
- [10] Najmi, N., Rachid, A., "A Review on Solar Panel Cleaning Systems and Techniques," *Energies*, 16(24):7960, 2023.
- [11] Al-Housani, M., Bicer, Y., Коç, M., "Assessment of Various Dry Photovoltaic Cleaning Techniques and Frequencies on the Power Output of CdTe-Type Modules in Dusty Environments," *Sustainability*, 11(10):2850, 2019.
- [12] Antonelli, M.G., Zobel, P.B., De Marcellis, A., Palange, E., "Autonomous robot for cleaning photovoltaic panels in desert zones," *Mechatronics*, 68:102372, 2020.
- [13] Fan, S., Liang, W., Wang, G., Zhang, Y., Cao, S., "A novel water-free cleaning robot for dust removal from distributed photovoltaic (PV) in water-scarce areas," *Solar Energy*, 241, pp. 553–563, 2022.

- [14] Le, N.T., Nguyen, M.D., Phan, T.D., Truong, C.T., Duong, V.T., Nguyen, H.H., Nguyen, T.T., "Development of a Multi-Suspension Unit for Solar Cleaning Robots to Mitigate Vibration Impact on Photovoltaic Panels," *Applied Sciences*, 13(22):12104, 2023.
- [15] Nguyen, H.H., Truong, C.T., Hoang Ngoc, A.D., Nguyen, M.T., Duong, V.T., Nguyen, T.T., "Investigation of Geometric and Hardness Parameters of Tank Track Grooves Equipped on Photovoltaic Cleaning Robot," *Applied Sciences*, 14(1):145, 2024.
- [16] Nguyen, M.T., Truong, C.T., Nguyen, V.T., Duong, V.T., Nguyen, H.H., Nguyen, T.T., "Research on Adhesive Coefficient of Rubber Wheel Crawler on Wet Tilted Photovoltaic Panel," *Applied Sciences*, 12(13):6605, 2022.
- [17] Olorunfemi, B.O., Ogbolumani, O.A., Nwulu, N., "Solar Panels Dirt Monitoring and Cleaning for Performance Improvement: A Systematic Review on Smart Systems," *Sustainability*, 14(17):10920, 2022.
- [18] Utama, I.B.K.Y., Pamungkas, R.F., Faridh, M.M., Jang, Y.M., "Intelligent IoT Platform for Multiple PV Plant Monitoring," *Sensors*, 23(15):6674, 2023.
- [19] Ferlito, S., Ippolito, S., Santagata, C., Schiattarella, P., Di Francia, G., "A Study on an IoT-Based SCADA System for Photovoltaic Utility Plants," *Electronics*, 13(11):2065, 2024.
- [20] Tran, K.T.M., Pham, A.X., Nguyen, N.P., Dang, P.T., et al., "Analysis and Performance Comparison of IoT Message Transfer Protocols Applying in Real Photovoltaic System," *International Journal of Networked and Distributed Computing*, 12, pp. 131–143, 2024.
- [21] Монгол Улс. Сэргээгдэх эрчим хүчний тухай хууль. Эрх зүйн мэдээллийн нэгдсэн систем.
- [22] Эрчим хүчний сайдын 2020 оны 159 дүгээр тушаалын хавсралт. Хэрэглэгчийн сэргээгдэх эрчим хүчний үүсгүүрээс үйлдвэрлэсэн эрчим хүчийг түгээх сүлжээнд нийлүүлэх журам.
- [23] Эрчим хүчний яам. 2030 он гэхэд сэргээгдэх эрчим хүчний эзлэх хэмжээг 30 хувьд хүргэх зорилтын тухай мэдээлэл.
- [24] Тархмал нарны эрчим хүчний системийг Монгол оронд нутагшуулах технологийн судалгаа. Судалгаа.gov.mn, 2024.
- [25] Бие даасан нарны зайн систем. Монгол хэл дээрх гарын авлага.
- [26] Батцэцэг Д. Монгол дахь сэргээгдэх эрчим хүчний хэрэглээ ба тогтвортой хөгжил. ШУТИС, Профессор, багш нарын эрдэм шинжилгээний бүтээлийн эмхэтгэл №22(7)/295, 2022.
- [27] [27] 15В нарны хавтан дээр хийсэн судалгаа, нар дагаж хөдлөх нарны хавтангийн ашигт байдлыг харуулсан туршилт. ШУТИС ЭХС-ийн эрдэм шинжилгээний бүтээлийн эмхэтгэл, 2024.

## ОПТИК ДАМЖУУЛАХ СҮЛЖЭЭНД НӨӨЦ ХАМГААЛАЛТЫН ОНОВЧТОЙ ЗАГВАРЫН СУДАЛГАА

Энхтүвшингийн ТӨГӨЛДӨР<sup>1</sup>, Шагдарын ГАНБОЛД<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбоо технологийн сургууль, Холбооны инженерчлэлийн  
ТЭНХИМ

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [tuugu8411@gmail.com](mailto:tuugu8411@gmail.com)<sup>1</sup>

**Хураангуй:** Техник, технологийн хөгжил хурдацтай явагдаж буй өнөө үед хүний өдөр тутмын хэрэглээ мэдээллийн технологитой нягт уялдаж, мэдээлэл холбооны үйлчилгээний хэрэгцээ, шаардлага хот хөдөөгийн ялгаагүйгээр өсөн нэмэгдэж байна. Үүний үр дүнд хол зайн, их багтаамжтай, өндөр хурдны үндсэн дамжуулах сүлжээний хүчин чадлыг нэмэгдүүлэх шаардлага бий болж байна. Орчин үед их хэмжээний мэдээллийн урсгалыг дамжуулах хэрэгцээг гэрлийн долгионы уртын хуваалтат нягтруулгын технологи (Wavelength Division Multiplexing – WDM) дээр суурилсан оптик зөөвөрлөгч сүлжээ (Optical Transport Network – OTN)-гээр хангаж байна. WDM технологид суурилсан оптик зөөвөрлөгч сүлжээ нь өндөр багтаамж, хурдтай мэдээлэл дамжуулах боломжийг олгодог боловч сүлжээний найдвартай ажиллагааг хангах асуудал чухал хэвээр байна. Иймд энэхүү судалгааны ажлаар WDM технологид суурилсан оптик зөөвөрлөгч сүлжээний найдвартай ажиллагааг сайжруулах боломжийг судалж, тухайн сүлжээний онцлогт тохирсон нөөц хамгаалалтын оновчтой загварыг боловсруулж, бодит сүлжээнд хэрэгжүүлэх боломжийг авч үзнэ. Судалгааны үр дүнд оптик сүлжээний найдвартай ажиллагааг нэмэгдүүлж, мэдээлэл холбооны үйлчилгээг тасралтгүй, найдвартай хүргэх нөхцөлийг бүрдүүлэхэд хувь нэмэр оруулах болно.

**Түлхүүр үг:** Оптик зөөвөрлөгч сүлжээ, WDM технологи, OTN, үндсэн сүлжээ, нөөц хамгаалалт, сүлжээний найдвартай ажиллагаа

### I. УДИРТГАЛ

Монгол Улс газар нутгийн хувьд өргөн уудам, хүн амын тархалт сийрэг бөгөөд хот суурин газрууд хоорондоо харьцангуй хол зайд байрладаг онцлогтой. Энэ нөхцөл байдал нь улс орон даяар мэдээлэл холбооны үйлчилгээг тасралтгүй хүргэхийн тулд өндөр багтаамжтай, хол зайн дамжуулалтыг дэмжих үндсэн сүлжээ шаардлагатай болгодог. Иймээс мэдээлэл холбооны үйлчилгээ үзүүлэгч байгууллагууд дамжуулах системийн үндсэн хэсгийг гэрлийн долгионы уртын хуваалтат нягтруулгын технологид суурилсан оптик зөөвөрлөгч сүлжээ ашиглан зохион байгуулж байна.

Гэвч Монгол орны цаг уурын эрс тэс нөхцөл, байгалийн хүчин зүйлс болон хүний үйл ажиллагаанаас шалтгаалан оптик шилэн кабель тасрах, цахилгаан тэжээлийн доголдол үүсэх, тоног төхөөрөмжийн гэмтэл гарах зэрэг эрсдэлүүд байнга тулгардаг. Ийм төрлийн гэмтэл саатал нь оптик дамжуулах системд үйлчилгээ тасалдах, сүлжээний найдвартай ажиллагаа буурах шалтгаан болдог.

Одоогийн байдлаар мэдээлэл холбооны үндсэн сүлжээ эзэмшигчид зарим зангилаа болон дамжуулах хэсгүүдэд нөөц хамгаалалтын шийдлүүдийг ашиглаж байгаа боловч бүх сүлжээг бүрэн хамгаалах боломж хангалттай түвшинд хүрээгүй байна. Тиймээс дамжуулах системийн найдвартай ажиллагааг нэмэгдүүлэх зорилгоор одоо ашиглагдаж буй холбооны дэд бүтцэд тулгуурлан нөөц хамгаалалтын зохион байгуулалтыг оновчтой төлөвлөх, сайжруулах боломжийг судлах шаардлага бий болж байна.

### II. МОНГОЛ УЛСЫН DWDM-OTN СҮЛЖЭЭНИЙ ӨНӨӨГИЙН БАЙДАЛ

#### 1. Мэдээлэл холбооны үндсэн сүлжээ эзэмшигчдийн системүүдийн бүтэц

Монгол Улсын хэмжээнд мэдээлэл холбооны үндсэн сүлжээний үйлчилгээ үзүүлэх “А” ангиллын тусгай зөвшөөрөлтэй хэд хэдэн байгууллага үйл ажиллагаа явуулж байна. Эдгээр байгууллагууд өндөр багтаамжийн дамжуулах системийг DWDM-OTN технологид суурилан байгуулж, улсын хэмжээний мэдээлэл холбооны үндсэн дэд бүтцийг бүрдүүлж байна. Үүнд дараах байгууллагууд орно. Үүнд:

- Жемнэт ХХК
- УБТЗ ХНН
- Мобиком Нэтворкс ХХК
- Скайнэтворкс ХХК
- Мэдээлэл холбооны сүлжээ ТӨХК
- МТ Нэтворкс ХХК
- Скайстрим ХХК
- Ийзи гөү рөүд ХХК
- Юни трансмишн нэтворк ХХК
- Айрон товер ХХК
- Эс Ти Би Эс ХХК
- Ондо нэтворк ХХК

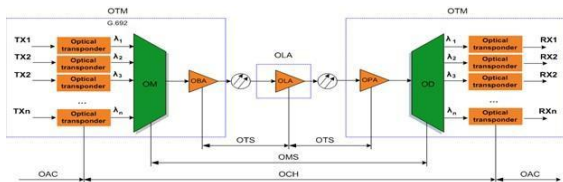
Дээрх байгууллагуудын ашиглаж буй DWDM-OTN дамжуулах системүүдийн ихэнх нь БНХАУ-ын ZTE болон Huawei компаниудын үйлдвэрлэсэн төхөөрөмжүүд дээр суурилсан байдаг. Эдгээр системүүдээр Монгол Улсын өмнөд болон хойд хилийн боомтуудаар дамжин бусад улс орнуудын дамжуулах сүлжээтэй холбогдож, олон улсын мэдээллийн урсгалын гарцыг бүрдүүлдэг. Үүний

зэрэгцээ үндсэн сүлжээний дамжуулах системээр дамжуулан нийслэл хотыг 21 аймгийн төвүүдтэй холбож, IPTV үйлчилгээ, үүрэн холбооны сүлжээ, байгууллагуудын дотоод мэдээллийн солилцоо зэрэг төрөл бүрийн мэдээлэл холбооны үйлчилгээг хүргэж байна.

Техникийн хувьд DWDM системүүд нь нэг долгионы сувагт 1Gbps-ээс 100Gbps хүртэлх хурдтай мэдээлэл дамжуулах боломжтой бөгөөд нэг чиглэлд 40-өөс 80 хүртэлх сувгийн багтаамжийг дэмждэг. Сүлжээний зохион байгуулалтын хувьд ихэвчлэн цэг-цэгийн болон цагираг хэлбэрийн топологи ашиглагдаж байна.

**2. Нөөц хамгаалалтын загварууд, тэдгээрийг системд хэрэгжүүлж байгаа байдал**

DWDM-OTN дамжуулах системд нөөц хамгаалалтын ажиллагаа нь хамгаалалтын боардын байрлалаас хамааран өөр өөр зарчмаар хэрэгждэг. Өөрөөр хэлбэл, хамгаалалтын төхөөрөмж аль хэсэгт байрлаж байгаагаас шалтгаалан сувгийн хамгаалалтын механизм болон хамгаалалтын загварууд тодорхойлогддог.



Зураг 1 “OMS1+1 OA shared” нөөц хамгаалалтын загвар

DWDM-OTN төхөөрөмжүүд дээр суурилсан үндсэн сүлжээний архитектур нь дараах үндсэн түвшнүүдээс бүрддэг [4].

- Оптик нягтруулгын хэсэг (Optical Multiplex Section – OMS):

Энэ түвшин нь оптик терминал төхөөрөмжүүдийн хооронд байрлах бөгөөд олон сувгийн оптик дохионуудыг нягтруулж нэг шугамаар дамжуулах, мөн нягтруулсан дохионуудыг задлах үүргийг гүйцэтгэдэг.

- Оптик зөөвөрлөх хэсэг (Optical Transport Section – OTS):

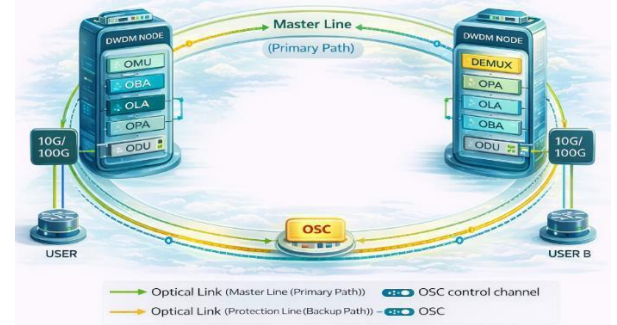
Энэ түвшин нь оптик терминал болон оптик өсгөгчүүдийн хооронд, мөн хоёр өсгөгчийн хооронд байрлах бөгөөд шилэн кабелиар дамжин оптик дохиог дамжуулах үндсэн үүргийг гүйцэтгэдэг.

- Оптик сувгийн түвшин (Optical Channel – OCH):

Энэхүү түвшин нь транспондер төхөөрөмжүүдийн хооронд байрлах ба хэрэглэгчийн дохиог оптик сувагт хувирган дамжуулах ажиллагааг гүйцэтгэдэг. OTN системд ашиглагддаг нөөц хамгаалалтын үндсэн загваруудад дараах төрлүүд хамаарна [1–3].

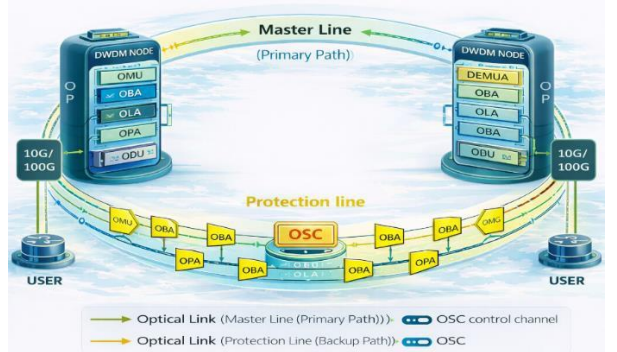
1. OCH 1+1 хамгаалалт
  1. OCH 1+1 OTU shared
  2. OCH 1+1 OTU redundancy
2. OMS 1+1 хамгаалалт
3. OMS 1+1 OA shared

4. OMS 1+1 OA redundancy
3. OTS 1+1 хамгаалалт
5. OCH 1+1 OTU shared загвар Энэхүү хамгаалалтын загварт нөөц хамгаалалтын боард нь OTM зангилаанд нягтруулгын боард болон транспондер боардын хооронд байрладаг. Энэ тохиолдолд шилэн кабель, өсгөгч болон нягтруулгын боарданд гэмтэл гарсан үед сувгийн хамгаалалт хийгддэг боловч транспондер боардын гэмтлийг хамгаалах боломжгүй байдаг.



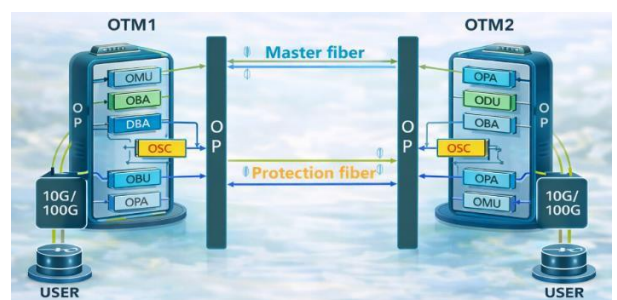
Зураг 2. OCH1+1 OTU shared нөөц хамгаалалтын загвар

“OCH1+1 OTU redundancy” загвар: Энэхүү архитектур нь үндсэн болон нөөц оптик зам ашиглан DWDM сүлжээний найдвартай ажиллагааг нэмэгдүүлж, шилэн кабель болон төхөөрөмжийн гэмтэл гарсан үед мэдээллийн дамжуулалтыг тасралтгүй үргэлжлүүлэх боломжийг олгодог.



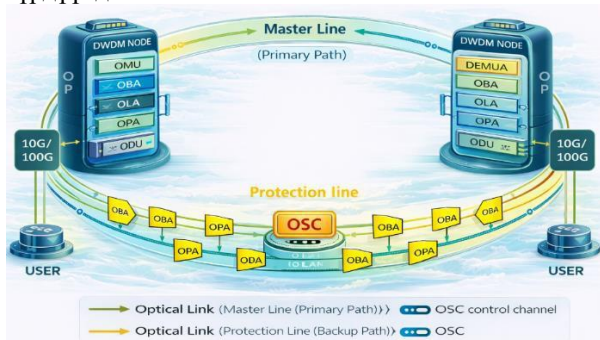
Зураг 3. OCH1+1 OTU redundancy нөөц хамгаалалтын загвар

“OMS1+1 OA shared” загвар: Энэхүү хамгаалалтын хэлбэрт хамгаалалтын боард нь OTM зангилаанд өсгөгч боард болон шилэн кабелийн хооронд байрлана. Шилэн кабелийн гэмтэл үүссэн тохиолдолд сувгуудыг бүрэн хамгаалах боломжтой.



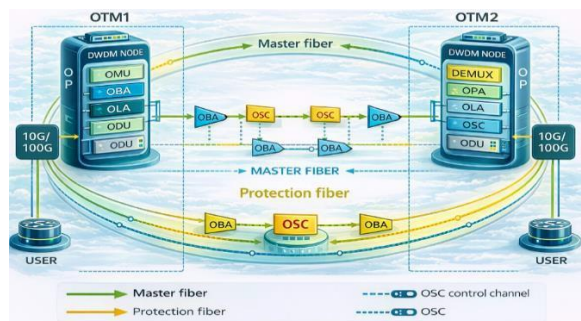
Зураг 4. OMS1+1 OA shared нөөц хамгаалалтын загвар

“OMS1+1 OA redundancy” загвар: Энэ загварт хамгаалалтын боард нь нягтруулгын боард болон өсгөгч боардын хооронд байрладаг. Ийм бүтэц нь шилэн кабель болон өсгөгч төхөөрөмжид гарсан гэмтлийн үед бүх сувгийг хамгаалах боломжийг бүрдүүлдэг.



Зураг 5. OMS1+1 OA redundancy нөөц хамгаалалтын загвар

“OTS1+1” загвар: OTS 1+1 хамгаалалтын загвар нь ихэвчлэн OTM болон OLA зангилаануудын хооронд хэрэгждэг. Энэ тохиолдолд хамгаалалтын боард нь шилэн кабелийн талд байрлах бөгөөд шилэн кабель болон өсгөгчийн гэмтлийн үед сувгуудыг бүрэн хамгаалах боломжийг олгодог.



Зураг 6. OTS1+1 нөөц хамгаалалтын загвар

НӨӨЦ ХАМГААЛАЛТЫН ЗАГВАРУУДЫН ХАРЬЦУУЛАЛТ

1-Р ХҮСНЭГТ

№	Нөөц хамгаалалтын загвар	Онцлог	
		Давуу тал	Сул тал
1	OCH1+1 OTU shared	Шилэн кабель, өсгөгч боард болон нягтруулгын боарданд гэмтэл гарсан үед тухайн сувгийг хамгаалах боломжтой..	Нөөц хамгаалалтын боардын тоо их шаарддаг бөгөөд нэмэлт шелф шаардлагатай. Транспондер боардын гэмтлийн үед хамгаалалт хийгдэхгүй.

2	OCH1+1 OTU redundancy	Шилэн кабель, өсгөгч боард, нягтруулгын боард болон транспондер боардын гэмтлийн үед сувгийг хамгаалалт бүрэн хийгдэнэ.	Нөөц хамгаалалтын болон транспондер боардын тоо их шаарддаг тул системийн өртөг нэмэгдэнэ. Нэмэлт шелф шаардлагатай.
3	OMS1+1 OA shared	Шилэн кабелийн гэмтлийн үед бүх сувгийг хамгаалах боломжтой. Нөөц хамгаалалтын боардын тоо харьцангуй бага шаардлагатай.	Өсгөгч боард, нягтруулгын боард болон транспондер боардын гэмтлийн үед сувгуудыг хамгаалах боломжгүй.
4	OMS1+1 OA redundancy	Шилэн кабель болон өсгөгч боардын гэмтлийн үед бүх сувгийг хамгаална. Нөөц хамгаалалтын боардын тоо хэмнэлттэй.хэмнэлт тэй.	Нягтруулгын боард болон транспондер боардын гэмтлийн үед сувгууд хамгаалагдахгүй.
5	OTS1+1	Шилэн кабелийн гэмтлийн үед бүх сувгийг хамгаална. Хөрөнгө оруулалтын зардал харьцангуй бага.	Өсгөгч сайт дээр төхөөрөмж гэмтэх эсвэл цахилгаан тасрах үед хамгаалалт хийгдэхгүй. Өсгөгч болон нягтруулгын боардын гэмтлийн үед сувгийг хамгаалах боломжгүй.

Монгол Улсад ашиглагдаж буй DWDM-OTN системүүдийн хувьд эдийн засгийн боломж болон сүлжээнд үүсэх гэмтэл, саатлын магадлалаас хамааран зөвхөн зарим чухал зангилаа болон дамжуулах чиглэлүүдэд нөөц хамгаалалтын шийдлийг хэрэгжүүлсэн байдаг. Ихэнх тохиолдолд зөвхөн шилэн кабелийн гэмтэл саатлын үед сүлжээг хамгаалах зориулалттай нөөц хамгаалалтын загваруудыг ашиглаж байна.

Манай орны байгаль цаг уурын эрс тэс нөхцөл, байгалийн үзэгдэл, мөн хүний үйл ажиллагаанаас шалтгаалан шилэн кабелийн гэмтэл харьцангуй их гардаг. Судалгаанаас үзэхэд холбооны дамжуулах системд гарч буй нийт саатлын 80–90 орчим хувийг шилэн кабелийн гэмтэл эзэлдэг байна.

Иймээс практикт ихэвчлэн шилэн кабелийн шугам талд хамгаалалт хийх нөөц хамгаалалтын загваруудыг илүүтэй хэрэгжүүлдэг. Үүнтэй холбоотойгоор DWDM-OTN системүүдэд “OCH 1+1 OTU shared” болон “OMS 1+1 OA shared” төрлийн хамгаалалтын загваруудыг өргөн хэрэглэж байна.

Эдгээр хамгаалалтын загварууд нь шилэн кабелийн гэмтлийн үед сүлжээний үйлчилгээний тасалдлыг бууруулахад үр дүнтэй боловч төхөөрөмжийн гэмтэл болон зангилааны саатлыг бүрэн хамгаалах боломж хязгаарлагдмал байдаг.

### III. МОНГОЛ УЛСЫН ШИЛЭН КАБЕЛИЙН ДЭД БҮТЦИЙН ТАРХАЛТАД ТОХИРСОН НӨӨЦ ХАМГААЛАЛТЫН ЗАГВАР, ТҮҮНИЙ ХЭРЭГЖҮҮЛЭЛТ

#### 1. Оптик зөөвөрлөгч сүлжээний стандартууд

Оптик зөөвөрлөгч сүлжээ (Optical Transport Network – OTN) болон долгионы уртын хуваалтат нягтруулгын (DWDM) технологи нь олон улсын байгууллагуудаас гаргасан стандарт, зөвлөмжүүдэд үндэслэн хөгжиж, хэрэгждэг. Эдгээр стандартууд нь оптик дамжуулах системийн архитектур, сувгийн зохион байгуулалт, төхөөрөмжийн ажиллагаа болон сүлжээний найдвартай ажиллагааг тодорхойлж өгдөг.

Олон улсын харилцаа холбооны салбарт оптик сүлжээний үндсэн стандартуудыг International Telecommunication Union байгууллагын ITU-T зөвлөмжүүдээр тодорхойлдог. Тухайлбал DWDM системийн сувгийн давтамжийн зохион байгуулалтыг ITU-T G.694.1 зөвлөмжөөр тодорхойлсон байдаг бөгөөд энэ стандарт нь долгионы уртын сувгийн тор (wavelength grid) болон сувгийн хоорондын зайг тогтоож өгдөг.

Мөн оптик зөөвөрлөгч сүлжээний архитектур, давхаргын бүтэц болон дамжуулах системийн ажиллагааны зарчмыг ITU-T G.709 болон ITU-T G.872 зөвлөмжүүдээр тодорхойлсон байдаг. ITU-T G.709 стандарт нь OTN сүлжээний хүрээнд мэдээллийг дамжуулах фреймийн бүтэц болон сувгийн зохион байгуулалтыг тодорхойлдог бол ITU-T G.872 стандарт нь оптик зөөвөрлөгч сүлжээний архитектур, OCH, OMS, OTS зэрэг давхаргуудын бүтэц, ажиллагааг тодорхойлдог.

Харин шилэн кабелийн бүтэц, механик шинж чанар болон техникийн шаардлагыг International Electrotechnical Commission байгууллагаас гаргасан IEC стандартуудаар тодорхойлдог. Тухайлбал IEC 60794 стандарт нь шилэн кабелийн бүтцийн төрөл, техникийн шаардлага болон туршилтын аргачлалуудыг тодорхойлдог.

Ийнхүү ITU-T болон IEC байгууллагуудын гаргасан стандартууд нь оптик дамжуулах сүлжээний тоног төхөөрөмж, кабелийн бүтэц болон сүлжээний архитектурыг олон улсын хэмжээнд нэгэн ижил зарчмаар хөгжүүлэх үндсэн суурийг бүрдүүлж байна.

#### 2. Монгол Улсад хэрэгжиж байгаа байдал

Монгол Улсын үндсэн мэдээлэл холбооны дамжуулах сүлжээнд DWDM болон OTN технологид суурилсан оптик зөөвөрлөгч системүүд өргөн ашиглагдаж байна. Эдгээр системүүдийг төлөвлөх, байгуулах болон ашиглах явцад олон улсын стандартуудыг баримталдаг бөгөөд ялангуяа International Telecommunication Union байгууллагын ITU-T зөвлөмжүүдийг өргөн хэрэглэж байна.

Тухайлбал DWDM системийн сувгийн долгионы уртын зохион байгуулалт нь ITU-T G.694.1 стандартын дагуу тодорхойлогддог бөгөөд энэ нь сувгийн хоорондын зай болон давтамжийн торыг тогтоож өгдөг. Мөн оптик зөөвөрлөгч сүлжээний архитектур, OTN фреймийн бүтэц болон мэдээлэл дамжуулах зарчмыг ITU-T G.709 болон ITU-T G.872 зөвлөмжүүдийн дагуу хэрэгжүүлдэг.

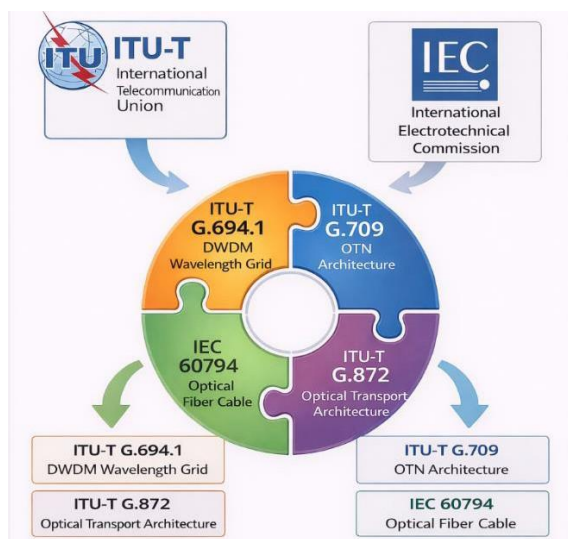
Харин шилэн кабелийн бүтэц, техникийн шаардлага болон кабелийн туршилтын аргачлалыг International Electrotechnical Commission байгууллагын IEC стандартуудын дагуу тодорхойлдог бөгөөд үүнд IEC 60794 стандарт өргөн ашиглагддаг.

Монгол Улсын үндсэн сүлжээ эзэмшигч байгууллагууд DWDM-OTN төхөөрөмжүүдийг ашиглан олон улсын стандартын дагуу өндөр багтаамжтай оптик дамжуулах системүүдийг байгуулж, улс орны хэмжээнд мэдээлэл холбооны үйлчилгээг найдвартай хүргэж байна.

#### 3. Нөөц хамгаалалтыг сайжруулах боломж

Монгол Улсын газар зүйн онцлогоос шалтгаалан шилэн кабелийн дэд бүтцийн тархалт нь замын сонголт харьцангуй цөөн байдаг бөгөөд үүнээс хамааран дамжуулах системүүдийн топологийн бүтэц нь ихэвчлэн энгийн хэлбэртэй байдаг. Мөн мэдээлэл холбооны үндсэн сүлжээ эзэмшигч компаниудын шилэн кабелийн сүлжээ нь ихэвчлэн Улаанбаатар хотоос эхлэлтэй цагираг болон од хэлбэрийн бүтэцтэй бөгөөд нэг үндсэн трасын дагуу чиглэлүүд давхцан суурилуулагдсан байдаг.

Иймээс үндсэн сүлжээний гол трасын дагуу шилэн кабелийн ашиглалт харьцангуй бага буюу нийт шөрмөсийн ашиглалт ойролцоогоор 50 орчим хувьтай байна. Үүнээс үзэхэд сүлжээ эзэмшигч байгууллагууд шинээр дэд бүтэц байгуулахгүйгээр өөрсдийн эзэмшлийн шилэн кабелийн ашиглагдаагүй сул шөрмөсийг хоорондоо солилцон ашиглах боломжтой юм. Ийнхүү сул шөрмөсүүдийг солилцож ашигласнаар одоогийн сүлжээний замчлалаас өөр чиглэл бүхий нөөц хамгаалалтын шугамыг байгуулах боломж бүрдэх бөгөөд шинэ дэд

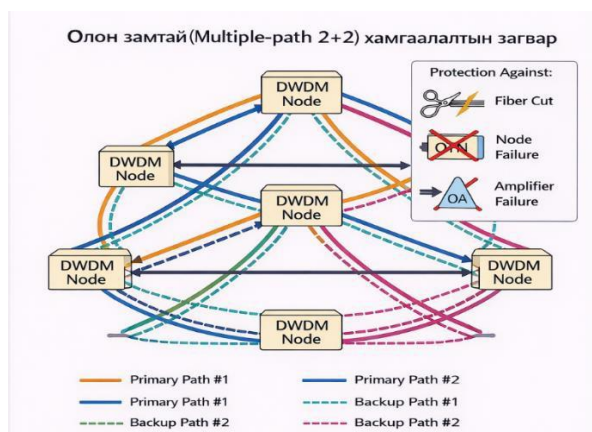


Зураг 7. Оптик зөөвөрлөгч сүлжээний стандартууд

бүтэц байгуулахтай холбоотой хөрөнгө оруулалтын зардлыг хэмнэх давуу талтай.

Харин гадаадын өндөр хөгжилтэй улс орнуудын шилэн кабелийн дамжуулах системүүд нь ихэвчлэн олон зангилааг хамарсан, харилцан холбогдсон цагираг болон торон хэлбэрийн илүү нүсэр бүтэцтэй байдаг. Ийм төрлийн сүлжээнд Multiple-path 2+2 нөөц хамгаалалтын загварыг түгээмэл ашигладаг байна [7].

Тус загвар нь шилэн кабель, өсгөгч боард, нягтруулгын боард, транспондер боард зэрэг сүлжээний элементүүдийн аливаа төрлийн гэмтэл гарсан тохиолдолд сувгийг бүрэн хамгаалах боломжтой бөгөөд системийн нэгээс дээш хэсэгт зэрэг гэмтэл үүссэн нөхцөлд ч үйлчилгээний тасалдлыг бууруулах давуу талтай. Гэвч уг хамгаалалтын загварыг хэрэгжүүлэхэд олон ялгаатай замчлал бүхий шилэн кабель, олон тооны өсгөгч, нягтруулгын болон транспондер төхөөрөмжүүд шаардлагатай байдаг. Мөн зангилаа сайтуудад нэмэлт шелф суурилуулах шаардлагатай тул хэрэгжилтийн зардал харьцангуй өндөр байдаг.



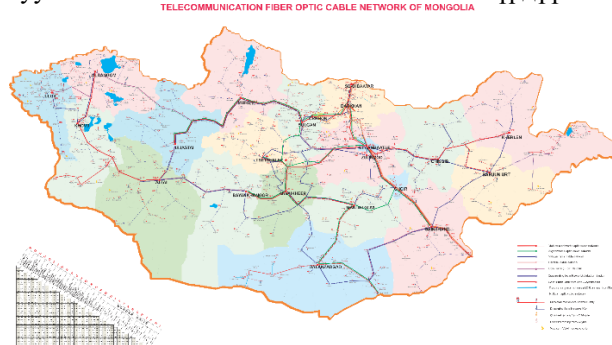
Зураг 8. Олон замтай (Multiple-path 2+2) хамгаалалтын загвар

Иймээс Монгол Улсын шилэн кабелийн дэд бүтцийн өнөөгийн тархалт, топологийн онцлогийг харгалзан үзэхэд олон замчлал бүхий өндөр өртөгтэй хамгаалалтын загваруудыг шууд хэрэгжүүлэхээс илүүтэйгээр одоо байгаа дэд бүтцийг үр ашигтай ашиглах, сул шөрмөсийг солилцох замаар нөөц хамгаалалтын шийдлийг хэрэгжүүлэх нь илүү оновчтой гэж үзэж байна.

Монгол Улсад ашиглагдаж буй DWDM-OTN дамжуулах системүүдийн хувьд ихэнх үндсэн зангилаа болон системийн төвүүд Улаанбаатар хотод төвлөрсөн байдаг. Иймээс нийслэл хотоос гарах үндсэн дамжуулах шугамууд дээр найдвартай ажиллагааг хангах зорилгоор эхний OLA зангилаа хүртэлх хэсэгт OMS 1+1 нөөц хамгаалалтын загварыг хэрэгжүүлэх шаардлагатай гэж үзэж байна.

Харин OTM зангилаа сайтууд руу чиглэсэн дамжуулах хэсгүүдэд 1+2 бүтэц бүхий хамгаалалтын

шийдэл, өөрөөр хэлбэл OCH 1+1 OTU redundancy болон OMS 1+1 OA shared загваруудыг хослуулан хэрэгжүүлэх нь илүү тохиромжтой гэж үзэж байна. Энэхүү хосолсон хамгаалалтын шийдэл нь сувгуудын найдвартай ажиллагааг нэмэгдүүлж, шилэн кабель болон тоног төхөөрөмжийн гэмтэл зэрэг системд үүсч болзошгүй саатлуудыг даван туулах боломжийг бүрдүүлнэ.



Зураг 9. Монгол улсын DWDM-OTN дамжуулах системийн шилэн кабелийн тархалт

### 3.1. Монгол улсад DWDM-OTN системийг хэрэгжүүлж буй байгууллагууд

Монгол Улсын үндсэн мэдээлэл холбооны дамжуулах сүлжээг хэд хэдэн оператор байгууллагууд эзэмшиж, DWDM болон OTN технологид суурилсан өндөр багтаамжийн дамжуулах системүүдийг ашиглаж байна. Үндсэн сүлжээний операторууд нь улс хооронд болон хот хоорондын мэдээлэл дамжуулах backbone дэд бүтцийг байгуулж, интернэт болон холбооны үйлчилгээний найдвартай ажиллагааг хангаж ажилладаг.

#### 1. Мэдээлэл холбооны сүлжээ ХХК

Тус байгууллага нь Монгол Улсын төрийн өмчит үндэсний backbone сүлжээний оператор бөгөөд улсын нийт шилэн кабелийн дэд бүтцийн ихэнх хэсгийг хариуцан ажиллуулдаг. Тус компани 21 аймаг болон олон сум сууринг холбосон 17,000 км-ээс дээш урттай үндсэн шилэн кабелийн сүлжээ эзэмшдэг бөгөөд энэхүү сүлжээн дээр өндөр багтаамжийн DWDM-OTN дамжуулах системүүдийг ашиглан оператор компаниудад дамжуулах үйлчилгээ үзүүлдэг.

#### 2. Mobicom Networks LLC

Мобиком группийн дэд бүтцийн оператор компани бөгөөд Монгол Улсын хот хоорондын болон олон улсын дамжуулах сүлжээг байгуулан ажиллуулдаг. Тус компани 10,000 км-ээс дээш урт шилэн кабелийн сүлжээ байгуулж, Монгол Улсын 21 аймаг болон олон сум сууринг холбосон backbone дамжуулах системийг ажиллуулж байна. Мөн урд болон хойд хил дээр Хятад, Оросын операторуудтай шууд холбогдсон олон улсын гарцуудтай.

#### 3. Gemnet LLC

Gemnet компани нь Монгол Улсын өмнөд хилээс хойд хил хүртэл төмөр зам дагуу байрласан 1199 км урт DWDM дамжуулах сүлжээ эзэмшдэг. Тус сүлжээ нь өндөр багтаамжийн DWDM болон OTN систем

дээр суурилсан бөгөөд SNCP болон 1+1 хамгаалалтын механизмуудыг ашиглан найдвартай ажиллагааг хангаж ажилладаг.

4. Skynetworks LLC

Skynetworks компани нь Unitel группийн дэд бүтцийн оператор бөгөөд хотын болон хот хоорондын шилэн кабелийн дэд бүтцийг байгуулж, байгууллагууд болон операторуудад өндөр хурдны дамжуулах үйлчилгээ үзүүлдэг. Тус компанийн сүлжээ нь Монгол Улсын томоохон хотуудыг холбосон backbone оптик сүлжээ дээр суурилсан байдаг.

5. Railcom (УБТЗ холбооны сүлжээ)

Railcom компани нь төмөр зам дагуух шилэн кабелийн дэд бүтцэд суурилсан дамжуулах сүлжээг ажиллуулдаг бөгөөд үндсэндээ төмөр замын дагуу байрласан хотуудыг холбосон backbone сүлжээний оператор юм. Тус сүлжээг ашиглан харилцаа холбооны операторуудад дамжуулах суваг түрээсийн үйлчилгээ үзүүлдэг.хэвээр тогтоосон хэм хэмжээнд захирагдахгүй.



Зураг 10. Монгол Улсын үүрэн холбооны сүлжээний хамрах хүрээ

**ДҮГНЭЛТ**

Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд DWDM-OTN технологид суурилсан оптик зөөвөрлөгч сүлжээний бүтэц, ажиллагааны зарчим болон нөөц хамгаалалтын загваруудыг судалж, Монгол Улсын үндсэн дамжуулах сүлжээний өнөөгийн байдалд дүн шинжилгээ хийлээ.

Судалгааны явцад DWDM-OTN системд ашиглагддаг OCH, OMS, OTS түвшний нөөц хамгаалалтын загваруудын онцлог, давуу болон сул талуудыг харьцуулан судалж, тэдгээрийн системийн найдвартай ажиллагаанд үзүүлэх нөлөөг тодорхойлов. Мөн Монгол Улсын шилэн кабелийн дэд бүтцийн тархалт, оператор байгууллагуудын сүлжээний бүтэц болон ашиглагдаж буй дамжуулах системүүдийн онцлогийг судалсан.

Судалгаанаас үзэхэд Монгол Улсын үндсэн сүлжээ нь ихэвчлэн Улаанбаатар хотоос төвлөрсөн бүтэцтэй бөгөөд шилэн кабелийн трассуудын давхцал ихтэй, замын сонголт хязгаарлагдмал байдаг нь сүлжээний найдвартай ажиллагаанд тодорхой хэмжээгээр нөлөөлж байна. Гэвч үндсэн трассуудын дагуух шилэн кабелийн шөрмөсийн ашиглалт харьцангуй бага буюу дунджаар 40–60 орчим хувьтай байгаа нь сул шөрмөсийг нөөц хамгаалалтын зориулалтаар ашиглах боломж байгааг харуулж байна.

Иймээс Монгол Улсын үндсэн DWDM-OTN дамжуулах сүлжээнд нөөц хамгаалалтын шийдлийг хэрэгжүүлэхдээ одоо байгаа шилэн кабелийн дэд бүтцийг үр ашигтай ашиглах, операторуудын хооронд сул шөрмөсийг солилцох замаар нөөц хамгаалалтын шугамыг зохион байгуулах боломжтой гэж үзэж байна.

Мөн судалгааны үр дүнд Улаанбаатар хотоос гарах үндсэн дамжуулах шугамууд дээр OMS 1+1 нөөц хамгаалалтын загварыг хэрэгжүүлэх, харин OTM зангилаа сайтуудын хооронд OCH 1+1 OTU redundancy болон OMS 1+1 OA shared загваруудыг хослуулан ашиглах нь системийн найдвартай ажиллагааг нэмэгдүүлэх оновчтой шийдэл болох нь тогтоогдлоо.

Ийнхүү санал болгож буй нөөц хамгаалалтын загварыг хэрэгжүүлснээр DWDM-OTN дамжуулах системийн найдвартай ажиллагааг сайжруулах, үйлчилгээний тасалдлыг бууруулах, мөн шинэ дэд бүтэц байгуулах шаардлагыг багасган хөрөнгө оруулалтын зардлыг хэмнэх боломж бүрдэнэ.

**САНАЛ**

Энэхүү судалгааны ажлын үр дүнд үндэслэн DWDM-OTN дамжуулах сүлжээний найдвартай ажиллагааг сайжруулах зорилгоор дараах санал, зөвлөмжүүдийг дэвшүүлж байна.

1. Монгол Улсын үндсэн дамжуулах сүлжээнд нөөц хамгаалалтын шийдлийг хэрэгжүүлэхдээ одоо байгаа шилэн кабелийн дэд бүтцийг үр ашигтай ашиглах шаардлагатай. Үүний хүрээнд үндсэн трассуудын дагуу ашиглагдаагүй сул шөрмөсүүдийг нөөц хамгаалалтын шугам болгон ашиглах боломжийг судалж хэрэгжүүлэх нь зүйтэй.

2. Улаанбаатар хотоос гарах үндсэн дамжуулах шугамууд дээр эхний өсгөгч зангилаа хүртэл OMS 1+1 нөөц хамгаалалтын загварыг хэрэгжүүлснээр системийн найдвартай ажиллагааг нэмэгдүүлэх боломжтой.

3. OTM зангилаа сайтуудын хооронд дамжих сувгуудын хамгаалалтыг сайжруулах зорилгоор OCH 1+1 OTU redundancy болон OMS 1+1 OA shared хамгаалалтын загваруудыг хослуулан ашиглах нь системийн саатлыг бууруулахад үр дүнтэй гэж үзэж байна.

4. Цаашид үндсэн сүлжээ эзэмшигч оператор байгууллагууд хоорондоо хамтран ажиллаж, шилэн кабелийн сул шөрмөсийг харилцан солилцох буюу хамтран ашиглах замаар нөөц хамгаалалтын олон зам бүхий сүлжээний бүтцийг хөгжүүлэх боломжтой.

5. Монгол Улсын үндсэн дамжуулах сүлжээг цаашид хөгжүүлэхдээ олон замтай (multiple-path) сүлжээний топологийг үе шаттайгаар нэвтрүүлэх нь системийн найдвартай ажиллагааг нэмэгдүүлэх, үйлчилгээний тасалдлыг бууруулахад чухал ач холбогдолтой юм.

**АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ**

[1] <http://www.crc.gov.mn>  
 [2] <http://www.zte.com.cn>  
 [3] <https://www.huawei.com>  
 [4] <https://www.mongoliainc.com>

- [5] <https://www.mobicomnetworks.mn>
- [6] <https://www.gemnet.mn>
- [7] [https://www.en.wikipedia.org/wiki/Information\\_Communications\\_Network?utm\\_source](https://www.en.wikipedia.org/wiki/Information_Communications_Network?utm_source)
- [8] <https://www.oxfordbusinessgroup.com/>
- [9] <https://www.skynetworks.mn/>
- [10] <https://www.altaiholding.mn/>
- [11] З.Буянхишиг, Ш.Ганболд. “Оптик нягтруулга” 2013. Улаанбаатар.
- [12] З.Буянхишиг, Н.Баатарсүрэн. “DWDM сүлжээний топологи” 2009.
- [13] Sudheer Dharanikota and Raj Jain “Protection and Restoration in DWDM Networks”. Washington
- [14] [https://www.researchgate.net/publication/228750098\\_Protection\\_and\\_restoration\\_in\\_DWDM\\_networks\\_Recent\\_developments\\_and\\_Issues](https://www.researchgate.net/publication/228750098_Protection_and_restoration_in_DWDM_networks_Recent_developments_and_Issues)
- [15] [https://www.researchgate.net/publication/242374976\\_The\\_Multiple\\_Path\\_Protection\\_of\\_DWDM\\_Backbone\\_Optical\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/242374976_The_Multiple_Path_Protection_of_DWDM_Backbone_Optical_Networks)

# AI-ENHANCED VR MODEL WITH MONGOLIAN SPEECH DRIVEN LIP- SYNC MAPPING

LIU PEIFENG<sup>1</sup>, TUYATSETSEG Badarch<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China, Hohhot, Inner Mongolia, Vocational College of Chemical Engineering, Department of Information Engineering

<sup>2</sup> Mongolia, Ulaanbaatar, MUST, School of Information and Communication Technology, Department of Computer Science

Corresponding author's e-mail: [tuyatsetseg.b@must.edu.mn](mailto:tuyatsetseg.b@must.edu.mn)<sup>2</sup>

**Abstract:** This paper presents the design of an AI-driven virtual reality (VR) model with a particular focus on Mongolian speech-driven lip synchronization based on viseme mapping. The model integrates an end-to-end pipeline including audio capture, speech recognition, dialogue generation, speech synthesis, and real-time lip animation. To address the limitations of conventional five-vowel lip models in representing Mongolian phonetic characteristics, an intermediate viseme layer is introduced together with a rule based interpolation strategy for approximating the front rounded vowels /ø/ and /ɥ/. Experimental validation on real VR hardware demonstrates that the proposed method reduces perceived interaction latency while maintaining lip-sync stability and visual consistency, supporting practical deployment in immersive social VR environments.

**Keywords:** *speech driven lip synchronization, viseme interpolation, Mongolian rounded vowels, BlendShape mapping, real-time VR interaction*

## I. INTRODUCTION

This study focuses on AI-powered voice interaction model that supports natural, low-latency, multilingual, and immersive human-computer interaction. With recent advances in display technology, spatial tracking, and real-time rendering, virtual reality (VR) systems have evolved from laboratory prototypes to widely deployed consumer platforms [1], [2]. This transition has significantly increased the demand for real-time performance and system stability in practical VR applications.

In social VR environments, virtual characters not only deliver dialogue but also contribute to user immersion through synchronized facial animation and embodiment cues [3]. Compared with conventional desktop-based voice systems, VR interactions occur at close range, where speech-lip desynchronization and unnatural mouth movements are more visually noticeable. Consequently, achieving natural lip synchronization while maintaining low end-to-end latency is a critical requirement in virtual character system design for VR.

Traditional virtual dialogue systems are predominantly rule-based or script-driven and rely on predefined human-authored content. Such systems are limited in their ability to support open-ended conversation and generally lack contextual adaptability. In multilingual environments, these limitations become more pronounced, making sustained real-time interaction in social VR more difficult. Recent advances in large-scale speech recognition and dialogue generation models [4] provide new opportunities for building conversational agents in immersive environments. However, most existing work remains focused on text-based or desktop-oriented applications, while comparatively fewer studies address system-level implementation and performance optimization for practical standalone VR hardware.

The model emphasizes several key components, including voice acquisition, speech recognition, dialogue generation, speech synthesis, and lip synchronization, from an engineering perspective. For Mongolian language interaction, this study further focuses on the speech-to-viseme mapping mechanism [5], [6], and proposes an interpolation-based lip sync strategy that operates within a basic five vowel lip model while accommodating Mongolian specific articulation characteristics.

### A. Voice Dialogue System Model in VR Settings

The virtual voice dialogue system operates as an end-to-end information processing framework in a social VR environment. The overall workflow consists of speech acquisition, speech to text processing (STT), dialogue understanding and generation based on a large language model (LLM), text to speech synthesis (TTS), and real time lip animation. Delay or instability at any stage can degrade interaction fluency and reduce the user's sense of immersion.

### B. Multilingual Speech Interaction Challenges

To support social VR interaction across multiple languages, multilingual speech processing is essential. However, current voice interaction systems are primarily optimized for high-resource languages with abundant training data and mature acoustic models. In contrast, under resourced languages often suffer from limited model robustness and reduced inference stability [7]. As a representative minority language, Mongolian faces additional challenges in practical deployment, including delayed response generation and unstable speech recognition performance in real world interaction scenarios.

### C. Research Approach

This paper develops an AI-powered design for virtual environments, with particular emphasis on voice capture enhancement, acoustic preprocessing optimization,

multilingual coordination, and speech-driven synchronization strategies.

Compared with computationally intensive deep generative facial animation methods [8], [9], the proposed method operates within a lightweight viseme-based mapping framework and is therefore suitable for deployment on standalone VR devices. Its stability and feasibility were further verified through real world implementation on commercial VR hardware.

## II. RESEARCH TECHNIQUES

This chapter introduces an model for virtual character interaction systems in VR environments. End-to end audiovisual interaction modeling has been widely studied in speech driven animation and human computer interaction research [10], [11], where synchronization consistency plays a critical role in perceived realism. By incorporating the practical characteristics of Mongolian speech interaction and the constraints of real time VR deployment, this chapter clarifies the key modeling assumptions and methodological choices underlying the proposed system. The resulting abstraction establishes a theoretical basis for subsequent implementation and experimental evaluation.

During end-to-end modeling, an intermediate viseme representation layer is introduced to jointly model lip articulation and speech output. Viseme based abstraction has been widely adopted in audiovisual speech research because it reduces phoneme level complexity while preserving visually distinguishable articulation units [12]. This intermediate layer links acoustic speech signals to the lip parameters of the virtual character within a compact articulation space, thereby enabling system level analysis of speech lip animation synchronization.

Furthermore, the viseme representation layer facilitates efficient speech-driven lip animation under language-specific phonetic constraints, particularly for under-resourced languages such as Mongolian [7]. Compared with deep generative facial animation frameworks, this structured abstraction provides stronger computational controllability and better deployment feasibility on standalone VR hardware.

As illustrated in Figure 1, the virtual voice dialogue model is modeled as a sequential end-to-end information-processing pipeline. The system begins with user speech acquisition and preprocessing, followed by speech recognition (STT), dialogue understanding and generation (LLM), and speech synthesis (TTS).

The final output is a spoken response synchronized with lip movements, gestures, and facial expressions. Multimodal synchronization across these stages is essential for maintaining perceptual coherence in immersive environments [3]. Compared with conventional desktop based voice systems, VR interactions occur at close range, where speech lip desynchronization and unnatural mouth movements are more visually noticeable.

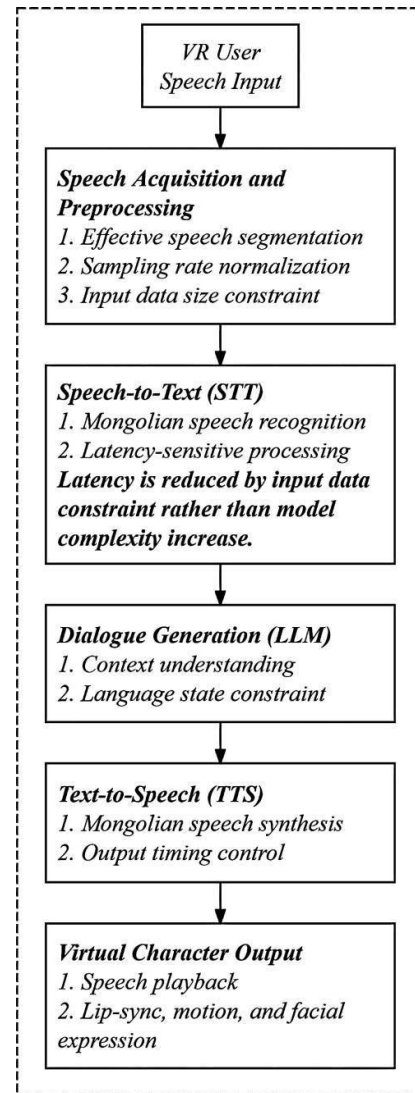


Figure 1. Schematic diagram of end-to-end modeling for a voice dialogue system of virtual characters in a VR scene oriented toward Mongolian

## III. IMPLEMENTATION OF VISEME LIP MAPPING FOR MONGOLIAN SPEECH

Within the AI-Enhanced VR model, and considering both the limited maturity of Mongolian acoustic models and the strict latency constraints of VR deployment, this study avoids computationally intensive phoneme-level alignment and deep generative facial animation approaches [8], [9]. Instead, a viseme-based modeling strategy is adopted, combining lightweight acoustic analysis with rule-based articulation mapping.

This chapter describes the main technical implementation of the Mongolian speech interaction system in VR environments. Given the phonetic characteristics of Mongolian and the strict real-time requirements of VR applications, the proposed implementation emphasizes two core components: lip-movement generation and speech synthesis. The overall

implementation process proceeds from problem analysis to structural design, algorithm development, and subsequent optimization.

*A. The Basic Implementation Principle of Mongolian Speech Driving Lip Movement*

In virtual voice interaction systems, lip synchronization aims to generate real-time mouth movements aligned with speech sounds, thereby improving visual naturalness and perceived immersion [3], [5]. Traditional viseme driven animation frameworks are primarily designed for English or Chinese phonetic distributions and are typically based on five canonical vowel articulation units, namely A, E, I, O, and U [5], [6]. Coarticulation modeling further refines the transitions between these articulation states.

However, the Mongolian vowel system includes multiple vowels, namely /a, э, и, о, у, ө, ү/, among which /ө/ and /ү/ function as front rounded vowels that are not adequately represented in the standard five vowel articulation model. As a result, direct application of the standard framework leads to insufficient representation of Mongolian rounded labial articulatory features. To address this limitation, the present study seeks to achieve effective articulatory representation of Mongolian vowels through audio analysis and rule based mapping, without introducing highly complex phoneme-level alignment models.

Instead of introducing additional BlendShape parameters or adopting computationally intensive phoneme level animation models, the proposed method approximates Mongolian specific vowel articulation within the existing five vowel articulation space through interpolation-based rules.

*B. Method of vowel discrimination in Mongolian based on audio analysis*

Given the real time requirements of standalone VR systems, the proposed framework avoids forced phoneme alignment and attention based sequential modeling. Instead, vowel discrimination is performed using short term acoustic energy features and frame-level RMS analysis. This design is inspired by classical speech-recognition preprocessing pipelines.

The resulting lightweight acoustic feature extraction method provides an efficient basis for vowel classification while maintaining relatively low computational cost, which is consistent with the requirements of real time VR deployment.

*C. Mongolian vowel viseme blendshape mapping and interpolation*

To address this limitation, Mongolian vowel articulation is modeled as an interpolation problem within the existing five dimensional viseme space. Instead of introducing additional BlendShape channels, the proposed method approximates these vowels by combining existing vowel templates. As shown in Table 1, two target rounded vowel categories are defined for mapping: OE for /ө/ and UI for /ү/. Accordingly, /ө/ is

approximated through O–E interpolation, while /ү/ is approximated through U–I interpolation.

TABLE 1. PRIMARY LIP-SHAPE TEMPLATES (BLEND SHAPE CHANNELS)

Channel	A (a)	E (э)	I (и)	O (о)	U (у)	OE (ө)	UI (ү)
Primary	Open	Flat	Spread	Round	Tight	Front-round	High-round

OE is used for /ө/, and UI is used for /ү/.

Table 1 summarizes the primary BlendShape dimensions that characterize fundamental mouth-shape deformation patterns in the virtual character model, including mouth opening, lateral spreading, lip rounding, and tight rounding. Together, these dimensions constitute the foundational lip articulation space of the system. Although the table defines the target rounded-vowel categories OE (/ө/) and UI (/ү/), the current avatar model does not provide independent channels for these Mongolian-specific vowels. Consequently, the lip movements of /ө/ and /ү/ cannot be generated directly and are instead approximated through interpolation within the basic five vowel lip shape space.

To support rule based articulatory generation, this study further defines a set of basic articulatory weight templates. Table 2 presents the weight mapping of Mongolian vowels within the five-dimensional articulation space (A,E,I,O,U), providing reference values for subsequent interpolation.

TABLE 2. WEIGHT MAPPING (0–1) FOR BLENDSHAPES

Mongolian	IPA	type	A	E	I	O	U
a	/a/	B	1.00	0.10	0.00	0.00	0.00
э	/e/	B	0.10	1.00	0.10	0.00	0.00
u	/i/	B	0.00	0.10	1.00	0.00	0.00
o	/o/	B	0.20	0.00	0.00	1.00	0.25
y	/u/	B	0.05	0.00	0.00	0.35	1.00
ө	/ө/	int	-	O-E	-	-	-
ү	/ү/	int	-	-	U-I	-	-

IPA = International Phonetic Alphabet; B = basic vowel; int = interpolated vowel. O–E denotes interpolation between O and E, and U–I denotes interpolation between U and I.

The weight mapping table does not directly generate the final lip movements for all Mongolian vowels. Instead, it provides a stable and consistent set of articulatory reference values for the interpolation algorithm. These predefined weights help preserve continuity and consistency across different speech segments.

Based on this weight template, the system applies linear interpolation to approximate Mongolian-specific vowels within the existing five-vowel lip-shape space, without introducing new articulation channels. The vowel / $\text{ө}$ / is treated as a front rounded mid vowel and is approximated through O–E interpolation. Similarly, / $\text{ү}$ / is treated as a front rounded high vowel and is approximated through U – I interpolation. This interpolation strategy provides a practical balance between phonetic characteristics and engineering feasibility, enabling the system to represent Mongolian-specific vowels while retaining the original articulation structure.

To represent lip articulation within the five-dimensional Blend Shape space [12], each frame is modeled as a weight vector

$$W_t \in [0,1]^5 \quad (1)$$

where each component corresponds to one of the vowel channel {A,E,I,O,U}.

Rather than introducing additional articulation parameters for Mongolian-specific vowels, the proposed method defines a mapping function  $\Phi(v)$  within the existing five-vowel space:

$$\Phi(v) = \begin{cases} \alpha W_O + (1-\alpha)W_E, & v \in \{\text{a,e,i,o,u}\} \\ \alpha W_U + (1-\alpha)W_I, & v = \text{ө} \\ & v = \text{ү} \end{cases} \quad (2)$$

The coefficient  $\alpha$  is the interpolation parameter that controls the relative contribution of the two base vowel templates. In this study,  $\alpha=0.65$  is used for both O–E and U–I interpolation. This setting assigns slightly greater weight to the rounded-vowel-related channel, thereby preserving the visual prominence of lip rounding while maintaining a reasonable influence from the neighboring front-vowel articulation. Empirically, this value provided a stable balance between roundedness and visual naturalness in the tested Mongolian utterances.

For the five standard vowels, the mapping directly selects the corresponding base template. Since the Mongolian rounded vowels / $\text{ө}$ / and / $\text{ү}$ / are not associated with dedicated mouth-shape parameters in the original avatar model, they are approximated through O–E and U–I interpolation, respectively.

To account for speech intensity and temporal continuity, the final lip configuration is updated according to:

$$W_t = \beta W_{t-1} + (1-\beta)g_t\Phi(v) \quad (3)$$

The parameter  $\beta$  is the temporal smoothing coefficient in the recursive update rule. In this study,  $\beta=0.70$  is used to balance responsiveness and temporal stability. A larger  $\beta$  produces smoother lip transitions but slower response to rapid articulation changes, whereas a smaller  $\beta$  increases responsiveness at the cost of greater frame-to-frame fluctuation. The selected value was determined empirically to achieve stable lip motion while preserving real-time visual continuity in VR interaction.

The condition belongs to  $g_t \in [0,1]$  is an energy-dependent scaling factor derived from frame-level RMS values and  $\beta \in (0,1)$  is the temporal smoothing coefficient controlling the balance between responsiveness and stability.

This iterative formulation preserves frame-to-frame continuity while allowing the target articulation and its intensity to adapt dynamically over time. As a result, vowel selection, Mongolian-specific interpolation, amplitude modulation, and temporal smoothing are incorporated into a unified mathematical framework.

In the running program, the mapping rule in (2) is implemented by first checking whether the current frame contains the Mongolian rounded vowels / $\text{ө}$ / or / $\text{ү}$ /. If / $\text{ө}$ / is detected, the target vector is computed as  $\alpha W_O + (1-\alpha)W_E$ ; if / $\text{ү}$ / is detected, it is computed as  $\alpha W_U + (1-\alpha)W_I$ . Otherwise, the system falls back to the standard five-vowel case and directly selects the corresponding base template. The energy term  $g_t$  is then computed from the maximum activation among the five vowel channels, and the update in (3) is applied independently to the A, E, I, O, and U dimensions. After normalization, the resulting weights are assigned to the avatar's BlendShape controller for real-time lip animation.

#### IV. RESULTS AND DISCUSSION

This chapter experimentally validates the proposed speech-driven lip-mapping method for Mongolian in a real virtual reality voice interaction environment. Rather than focusing on system architecture or algorithm derivation, the experiments demonstrate the method's improvements in lip stability and visual consistency through comparative analysis of experimental phenomena and results.

##### A. System Interface and Runtime Environment

The proposed system was implemented on the Unity platform and deployed on the PICO 4 VR device. Figure 2 illustrates the main runtime interface of the developed virtual character dialogue system. The interface supports multilingual interaction (Mongolian, English, Chinese), text input, speech input, and real-time avatar animation within a social VR environment.



Figure 2. Runtime interface of the developed VR dialogue system

The lip movements are controlled according to the mapping method described in Chapter III, operating within a fixed five dimensional articulation space derived from the viseme representation. Deployment on standalone VR hardware further demonstrates that the proposed lightweight interpolation method is computationally feasible compared with more intensive deep facial animation approaches.

B. Experiment setup

To improve the representativeness of the evaluation, this study uses multiple Mongolian test utterances rather than a single sentence. The selected utterances were designed to cover the two target rounded vowels / $\theta$ / and / $\gamma$ / under different phonetic conditions, including word-initial, word medial, and mixed position occurrences. This design allows the experiment to examine whether the proposed mapping method remains effective across different articulation contexts rather than only for one isolated example.

TABLE 3. MONGOLIAN TEST UTTERANCES USED IN THE EXPERIMENT

Sentence ID	Test utterance	Target vowel	Position	Purpose
S1	Өнөөдөр би ном уншина.	/ $\theta$ /	initial, medial	test / $\theta$ / in natural sentence context
S2	Бид өглөө сургууль руу явна.	/ $\theta$ /	medial	test / $\theta$ / in continuous articulation
S3	Үдээс хойш хүйтэн салхи үлээнэ.	/ $\gamma$ /	initial, medial	test / $\gamma$ / in repeated rounded-vowel articulation
S4	Чи өнөөдөр гэртээ үлдэх үү?	/ $\gamma$ /	medial, final	test / $\gamma$ / in interrogative speech

S5	Өглөө бүр уулзах үү?	/ $\theta$ /, / $\gamma$ /	mixed position s	test combined rounded-vowel response
----	----------------------	----------------------------	------------------	--------------------------------------

The / $\theta$ / and / $\gamma$ / denote the two target Mongolian rounded vowels used in the experiment. Position indicates whether the target vowel occurs in the initial, medial, final, or mixed position within the utterance.

Table 3 lists five Mongolian test utterances used in the experiment. The selected sentences were designed to cover the target rounded vowels / $\theta$ / and / $\gamma$ / under different phonetic conditions, including initial, medial, final, and mixed position occurrences in natural daily speech. This design allows the evaluation to examine whether the proposed mapping method remains effective across multiple articulation contexts rather than only for a single sentence.

For each utterance, frame level CSV data were exported during runtime, including the activation values of A, E, I, O, and U, together with the roundness proxy used for comparative analysis. The experimental comparison therefore evaluates the consistency of rounded-vowel-related channel responses across different sentence conditions.

C. Comparative Analysis of Interpolation Response

The comparative analysis was conducted across multiple Mongolian test utterances containing / $\theta$ / and / $\gamma$ / in different phonetic positions. Overall, the proposed mapped method showed more stable rounded-vowel-related channel responses than the baseline method across all tested sentences. Although the detailed response trajectories vary depending on the phonetic context of each utterance, the same general pattern was consistently observed: the mapped method produced stronger and smoother rounded-lip responses for Mongolian-specific vowels.

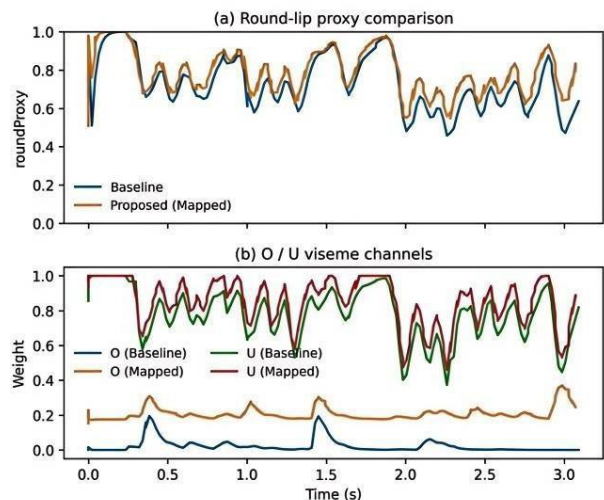


Figure 3. Comparative interpolation response for Mongolian rounded vowels

Figure 3 shows a representative example from the test set. The baseline and proposed methods produce

different temporal response trajectories during speech playback. The curves are derived from frame-level viseme weights and reflect the articulatory behavior of the Mongolian rounded vowels / $\theta$ / and / $\gamma$ /. Similar patterns were also observed in other test utterances.

Under the baseline method, direct use of the basic vowel channels causes noticeable fluctuations, abrupt drops, and jitter during speech transitions, reducing the naturalness and temporal consistency of lip movements. In contrast, with Mongolian lip mapping enabled, the response-proxy values are computed through weighted interpolation of the O/E and I/U channels, resulting in smoother and more stable trajectories, especially in regions containing / $\theta$ / and / $\gamma$ /, without increasing model complexity.

Overall, the preliminary user study supports the effectiveness of the proposed method from a perceptual perspective. Together with the quantitative analysis, the results indicate that the interpolation based mapping improves the visual plausibility of Mongolian speech-driven lip animation while remaining suitable for lightweight real-time VR interaction.

#### CONCLUSION

This study presented the AI-Enhanced VR model with Mongolian Speech Driven Lip-Sync Mapping. To address the insufficient representation of Mongolian rounded vowels in conventional five-vowel lip models, a lightweight interpolation-based mapping method was proposed within the original viseme articulation space.

In the proposed framework, / $\theta$ / is approximated through O–E interpolation and / $\gamma$ / through U–I interpolation, allowing Mongolian-specific rounded-vowel articulation to be represented without introducing additional BlendShape channels or computationally intensive phoneme-level animation models.

Overall, the results demonstrate that the proposed interpolation based mapping provides a practical and computationally efficient solution for Mongolian lip-sync in immersive VR interaction. Future work will further expand perceptual evaluation and improve the accuracy of Mongolian-specific mouth shape reconstruction.

#### ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to express sincere gratitude to Dr. Tuyatsetseg Badarch for her guidance, valuable suggestions, and continuous support throughout the completion of this research.

The author also gratefully acknowledges the Mongolian University of Science and Technology (MUST) for providing the academic resources and research environment that supported this work.

#### REFERENCES

- [1] J. Jerald, *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality*. San Rafael, CA, USA: Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool, 2015.
- [2] M. Slater and M. V. Sanchez-Vives, “Enhancing our lives with immersive virtual reality,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 3, Art. no. 74, 2016.
- [3] X. Wei, X. Jin, and M. Fan, “Communication in Immersive Social Virtual Reality: A Systematic Review of 10 Years’ Studies,” in *Chinese CHI ’22: The Tenth International Symposium of Chinese CHI*, 2022, pp. 27–37.
- [4] A. Radford, J. W. Kim, T. Xu, G. Brockman, C. McLeavey, and I. Sutskever, “Robust speech recognition via large-scale weak supervision,” in *Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning (ICML)*, vol. 202, 2023, pp. 28492–28518.
- [5] P. Edwards, C. Landreth, E. Fiume, and K. Singh, “JALI: An animator-centric viseme model for expressive lip synchronization,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 35, no. 4, pp. 1–11, 2016.
- [6] H. L. Bear, R. Harvey, and B.-J. Theobald, “Phoneme-to-viseme mappings: The good, the bad, and the ugly,” *Speech Communication*, vol. 95, pp. 40–67, 2017.
- [7] L. Besacier, E. Barnard, A. Karpov, and T. Schultz, “Automatic speech recognition for under-resourced languages: A survey,” *Speech Communication*, vol. 56, pp. 85–100, 2014.
- [8] D. Jiang, J. Chang, L. You, S. Bian, R. Kosk, and G. Maguire, “Audio-Driven Facial Animation with Deep Learning: A Survey,” *Information*, vol. 15, no. 11, Art. no. 675, 2024.
- [9] T. Karras, S. Laine, M. Aittala, J. Hellsten, J. Lehtinen, and T. Aila, “Audio-driven facial animation by joint end-to-end learning of pose and emotion,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 36, no. 4, 2017.
- [10] Y. Hu, R. Li, C. Chen, C. Qin, Q. Zhu, and E. S. Chng, “Hearing Lips in Noise: Universal Viseme-Phoneme Mapping and Transfer for Robust Audio-Visual Speech Recognition,” in *Proceedings of the 61st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL 2023)*, 2023, pp. 15220–15234.
- [11] Y. Zhou, Z. Liu, C. C. Loy, and X. Tang, “Talking face generation by adversarially disentangled audio-visual representation,” *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 33, pp. 9299–9306, 2019.
- [12] J. P. Lewis, K. Anjyo, T. Rhee, M. Zhang, F. Pighin, and Z. Deng, “Practice and theory of blendshape facial models,” in *Eurographics State of the Art Reports*, 2014, pp. 199–218.

# 5G БОЛОН ТҮҮНЭЭС ХОЙШХИ ҮЕИЙН ХӨДӨЛГӨӨНТ ХОЛБООНЫ СИСТЕМИЙН СПЕКТР МЕНЕЖМЕНТИЙН ХАРЬЦУУЛСАН СУДАЛГАА

Бямбажавын ЦЭРЭНДУЛАМ<sup>1</sup>, Жигжидсүрэнгийн ЖАВЗАНСҮРЭН<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Монгол Улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн их сургууль, Холбооны инженерчлэлийн тэнхим

*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг tseegi0312@gmail.com<sup>1</sup>*

**Хураангуй:** Утасгүй холбооны технологийн хөгжил хурдацтай нэмэгдэж, хөдөлгөөнт холбооны 5G болон түүнээс хойшхи (Beyond 5G, 6G) сүлжээнүүд нь өндөр хурд, бага саатал, өргөн зурвасын холболтыг шаардах болсон. Үүний үр дүнд радио давтамжийн спектрийг үр ашигтай хуваарилах нь чухал асуудал болж байна. Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь 5G болон ирээдүйн сүлжээнүүдэд ашиглагдаж буй спектр менежментийн бодлогыг харьцуулан судалж, дэлхийн улс орнуудын хэрэгжүүлж буй зохицуулалтын арга барилыг судлахад оршино. Судалгаанд спектрийн хуваарилалт, лицензийн бодлого, динамик спектрийн хуваалцах механизм зэрэг хүчин зүйлсийг авч үзсэн. Судалгааны үр дүн нь спектрийн үр ашигтай ашиглалтыг нэмэгдүүлэхэд чиглэсэн бодлогын зөвлөмж боловсруулахад ач холбогдолтой.

**Түлхүүр үг:** *key differences, 6G challenges, and best practices, THz band*

## I. УДИРТГАЛ

Олон улсын цахилгаан холбооны байгууллагаас хөдөлгөөнт холбооны 5 дахь үеийн (5G) стандартыг 2012 оноос хөгжүүлж, 5G үйлчилгээ 2019 оноос эхлэн олон улсад нэвтрээд байна. 5G нь өнөөгийн бидний хэрэглэж буй өндөр хурдны хөдөлгөөнт интернэтийн 4G/LTE үйлчилгээний дараагийн буюу 5 дахь үе юм. Хөдөлгөөнт холбооны технологийн хөгжил дараагийн үе рүү шилжихдээ өгөгдөл дамжуулах илүү өндөр хурд, их багтаамж, илүү бага хоцролт, давтамжийн оновчтой, үр ашигтай дамжуулал, сүлжээг хуваан ашиглах уян хатан шийдэл, үйлчилгээний илүү өндөр чанарыг үзүүлэлтүүдийг бий болгосоор байна. 5G систем нь зүйлсийн интернэт, M2M холболтын болон аж үйлдвэрийн салбаруудын цахим шилжилтийг дэмжих шийдэл, технологид суурилсан дижитал нийгэм, дижитал ажлын байрыг нэвтрүүлэх замаар ДНБ-ийг нэмэгдүүлэх, улмаар дижитал эдийн засгийг хөгжүүлэх өргөн боломж олгож байгаагаар онцлогтой. Хөдөлгөөнт холбооны технологийн хөгжлийн явцад өгөгдлийн хэрэглээ огцом өсөж, өндөр хурд, бага саатал, найдвартай холболтын эрэлт дэлхий даяар нэмэгдэж байна. Ялангуяа 5G (IMT-2020) системийн нэвтрэлт эрчимжсэнээр:

- ухаалаг хот (smart city),
- хиймэл оюун ухаанд суурилсан үйлчилгээ,
- IoT (Internet of Things),
- Автоматжуулсан үйлдвэрлэл зэрэг шинэ хэрэглээний шаардлага бий болсон.

Гэвч эдгээр шаардлагыг хангахад радио давтамжийн спектр нь хязгаарлагдмал нөөц тул түүнийг үр

ашигтай, оновчтой удирдах асуудал улам бүр чухал болж байна. Олон улсын түвшинд International Telecommunication Union болон 3rd Generation Partnership Project зэрэг байгууллагууд спектрийн зохицуулалтын бодлого, стандартуудыг боловсруулж, Дэлхийн радио холбооны их хурал-2019, 2023 (цаашид ДРХИХ гэх) хурлуудаар шинэ радио давтамжийн зурвасуудыг тодорхойлсон байна. Гэсэн хэдий ч улс орнуудын спектрийн бодлого, хэрэгжилт нь харилцан адилгүй байгаа нь технологийн хөгжилд ялгаа үүсгэж байна.

Шинэлэг технологиуд болон урьд өмнө байгаагүй боломжуудыг нээж өгөх амлалтыг агуулсан **IMT-2030** нь хөдөлгөөнт холбооны дараагийн үеийг төлөөлж байна. Олон улсын цахилгаан холбооны байгууллагаас хөдөлгөөнт холбооны (IMT) хүрээнд 6G технологийг **Radiocommunication Assembly 2023**-ын (RA-23) үеэр албан ёсоор **“IMT-2030”** хэмээн нэрлэсэн. [1]. Спектрийн менежмент нь орчин үеийн утасгүй холбооны системийн салшгүй хэсэг бөгөөд хязгаарлагдмал нөөцийг оновчтой ашиглахад чиглэгддэг. Цаашид 6G системийн хөгжилтэй уялдан спектр менежмент нь илүү уян хатан, ухаалаг, автоматжсан хэлбэрт шилжих шаардлагатай байна. Мөн 6G систем нь дэлхийн улс орнууд болон тэдгээрийн зохицуулах байгууллагуудад лиценз олголт, өрсөлдөөн, зах зээлийн нөлөөлөл, хэрэглэгчийн эрхийг хамгаалахтай холбоотой шинэ сорилтуудыг үүсгэж байна. 2030 онд нэвтрүүлэхээр төлөвлөгдөж буй 6G системийн онцлог давтамжийн хуваарилалтыг судлах зорилтыг дэвшүүлсэн.

## II. СУДЛАГДСАН БАЙДЛЫН ТОВЧООН

## I-P ХҮСНЭГТ

1.	Ref.	Year	Area of Research in 6G	Contributions
2.	W. Saad et al.	2019	Applications, trends, technologies, and open research problems	6G технологийн талаарх ойлголт болон хөгжлийг мэдэгдэхүйц нэмэгдүүлэхэд хувь нэмэр оруулж, нэгдсэн (цогц) алсын харааг дэвшүүлэн, хөгжлийг хөтлөх хүчин зүйлс ба гүйцэтгэлийн шаардлагуудыг тодорхойлж, боломжит технологиудыг судалсан.
3.	B. Zong et al.	2019	Key drivers, core requirements, system architectures, and enabling technologies	6G-ийн хөгжлийг хөтлөх хүчин зүйлсийг тодорхойлж, боломжит технологи болон архитектуруудыг судалж, хүртээмжтэй хэт өргөн зурвасын сүлжээ, өндөр хурдтай бага сааталтай холбоо, мөн өндөр өгөгдлийн нягтралын хэрэгцээг онцолсон байна.
4.	K. B. Letaief	2019	AI-empowered wireless networks for 6G	6G сүлжээг зохион бүтээх, оновчтой болгоход хиймэл оюун ухааны үүргийг онцолж, 5G-технологис хойших дараагийн үеийнхний замын зургийг тодорхойлсон.
5.	Zhang et al.	2019	Vision, requirements, architecture, and key technologies for 6G	6G утасгүй сүлжээний алсын хараа, шаардлага, архитектур болон гол технологийг судалсан.
6.	T. S. Rappaport et al.	2019	Wireless communications and applications above 100 GHz: Opportunities and challenges for 6G and beyond	Утасгүй холбооны системд 100 ГГц-ээс дээш давтамжийн боломжийг судалж, 6G болон түүнээс цаашхи бэрхшээл, боломжуудын талаар хэлэлцэнэ.
7.	T. Huang et al.	2019	A survey on green 6G network: Architecture and technologies	Ногоон 6G сүлжээний архитектур, технологийн талаарх цогц судалгааг танилцуулж, тогтвортой сүлжээний архитектурын өөрчлөлт болон холбогдох технологийг онцолсон.
8.	L. Bariah et al.	2019	Key enabling technologies, applications, and open research topics in 6G networks	6G сүлжээнд хэрэглэгдэж буй гол технологиуд болон тэдгээрийн боломжит хэрэглээний талаар бэрхшээл, нээлттэй судалгааны асуудлуудыг онцолсон.
9.	M. Alsabah et al.	2019	6G wireless communications networks: A comprehensive survey	6G сүлжээнд зориулсан гол боломжит технологийн цогц тойм, түүний үйл ажиллагааны зарчим, хэрэглээ болон бэрхшээлүүдийн талаар судалсан.
10.	I. F. Akyildiz et al.	2020	Future of wireless communication systems	6G-ийн хэрэглээ, шаардлага, технологи, судалгааны чиглэлийг хамарсан цогц судалгааг хийсэн.
11.	M. Z. Chowdhury et al.	2020	Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions	6G-ийн хэрэглээ, шаардлага, технологи, бэрхшээл, судалгааны чиглэл зэрэг янз бүрийн талыг цогцоор нь хамарсан.
12.	F. Tariq et al.	2020	Speculative study on 6G	6G технологийг судалж, 5G-ээс гаднах боломжит технологийг тодорхойлж, алсын хараатай хэрэглээний тохиолдлуудыг танилцуулж, оптик эрин үе рүү шилжих шилжилтийн талаар судалсан.
13.	G. Gur et al.	2020	Exploiting spectrum sharing for capacity boost and 6G vision	Спектр хуваалцах асуудлууд, аюулгүй байдлын үр дагавар, тархсан дэвтрийн технологи болон машин сургалт зэрэг идэвхжүүлэгч хүчин зүйлсийг судалсан.
14.	M. Giordani et al.	2020	Toward 6G networks: Use cases and technologies	Утасгүй сүлжээг 6G руу чиглүүлэх боломжит хэрэглээний тохиолдлууд болон технологийг судална.
15.	S. Chen et al.	2020	Vision, requirements, and technology trend of 6G	6G-ийн алсын хараа, шаардлага, технологийн чиг хандлагын талаар цогц хэлэлцүүлгийн талаар судалсан.
16.	X. You et al.	2021	Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts	6G-ийн сүүлийн үеийн дэвшил, ирээдүйн чиг хандлагын талаарх цогц судалгааг хийсэн.
17.	C. De Alwis et al.	2021	Trends, applications, technologies, challenges, and research directions	6G-ийн чиг хандлага, хэрэглээ, шаардлага, технологи болон ирээдүйн судалгааны чиглэлийг судалдаг.
18.	W. Jiang et al.	2021	Advancements, challenges, and research directions in the field of 6G wireless communication systems	Одоо байгаа 5G сүлжээний хязгаарлалтыг авч үзэж, 6G-ийн хөгжлийг хөдөлгөж буй гол хүчин зүйлсийг онцолсон.
19.	H. H. H. Mahmoud et al.	2021	Comprehensive survey on technologies, applications, challenges, and research problems	6G- сүлжээтэй холбоотой системийн шаардлага, чиг хандлага, технологи, үйлчилгээ, судалгааны дэвшлийн талаарх цогц тоймыг судалсан.
20.	K. B. Letaief et al.	2021	Edge artificial intelligence for 6G	6G сүлжээнд хиймэл оюун ухааны үүргийг судалж, ашиг тус, бэрхшээл, судалгааны чиглэлийг онцолсон.
21.	H. Tataria et al.	2021	Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities	6G сүлжээ утасгүй системийн алсын хараа, шаардлага, бэрхшээл, ойлголт, боломжуудын талаарх цогц тоймыг өгдөг.

### III. ОЛОН УЛСЫН РАДИО ДАВТАМЖИЙН СПЕКТР ТӨЛӨВЛӨЛТ

Олон улсын цахилгаан холбооны байгууллага (цаашид ОУЦХБ гэх) нь хөдөлгөөнт болон хөдөлгөөнт бус холбоо, өргөн нэвтрүүлэг, сонирхогчдын холбоо, сансар судлал, гамшгийн үеийн холбоо, цаг уур, глобал байрлал тодорхойлох систем, байгаль орчны ажиглалтад хэрэглэгдэж байгаа радио давтамжийн спектр болон хиймэл дагуулын орбитын нэгдсэн бодлого, төлөвлөлтийг хийдэг. Дэлхийн улс орнуудыг газарзүйн байршлаар нь радио давтамжийн хуваарилалтын 3 бүс болгон хуваадаг. Радио давтамжийн спектр төлөвлөлтийн үйл ажиллагаа нь тухайн гишүүн орон ОУЦХБ-ын үйл ажиллагаанд идэвхтэй оролцох замаар олон улсын түвшинд хийгддэг. [2].

1-р зураг. ОУЦХБ-ын радио давтамжийн хуваарилалтын бүсүүд



Спектрийн менежмент гэдэг нь радио давтамжийн спектрийг хуваарилах, зохицуулах, үр ашигтай ашиглах үйл явц юм. Ирээдүйд спектрийн менежмент нь улам “ухаалаг” болж, хиймэл оюун ухаанд суурилсан (AI-д суурилсан спектрийн оновчлол, Реал-тайм динамик хуваарилалт) шийдлүүд давамгайлах төлөвтэй байна. [3].

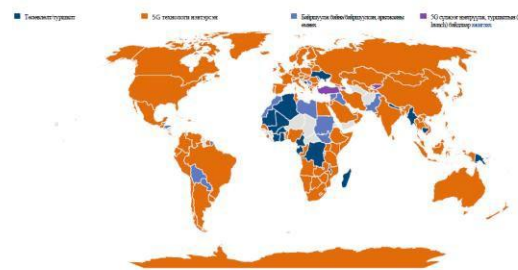
### III. ДЭЛХИЙН УЛС ОРНУУДЫН 5G СҮЛЖЭЭНИЙ РАДИО ДАВТАМЖИЙН ХУВААРИЛАЛТ

НҮБ-ын мэдээлэл, харилцаа холбооны технологийн чиглэлээр мэргэшсэн байгууллага болох ОУЦХБ нь дэлхийн радио давтамжийн спектрийг хуваарилах тогтолцоог бүрдүүлж, олон улсын үвшинд радио давтамжийн спектрийг сүлжээ төхөөрөмжүүд хоорондын саадгүй холбоо тогтоох уялдааг хангахад чиглэж ажилладаг. ОУЦХБ-аас 3-4 жил тутамд 1 удаа зохион байгуулдаг Дэлхийн Радио холбооны Их хурлаар гишүүн 193 орны бүрэлдэхүүнтэйгээр Дэлхийн Радио холбооны Дүрмийг хэлэлцэн шинэчлэн баталдаг. 2019 онд зохион байгуулагдсан Дэлхийн Радио холбооны Их хурлаар IMT2020 буюу 5G технологид ашиглагдах радио давтамжийн нэмэлт зурвасыг албан ёсоор баталгаажуулсан. [4] Мөн Дэлхийн хөдөлгөөнт холбооны тоног төхөөрөмж үйлдвэрлэгчдийн ассоциаци буюу Global mobile Suppliers Association (GSA) нь дэлхий даяар нэвтрэч буй Хөдөлгөөнт холбооны сүлжээний нэвтрэлтийн

нөхцөл байдлыг тогтмол судлан мэдээллэдэг. Тус байгууллагаас мэдээлсэнээр 2025 оны жилийн эцсийн байдлаар дэлхий даяар 193 орны 643 үүрэн холбооны оператор 5G систем судлах, турших, төлөвлөх, суурилуулалтыг эхлүүлэх, үйлчилгээг зах зээлд нэвтрүүлэхэд бэлтгэх, нэвтрүүлэх зэрэг ажлыг хийж байгаагаас 143 орны 374 оператор компани 5G үүрэн холбооны үйлчилгээг зах зээлд нэвтрүүлсэн. Эдгээрээс 182 оператор компани бие даасан сүлжээ (5G SA) байгуулахаар бэлтгэж эхэлсэнээс 93 оператор компани ашиглалтад оруулаад байна. [5].

2-р зураг. 5G технологи нэвтрэлтийн байдал

5G сүлжээнд операторуудын хөрөнгө оруулалтын газрын зураг (2025.10 сар)



© 2025 Global mobile Suppliers Association

2025 оны байдлаар 3777 төрлийн 5G төхөөрөмж, 2034 төрлийн гар утас, 3377 төрлийн төхөөрөмж зах зээл дээр худалдаалагдаж байна.

Хөдөлгөөнт холбооны технологийн хөгжлийн явцад өгөгдлийн хэрэглээ огцом өсөж, өндөр хурд, бага саатал, найдвартай холболтын эрэлт дэлхий даяар нэмэгдэж байна. Ялангуяа 5G (IMT-2020) сүлжээний нэвтрэлт эрчимжсэнээр:

- ухаалаг хот (smart city),
- хиймэл оюун ухаанд суурилсан үйлчилгээ,
- IoT (Internet of Things),
- Автоматжуулсан үйлдвэрлэл зэрэг шинэ хэрэглээний шаардлага бий болсон.

Гэвч эдгээр шаардлагыг хангахад радио давтамжийн спектр нь хязгаарлагдмал нөөц тул түүнийг үр ашигтай, оновчтой удирдах асуудал улам бүр чухал болж байна. ОУЦХБ болон 3GPP зэрэг байгууллагууд спектрийн зохицуулалтын бодлого, стандартуудыг боловсруулж, ДРХИХ2019, 2023 хурлуудаар шинэ давтамжийн зурвасуудыг тодорхойлдог. Гэсэн хэдий ч улс орнуудын спектрийн бодлого, хэрэгжилт нь харилцан адилгүй байгаа нь технологийн хөгжилд ялгаа үүсгэж байна. Нөгөөтэйгүүр, ирээдүйн 6G (IMT-2030) сүлжээ нь:

- Tbps түвшний хурд
- ultra-low latency
- holographic communication
- хиймэл оюун ухаанд суурилсан сүлжээ зэрэг шинэ шаардлагуудыг бий болгож байгаа бөгөөд энэ нь улам өндөр давтамжийн зурвас (FR3, mmWave, Terahertz)-ийг ашиглах хэрэгцээг нэмэгдүүлж байна.

Ийм нөхцөлд 5G болон 6G сүлжээний спектрийн менежментийг харьцуулан судлах нь спектрийн үр ашигтай хуваарилалтыг тодорхойлох, ирээдүйн сүлжээний хөгжлийн чиг хандлагыг тодруулах, үндэсний болон олон улсын бодлогын уялдаа холбоог сайжруулах чухал ач холбогдолтой юм.

5G системд ашиглагддаг радио давтамжийн зурвасуудыг Дэлхийн Радио холбооны Их хурлаар (WRC-19) IMT2020 буюу 5G технологид нэмэлт спектр баталсан бөгөөд хөдөлгөөнт холбооны стандартчиллын 3GPP байгууллагаас 5G технологид радио давтамжийн дараах нам, дунд, өндөр зурвасуудыг ашиглахаар стандартчилсан.

**5G-Д АШИГЛАГДДАГ НАМ ДАВТАМЖИЙН ЗУРВАСУУД**

2-Р ХҮСНЭГТ

NR Operating Band	Uplink		Downlink		Duplex Mode
	Low	High	Low	High	
n71	663 MHz	698 MHz	617 MHz	652 MHz	FDD
n28	703 MHz	748 MHz	758 MHz	803 MHz	FDD
n5	824 MHz	849 MHz	869 MHz	894 MHz	FDD
n8	880 MHz	915 MHz	925 MHz	960 MHz	FDD

**5G-Д АШИГЛАГДДАГ ӨНДӨР ДАВТАМЖИЙН ЗУРВАСУУД**

3-Р ХҮСНЭГТ

NR Operating Band	Uplink		Downlink		Duplex Mode
	Low	High	Low	High	
n1	1920 MHz	1980 MHz	2110 MHz	2170 MHz	FDD
n2	1850 MHz	1910 MHz	1930 MHz	1990 MHz	FDD
n3	1710 MHz	1785 MHz	1805 MHz	1880 MHz	FDD
n80	1710 MHz	1785 MHz	N/A	N/A	SUL
n40	2300 MHz	2400 MHz	2300 MHz	2400 MHz	TDD

n41	2496 MHz	2690 MHz	2496 MHz	2690 MHz	TDD
n7	2500 MHz	2570 MHz	2620 MHz	2690 MHz	FDD
n78	3300 MHz	3800 MHz	3300 MHz	3800 MHz	TDD
n77	3300 MHz	4200 MHz	3300 MHz	4200 MHz	TDD
n79	4400 MHz	5000 MHz	4400 MHz	5000 MHz	TDD

**5G-Д АШИГЛАГДДАГ ДУНД ДАВТАМЖИЙН ЗУРВАСУУД**

4-Р ХҮСНЭГТ

NR Operating Band	Uplink		Downlink		Duplex Mode
	Low	High	Low	High	
n257	26.5 GHz	29.5 GHz	26.5 GHz	29.5 GHz	TDD
n258	24.25 GHz	27.5 GHz	24.25 GHz	27.5 GHz	TDD
n260	37 GHz	40 GHz	37 GHz	40 GHz	TDD

**ОПЕРАТОР БОЛОН УЛС ОРНУУДЫН 5G-Д АШИГЛАЖ БҮЙ РАДИО ДАВТАМЖИЙН ЗУРВАС**

5-Р ХҮСНЭГТ

УЛСЫН НЭР	ОПЕРАТОР	5G ДАВТАМЖИЙН ЗУРВАС
АНУ	AT&T, T-Mobile, Verizon, US Cellular, C Spire	n2 (1900 MHz), n5 (850 MHz), n25, n66 (AWS), n71 (600 MHz), n77/n78 (Mid-C), n260/261 (mmWave)
КАНАД	Bell, Rogers, Telus, Eastlink	n71, n28 (Low), n78 (Mid), planned mmWave
ИБНУ	EE, Vodafone, O2, Three	n28 (700 MHz), n78 (3.5 GHz), n1/n3/n7 (varies), n258 (26 GHz mmWave)

<b>ГЯРМАН</b>	Telekom, Vodafone, Telefónica (O2), 1&1	n28, n78 (3.5 GHz), n3 (1800 MHz), n1 (2100 MHz), n258 mmWave
<b>ФРАНЦ</b>	Orange, Bouygues, Free	n28, n78, n1, n258 mmWave
<b>ИТАЛИ</b>	TIM, Vodafone, Iliad, Wind Tre, Fastweb	n28, n78, n1, n3, n258 mmWave
<b>СПАНИ</b>	Movistar, Vodafone, Orange, Yoigo	n28, n78, n1, n3, n258 mmWave
<b>АВСРАЛИ</b>	Telstra, Optus, Vodafone	n28, n78, n1/n3/n8/n40, n5 (Telstra), mmWave n257/258
<b>ЯПОН</b>	NTT Docomo, KDDI (au), SoftBank, Rakuten	n28, n77, n78, n79, n257 mmWave
<b>БНСУ</b>	SKT, KT, LG U+	n28, n78, mmWave n257
<b>БНХАУ</b>	China Mobile, Unicom, Telecom	n28, n41 (2.5 GHz), n78, n79 (4.9 GHz), n257 mmWave
<b>ЭНЭТХЭГ</b>	Jio, Airtel	n28, n78, n77; mmWave not widely deployed
<b>СИНГАПУР</b>	Singtel, StarHub, M1, SIMBA	n1, n78, n40 (SIMBA)

Үндсэндээ 1ГГц-с доошх радио давтамжууд нь хамрах хүрээ өндөртэй ба хөдөө орон нутагт голлон ашиглагдаж байгаа бол 1-6ГГц, 6ГГц-аас дээш радио давтамжууд нь хот, хотын төв хэсэгт ашиглагдаж байна. Гэхдээ хатуу тогтсон зааг хязгаар байхгүй бөгөөд 5G сүлжээний хэрэглээнээс хамаарч эдгээр радио давтамжуудыг уян хатан байдлаар дэлхийн улс орнууд нэвтрүүлж ажиллаж байна. Эдгээрээс радио долгион тархах чадвар өндөртэй тул дэд 1ГГц орчмын давтамжууд IoT хэрэглээнд ашиглагдаж байгаа бол 1-6ГГц болон 6 ГГц -аас дээшх радио давтамжуудыг хамрах хүрээ болон багтаамж өндөр шаарддаг холимог хэрэглээнүүд болох утасгүй өргөн зурвасын хэрэглээнүүд, бусад хэрэглээнүүдэд голлон ашигладаг байна.

#### IV. 5G СҮЛЖЭЭ БОЛОН 6G СҮЛЖЭЭНИЙ ЯЛГАА

Одоогийн 6G сүлжээний судалгааны хүчин чармайлт хурдасч байгаатай зэрэгцэн 5G сүлжээг нэвтрүүлэх,

5G үйлчилгээг нэвтрүүлэх нь дэлхий даяар өсөн нэмэгдэж байна. 2024 оны GSA-ийн тайланд дурдсанаар 126 орны 343 үүрэн холбооны оператор дор хаяж нэг 5G үйлчилгээг нэвтрүүлсэн эсвэл туршиж нэвтрүүлсэн байна. Энэ нь 2019 онд 50 орчим байсан (GSA 2024). 6G сүлжээ рүү чиглэсэн ахиц дэвшлийн хүрээнд одоо байгаа 5G сүлжээнүүд нь ирэх жилүүдэд 3GPP стандартын шинэ хувилбаруудыг, түүний дотор 5G Advanced (5G-A) (3GPP) гэгддэг 3GPP Release 18-ыг нэвтрүүлснээр мэдэгдэхүйц шинэчлэлт хийх төлөвтэй байна. 5G-A нь сүлжээний үр ашгийг дээшлүүлэхийн тулд хиймэл оюун ухаан, машин сургалт (ML) зэрэг шинээр гарч ирж буй технологийн шийдлүүдийг ашиглах боломжийг олгож, татаж авах хурдыг нэмэгдүүлж, хоцрогдолыг бууруулна.

Өмнөх үеийн утасгүй холболтын технологийн нэгэн адил 5G болон 6G нь сүлжээ нь зэрэгцэн оршиж, бие биенээ харилцан сайжруулна гэж үзэж байна. 6G-ийн үүлэн технологи, тооцоолол, хадгалалтын шаардлагыг нөхөхөд одоо байгаа 5G сүлжээний дэд бүтэц, эцэст нь 5G-A дэд бүтэц шаардлагатай болно. 5G-A технологи нь хиймэл оюун ухаан болон машины технологийн системийн тооцооллын хүчийг ашиглах төлөвтэй байгаа ч 6G технологи нь хиймэл оюун ухаанд суурилсан эсвэл өөрөөр хэлбэл хиймэл оюун ухааныг дизайны дагуу суурилуулсан байх төлөвтэй байна.

6G сүлжээг одоо байгаа 5G болон 5G-A дэд бүтцийн суурин дээр барих боловч одоо байгаа утасгүй холболтын шийдлүүдийн чадавхи, найдвартай байдлыг улам бүр сайжруулах боломжтой болно. "IMT-2030 хүрээ"-ний талаарх ITU-R M.2160 сүлжээг нэвтрүүлснээр 5G технологийн одоо байгаа есөн чадавхийг сайжруулна гэж найдаж байна. Нэмж дурдахад, 6G технологи нь хиймэл оюун ухаан, нэгдсэн мэдрэгч, харилцаа холбооны дэвшлийг ашиглах зорилготой олон төрлийн шинэлэг хэрэглээний тохиолдлуудыг нээж өгөх төлөвтэй байна (ITU 2023b, 12-14). [6].

#### V. 5G БОЛОН ТҮҮНЭЭС ХОЙШИХ ҮЕИЙН СҮЛЖЭЭНИЙ СПЕКТР МЕНЕЖМЕНТИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ

5G болон түүнээс хойших үеийн сүлжээний спектр менежментийг харьцуулж үзвэл давтамжийн зурвасын ашиглалт, спектрийн хуваарилалтын арга, удирдлагын технологи, бодлогын зохицуулалтын хувьд томоохон өөрчлөлтүүд ажиглагдаж байна. 5G сүлжээ нь Sub-6 GHz болон mmWave зурвас ашиглаж спектрийн үр ашгийг нэмэгдүүлсэн бол дараагийн үеийн 6G сүлжээ нь Sub-THz болон THz зурвасыг ашиглан илүү өргөн зурвас, өндөр өгөгдлийн хурд хангах боломжийг бүрдүүлнэ.

Мөн 5G-д статик лиценз давамгайлж байсан бол 6G-д динамик спектр хуваарилалт, shared spectrum, spectrum pooling зэрэг уян хатан зохицуулалтын арга хэрэглэгдэх хандлагатай байна. Үүнээс гадна хиймэл оюун ухаанд суурилсан спектр менежмент, бодит хугацаанд оновчлох автомат удирдлагын механизм нэвтэрснээр спектрийн ашиглалтын үр ашиг эрс нэмэгдэх төлөвтэй байна.

Иймээс 6G болон түүнээс хойших үеийн сүлжээний спектр менежмент нь 5G-тэй харьцуулахад илүү ухаалаг, динамик, өндөр давтамж ашигласан, олон хэрэглэгчийн хуваалцсан загварт шилжих шинжтэй гэж дүгнэж байна.

### 5G БОЛОН 6G СҮЛЖЭЭНИЙ СПЕКТР МЕНЕЖМЕНТИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ

6-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	5G сүлжээ	6G сүлжээ болон дараагийн үе	Тайлбар
Ашиглах давтамжийн зурвас	Sub-6 GHz, mmWave	mmWave, Sub-THz, THz	6G нь илүү өндөр давтамж ашигласнаар илүү өргөн зурвас, өндөр хурд боломжтой болно
Спектрийн хуваарилалт	Статик лиценз давамгайл	Динамик, уян хатан хуваарилалт	6G-д бодит хугацаанд спектр хуваарилах ухаалаг механизм нэвтэрнэ
Спектр ашиглалтын загвар	Exclusive spectrum	Shared spectrum, spectrum pooling	6G-д олон оператор спектрийг хамтран ашиглах боломж нэмэгдэнэ
Спектрийн үр ашиг	Өндөр	Маш өндөр	AI болон автомат оновчлолоор спектрийн ашиглалт нэмэгдэнэ
Динамик спектр хуваалцах	DSS (4G/5G)	Multi-band dynamic sharing	6G-д олон зурвас зэрэг ашиглах ухаалаг хуваалцах технологи хөгжнө
Технологийн дэмжлэг	Massive MIMO, Beamforming	AI beamforming, RIS, ultra-massive MIMO	Илүү ухаалаг дохио чиглүүлэх технологи ашиглагдана
Спектрийн удирдлага	Төвлөрсөн удирдлага	AI-д суурилсан тархмал удирдлага	6G нь өөрөө оновчлох сүлжээний концепц ашиглана
Спектрийн нягтрал	Дунд-өндөр	Ultra-dense	Илүү олон жижиг станц ашиглан спектрийн үр ашиг өснө
Хоцролтын шаардлага	~1 ms	< 0.1 ms	Өндөр бодит хугацааны үйлчилгээ дэмжинэ
Холбогдох төхөөрөмж	IoT, eMBB, URLLC	XR, holographic, AI devices	Шинэ төрлийн үйлчилгээ спектрийн шинэ шаардлага үүсгэнэ
Спектрийн бодлого	Үндэсний төвлөрсөн	Глобал уян хатан зохицуулалт	Олон улсын уялдаа холбоо нэмэгдэнэ
Шинэ спектрийн ашиглалт	mmWave	THz, оптик-утасгүй нэгдэл	Маш өндөр хурдтай холбооны боломж бүрдэнэ

Спектрийн автомат удирдлага	Хязгаарлагдмал	Real-time AI optimization	Бодит хугацаанд спектр тохируулна
Сүлжээний архитектур	Cloud-native	AI-native	Спектр менежмент AI-д суурилна

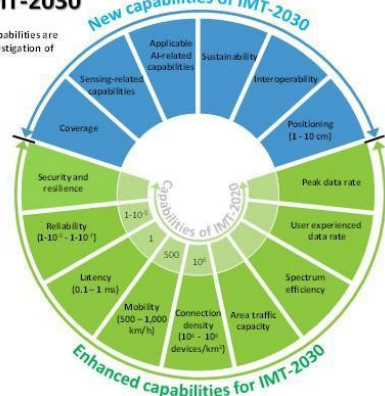
## VI. 6G СҮЛЖЭЭНИЙ БОЛОМЖУУД

Өмнөх үеийн гар утасны сүлжээнүүдтэй (IMT-2020) харьцуулахад 6G технологи нь одоо байгаа чадавхийг сайжруулах хэд хэдэн сайжруулалтыг санал болгохоос гадна шинэ хэрэглээний тохиолдлуудыг бий болгох шинэ чадавхийг нэвтрүүлэх төлөвтэй байна. ОУЦХБ-ын "IMT-2030 хүрээ"-нд тодорхойлсноор 6G технологи нь одоо байгаа есөн чадавхийг сайжруулж, зургаан шинэ чадавхийг авчрах төлөвтэй байна (ITU-R 2023b, 14-17). IMT-2030-ын есөн сайжруулсан чадавхид дараахь зүйлс орно гэж таамагласан байна.

3-р зураг. ITU-R IMT-2030-ийн үндсэн үзүүлэлт

### Capabilities of IMT-2030

NOTE: The range of values given for capabilities are estimated targets for research and investigation of IMT-2030.



Үүнд:

- Өгөгдлийн оргил хурд : төхөөрөмж тус бүрт хамгийн тохиромжтой нөхцөлд хүрч болох хамгийн дээд өгөгдлийн хурд.
- Хэрэглэгчийн туршлагатай өгөгдлийн хурд: хамрах хүрээний дагуу гар утасны төхөөрөмж рүү хаа сайгүй ашиглах боломжтой өгөгдлийн хурд.
- Спектрийн үр ашиг: спектрийн нөөцийн нэгж болон нэг эс тутамд ногдох дундаж өгөгдөл дамжуулах хурд.
- Бүсийн замын хөдөлгөөний багтаамж: газарзүйн бүс тус бүрт үйлчилсэн нийт замын хөдөлгөөний хүчин чадал.

- Холболтын нягтрал: нэгж талбайд холбогдсон болон/эсвэл хандах боломжтой төхөөрөмжийн нийт тоо.
- Хөдөлгөөнт байдал: тодорхой QoS болон өөр өөр давхарга болон/эсвэл радио хандалтын технологид (олон давхарга/олон RAT) хамаарах радио зангилааны хооронд жигд дамжуулалтыг хийж болох хамгийн дээд хурд.
- Саатал: эх сурвалж тодорхой хэмжээтэй пакет илгээнэсээ эхлээд хүлээн авагч хүлээн авах хүртэлх хугацаанд радио сүлжээний оруулсан хувь нэмэр.
- Найдвартай байдал : тодорхой хугацааны дотор урьдчилан тодорхойлсон хэмжээний өгөгдлийг өгөгдсөн магадлалтайгаар амжилттай дамжуулах чадвар.
- Аюулгүй байдал ба уян хатан байдал : аюулгүй байдал гэдэг нь хэрэглэгчийн өгөгдөл болон дохиолол зэрэг мэдээллийн нууцлал, бүрэн бүтэн байдал, хүртээмжийг хадгалах, мөн сүлжээ, төхөөрөмж, системийг хакердах, үйлчилгээнээс тагталзах, дунд нь хүн халдлага гэх мэт кибер халдлагаас хамгаалахыг хэлнэ; уян хатан байдал гэдэг нь эрчим хүчний анхдагч эх үүсвэрээ алдах гэх мэт байгалийн болон хүний гаралтай эвдрэлийн үед болон дараа нь сүлжээ, системүүд зөв ажиллах чадварыг хэлнэ. [7].

## ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар хөдөлгөөнт холбооны 5G болон түүнээс хойших үеийн 6G сүлжээнд спектрийн менежментийн бодлого, давтамжийн зурвасын ашиглалт, олон улсын чиг хандлагыг харьцуулан шинжиллээ. Судалгааны үр дүнгээс дараах гол дүгнэлтүүдийг гаргаж байна.

Нэгдүгээрт, 5G сүлжээний хувьд радио спектрийн ашиглалт нь **бага (low-band)**, **дунд (mid-band)**, **өндөр (high-band)** гэсэн гурван түвшинд суурилсан бөгөөд эдгээрийн дундаас 3–6 GHz зурвас нь дэлхий даяар үндсэн “core spectrum” болж төлөвшсөн байна. Энэ нь хамрах хүрээ, хурд, багтаамжийн тэнцвэрийг хангах стратегийн оновчтой шийдэл болохыг баталж байна.

Хоёрдугаарт, дэлхийн улс орнууд спектрийн бодлогоо ерөнхийдөө International Telecommunication Union болон 3rd Generation Partnership Project-ийн зөвлөмжид нийцүүлэн хэрэгжүүлж байгаа боловч бүс нутгийн ялгаа оршсоор байна. Ялангуяа спектрийн дуудлага худалдаа, лицензжүүлэлт, хуваалцах механизм зэрэгт бодлогын ялгаа нь сүлжээний хөгжлийн хурд, үр ашигт нөлөөлж байна.

Гуравдугаарт, 6G (IMT-2030)-ийн хөгжил нь уламжлалт спектрийн хүрээг давж, **7–24 GHz (FR3), mmWave болон Terahertz** зурвасуудыг хамарсан шинэ шатанд шилжиж байна. Энэ нь зөвхөн илүү өндөр хурд (Tbps) төдийгүй хиймэл оюун ухаанд суурилсан ухаалаг сүлжээ, мэдрэгч-холбооны нэгдэл (ISAC), голографик харилцаа зэрэг цоо шинэ хэрэглээг дэмжих шаардлагаас үүдэлтэй байна.

Дөрөвдүгээрт, спектрийн менежмент нь уламжлалт статик хуваарилалтаас татгалзаж, **динамик, уян хатан, ухаалаг (AI-д суурилсан)** хэлбэр рүү шилжих хандлага давамгайлж байна. Энэ нь спектрийн хомсдолыг бууруулах, ашиглалтын үр ашгийг нэмэгдүүлэх гол шийдэл болж байна.

Тавдугаарт, 5G-ээс 6G рүү шилжих явцад **“спектрийн шилжилтийн бүс” (FR3)** онцгой ач холбогдолтой бөгөөд энэ нь ирээдүйн сүлжээний үндсэн зурвас болох өндөр магадлалтай байна. Гэсэн хэдий ч энэхүү зурвасын зохицуулалт, стандартчилал нь бүрэн шийдэгдээгүй тул цаашдын судалгаа, олон улсын уялдаа зайлшгүй шаардлагатай байна.

Эцэст нь дүгнэхэд, спектрийн менежмент нь зөвхөн техникийн асуудал биш бөгөөд эдийн засаг,

бодлого, зохицуулалт, технологийн нэгдсэн цогц асуудал болох нь тодорхой байна. Иймд ирээдүйн 6G сүлжээний амжилттай нэвтрэлт нь:

- Олон улсын зохицуулалтын уялдаа,
- Шинэ спектрийн үр ашигтай хуваарилалт,
- хаалаг менежментийн систем зэрэг хүчин зүйлсээс шууд хамаарах болно.

Тиймээс энэхүү судалгаа нь 5G болон 6G спектрийн менежментийн ялгаа, хөгжлийн чиг хандлагыг тодорхойлж, цаашдын судалгаа болон бодлого боловсруулахад суурь мэдээлэл болох ач холбогдолтой гэж үзэж байна.

## АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] <https://digitalregulation.org/overview-of-6g-imt-2030/>
- [2] Монгол Улсын Радио давтамжийн хуваарилалтын дунд хугацааны төлөвлөлт (2020-2025 он).
- [3] H. Zhang et al., “6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 28–41, 2019.
- [4] Монгол Улсын Радио давтамжийн хуваарилалтын дунд хугацааны төлөвлөлт (2020-2025 он).
- [5] GSA Snapshot, 5G Market Snapshot November 2025 <https://gsacom.com/paper/public-mobile-networks-december-2025/>
- [6] <https://digitalregulation.org/overview-of-6g-imt-2030/>
- [7] ОУЦХБ-аас гаргасан М.2160 “IMT-ийн 2030 он болон түүнээс хойш ирээдүйн хөгжлийн хүрээ ба ерөнхий зорилго” 2023 он

## ДӨРВӨН СЭНСТ ТӨХӨӨРӨМЖИЙН PD УДИРДЛАГЫН КОЭФФИЦИЕНТУУДЫГ ХИЙМЭЛ ОЮУН УХААН АШИГЛАН ОНОВЧЛОХ НЬ

Дашцэрэнгийн Намуунаа<sup>1</sup>, Цэрэндондогийн Тэнгис<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Электроникийн тэнхим

<sup>2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Электроникийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [namuunaa@must.edu.mn](mailto:namuunaa@must.edu.mn)<sup>1</sup>

*Хураангуй*–Орчин үеийн нисгэгчгүй нисэх төхөөрөмжүүдэд (UAV) тогтвортой удирдлага нь хамгийн чухал асуудлын нэг юм. Энэхүү судалгааны ажилд дөрвөн сэнст нисэх төхөөрөмжийн тогтвортой байдлыг сайжруулах зорилгоор бататган суралцах (Reinforcement Learning) –д суурилсан PD параметр автоматаар тохируулах аргыг боловсруулсан. TD3 (Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient) алгоритмыг ашиглан Kp, Kd утгуудыг динамикаар тохируулж, уламжлалт PD-тэй харьцуулахаар зорьж байна. Туршилтад STATE\_DIM = 8, ACTION\_DIM = 4 бүхий загвар ашиглаж, коэффициентуудыг санамсаргүй утгуудаар эхлүүлэн сургасан. Үр дүнгээс харахад шагналын утга сургалтын явцад тогтвортой өсөж, өнцгийн хэлбэлзэл  $\pm 20^\circ$  орчмоос  $\pm 2-5^\circ$  хүртэл буурч, коэффициентууд тогтвортой мужид ойртсон нь RL-д суурилсан арга бодит системийн PD/PID тохиргоонд ашиглах боломжтойг харуулж байна. Туршилтын үр дүнгээр RL-д суурилсан арга нь хурдан тогтворжилт, бага алдаа, илүү тогтвортой хариу үзүүлж байгааг харуулсан. Kp, Kd утгуудыг динамикаар тохируулж, уламжлалт PD-тэй харьцуулсан. Туршилтын үр дүнгээр RL д суурилсан арга нь хурдан тогтворжилт, бага алдаа, илүү тогтвортой хариу үзүүлж байгааг харуулсан.

*Түлхүүр үг:* Quadcopter, PD/PID Controller, Reinforcement Learning, TD3, Control System

### I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд нисгэгчгүй нисэх төхөөрөмж, дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн судалгаа, үйлдвэрлэл, хяналт шинжилгээ, хүргэлт зэрэг олон салбарт өргөн хэрэглэгдэх болсон. Эдгээр системүүд нь өндөр динамик, шугаман бус шинж чанартай тул тогтвортой удирдлага боловсруулах нь төвөгтэй асуудалд тооцогддог. Ялангуяа орчны нөлөөлөл (салхи, ачаалал, мэдрэгчийн алдаа) болон параметрийн тодорхой бус байдал нь удирдлагын гүйцэтгэлд хүчтэй нөлөөлдөг. Уламжлалт удирдлагын аргуудаас PD (Proportional–Exhaustive) хянагч нь энгийн бүтэц, хэрэгжүүлэхэд хялбар байдлаараа өргөн хэрэглэгддэг. Гэсэн хэдий ч PD коэффициентуудыг (Kp, Kd) зөв тохируулах нь туршилт, туршлага дээр ихээхэн тулгуурладаг бөгөөд системийн нөхцөл өөрчлөгдөхөд гүйцэтгэл буурах сул талтай. Ялангуяа дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн хувьд олон тэнхлэгт, харилцан хамааралтай динамик бүхий системд статик PD тохиргоо хангалтгүй байж болно [1]. Сүүлийн үед хиймэл оюун ухаан болон бататгах сургалт (Reinforcement Learning, RL) нь удирдлагын системд дасан зохицох чадварыг нэмэгдүүлэх шинэ боломжуудыг нээж байна. RL нь агент орчинтой харилцан үйлчилж, шагналын функц дээр суурилан оновчтой бодлогыг өөрөө сурах чадвартай. Үүнийг ашиглан PD коэффициентыг динамикаар тохируулах буюу Коэффициентын тохируулга хийх нь уламжлалт аргуудын сул талыг даван туулах боломжийг олгодог. Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь RL

алгоритмыг ашиглан дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн удирдлагад PD параметруудыг автоматаар тохируулах арга боловсруулах явдал юм. Тодруулбал, Deep Q-Network (DQN) эсвэл Q Learning аргачлал ашиглан системийн төлөвт тулгуурлан тохиромжтой Kp, Kd утгуудыг сонгох замаар тогтвортой байдал, хурд, алдааны бууралтыг сайжруулахыг зорьж байна. Энэхүү ажлын хүрээнд дараах асуудлуудыг авч үзнэ. Үүнд:

- Дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн системийн динамик загварчлал
- RL орчин, төлөв, үйлдэл, шагналын функцийн тодор хойлолт
- Arduino болон Python хоорондын харилцан ажилла гаанд суурилсан бодит туршилт
- RL болон PD аргын гүйцэтгэлийн харьцуулалт

Энэхүү судалгаа нь RL-д суурилсан удирдлагын аргыг бодит системд хэрэгжүүлэх боломжийг харуулах бөгөөд ирээдүйд өөрөө дасан зохицох, ухаалаг удирдлагын систем боловсруулахад хувь нэмэр оруулах ач холбогдолтой юм [1]- [4].

### II. СУДЛАГДСАН БАЙДЛЫН СУДАЛГАА

Сүүлийн жилүүдэд дөрвөн сэнст нисэх төхөөрөмжийн удирдлагын судалгаа нь уламжлалт загварт суурилсан хяналтын аргуудаас өгөгдөлд суурилсан, суралцдаг удирдлагын арга руу эрчимтэй шилжиж байна. Дөрвөн сэнст төхөөрөмж нь шугаман бус, олон хувьсагчтай,

тэнхлэгүүдийн хоорондын харилцан нөлөөлөл ихтэй динамик систем тул бүх ажлын нөхцөлд нэг тогтмол параметртэй хянагчаар өндөр чанартай удирдлага хэрэгжүүлэхэд хүндрэлтэй байдаг. Иймээс тогтворжилт, хурдан хариу, бага хэтрэлт, гаднын нөлөөлөлд тэсвэртэй байдал зэрэг шаардлагыг зэрэг хангах удирдлагын арга боловсруулах асуудал нь өнөөг хүртэл идэвхтэй судлагдаж байна.

Уламжлалт аргуудаас PD, PID, LQ болон тэдгээрийн төрөлжсөн хувилбарууд дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн удирдлагад хамгийн өргөн хэрэглэгддэг. Luukkonen-ийн ажилд дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн динамик загварчлал, удирдлагын суурь тэгшитгэлүүд, тогтворжилтын үндсэн зарчмуудыг системтэй авч үзсэн нь энэ чиглэлийн онолын чухал суурь болсон [5]. Bouabdallah et al. micro дөрвөн сэнст төхөөрөмж дээр PID ба LQ аргуудыг харьцуулан судалж, уламжлалт хянагчдын практик давуу болон сул талыг тодорхой харуулсан [6]. Мөн Cooper et al. классик PID хянагчаар дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн тогтворжилтыг үнэлж, уламжлалт аргуудыг суурь харьцуулалтын загвар болгон ашиглах боломжтойг харуулсан [7].

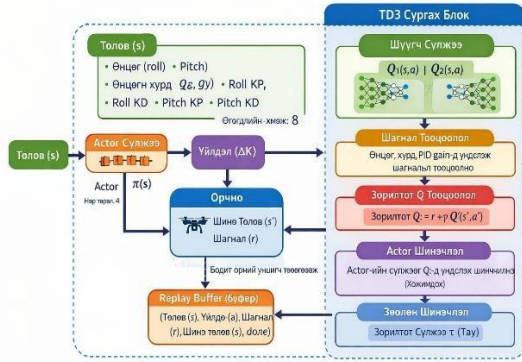
Гэсэн хэдий ч эдгээр аргуудын гол сул тал нь коэффициентуудыг гараар, эсвэл туршилт - алдааны аргаар оновчлох шаардлагатай байдаг оршино. Системийн параметр, ачаалал, гадны орчны нөлөөлөл, мэдрэгчийн шуугиан өөрчлөгдөхөд өмнө нь тохируулсан коэффициентуудын гүйцэтгэл буурах магадлалтай. Ялангуяа дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн хувьд roll, pitch, yaw тэнхлэгүүдийн хоорондын харилцан холбоос их тул нэг тэнхлэгийн параметрийг сайжруулахад нөгөө тэнхлэгт сөрөг нөлөө үүсэх тохиолдол элбэг байдаг. Иймээс уламжлалт хянагчийн бүтцийг хадгалсан хэвээр коэффициентуудыг автоматаар шинэчлэх ухаалаг арга руу судалгааны чиглэл шилжиж байна. Энэ хүрээнд бататган суралцах (Reinforcement Learning /RL/) аргууд дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн удирдлагад ирээдүйтэй шийдэл болж гарч ирсэн. Koch et al. UAV attitude control асуудалд PPO, TRPO, DDPG зэрэг RL алгоритмуудыг харьцуулан судалж, RL аргыг зөвхөн дээд түвшний навигацид бус, дотоод attitude control давталтад ашиглах боломжтойг харуулсан [1]. Wu et al. дрон hovering удирдлагад supervised reinforcement learning хэрэглэж, сургалтын үр ашгийг нэмэгдүүлэн, hover тогтворжилтын чанарыг сайжруулсан [2]. Эдгээр ажлууд нь RL арга нь шугаман бус, тодорхой бус орчинд дасан зохицох чадвар өндөртэй болохыг харуулдаг. Сүүлийн үеийн судалгаануудад deep reinforcement learning аргыг дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн UAV-

ийн удирдлагад бодит хугацаанд хэрэгжүүлэх асуудалд илүү их анхаарч байна. Trad et al. deep reinforcement learning суурьтай дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн control system-ийг бодит хугацаанд хэрэгжүүлэх боломжийг авч үзсэн [3]. Мөн Sönmez et al. дөрвөн сэнст төхөөрөмж UAV-ийн PD controller gains prediction асуудалд RL-д суурилсан арга санал болгож, нислэгийн явцад PD коэффициентуудыг онлайнгаар нарийн тохируулах боломжийг харуулсан [4]. Энэ нь controller-ийн бүтцийг бүрэн солихын оронд, уламжлалт PD хянагчийг RL алгоритмаар дэмжин сайжруулах hybrid чиглэлийн судалгааны чухал жишээ болж байна.

### III. TD3 алгоритм

TD3 гэдэг нь Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient гэсэн нэртэй, үргэлжилсэн action space-тай бодло гын асуудалд зориулагдсан off-policy actor-critic арга юм.

Энэ нь DDPG дээр суурилдаг ч DDPG-ийн нийтлэг сул тал болох Q-утгын хэт өндөр үнэлгээ, critic алдаатай байхад actor- буруу чиглэлд сурах, мөн Deterministic policy нарийн “peak” дээр хэт таарах асуудлыг тусгайлан засах 3 өөр механизм нэмж өгдөг. TD3 алгоритм нь DDPG шиг ганц critic хэрэглэвэл critic зарим action-ыг бодитоос нь өндөр үнэлэх үед actor тэр алдаатай өндөр үнэлгээг “ашиглаад” улам буруу action руу чиглэдэг сул талтай. TD3 энэ асуудлыг бууруулахын тулд хоёр critic-ийн target-оос бага утгыг нь авдаг. TD3-ийн гол онцлог нь хоёр critic буюу шүүгч сүлжээ  $Q_1(s,a)$ ,  $Q_2(s,a)$ -г зэрэг ашигладаг. Эдгээр critic сүлжээ нь өгөгдсөн төлөв ба үйлдлийн хослолын чанарыг тус тус үнэлж, target Q утгыг тооцохдоо энэ хоёрын бага утгыг сонгодог. Ингэснээр DDPG алгоритмд түгээмэл ажиглагддаг Q-утгын хэт өндөр үнэлгээний асуудлыг бууруулдаг. Мөн actor сүлжээ critic-ээс илүү удаан шинэчлэгддэг бөгөөд үүнийг Delayed policy update гэж нэрлэдэг. Энэ механизм нь actor-ийг тогтворгүй critic үнэлгээн дээр тулгуурлан буруу сурахаас сэргийлнэ. Сургалтын явцад target Q утга нь шагнал болон дараагийн төлөвийн үнэлгээнд үндэслэн тооцогдоно. Үүний дараа critic сүлжээнүүдийн алдагдлыг бууруулан шинэчилж, тодорхой алхам тутамд actor сүлжээг шинэчилнэ. Мөн үндсэн ба зорилтот сүлжээнүүдийн хооронд зөөлөн шинэчлэл т коэффициентууд хийгддэг. Ийм байдлаар TD3 алгоритм нь дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн roll болон pitch тэнхлэгийн төлөвөөс хамааран коэффициентуудыг аажмаар оновчлон сурч, илүү тогтвортой, бага савлалттай удирдлагын бодлого үүсгэдэг.



Зураг 1: TD3 алгоритмын урсгал

### А. Шагналын функц

RL агентын суралцах чанар нь шагналын функцийг зөв тодорхойлолтоос ихээхэн шалтгаалдаг. Энэхүү ажилд шагналын функцийг дөрвөн сэнст нисэх төхөөрөмжийн өнцгийн алдаа болон өнцгийн хурдны хэмжээг багасгах зарчимд тулгуурлан тодорхойлов. Сургалтын явцад төхөөрөмж тохируулсан утгад ойртож, савлалт багасах тусам өндөр шагнал авах, харин огцом хазайлт, их хурд, тогтворгүй байдал үүсэх тусам сөрөг шагнал авах юм. Шагналын функцийг дараах ерөнхий хэлбэрээр илэрхийлж болно.

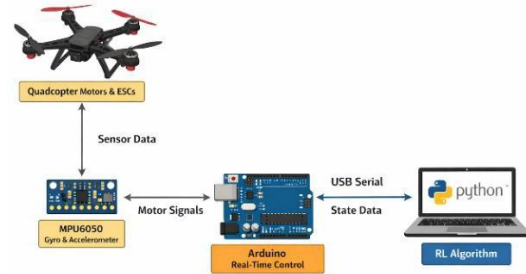
$$r_t = -(\omega_1 |\phi_t| + \omega_2 |\theta_t| + \omega_3 |\phi_t| + \omega_4 |\theta_t|) \quad (1)$$

Энд  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  нь коэффициентууд бөгөөд өнцгийн алдаа, өнцгийн хурдны аль нь илүү чухал болохыг илэрхийлнэ. Хэрэв систем тохируулсан утга орчимд бага хурдтай тогтвортой болсон бол нэмэлт эерэг бонус өгч болно. Үүний эсрэгээр хэт их налалт үүсвэл эпизодыг дуусгаж, том хэмжээний сөрөг шагнал өгч болно. Ийм бүтэцтэй шагналын функц нь агент зөвхөн эцсийн алдааг багасгахаас гадна шилжилтийн процессын чанарыг давхар сайжруулахад чиглүүлдэг. Өөрөөр хэлбэл хэтрэлт багатай, хэлбэлзэл багатай, илүү сайн хариу үүсгэхэд тусалдаг.

## IV. СИСТЕМИЙН ХЭРЭГЖИЛТ БА ТУРШИЛТЫН ОРЧИН

Энэхүү судалгаанд боловсруулсан систем нь хоёр түвшний архитектураас бүрдэх бөгөөд доод түвшинд Arduino микроконтроллер нь мэдрэгчийн өгөгдөл унших, өнцөг тооцоолох, моторын үндсэн удирдлагыг хэрэгжүүлнэ. Дээд түвшинд Python орчинд TD3 алгоритм ажиллаж, системийн тухайн үеийн төлөвөөс хамааран коэффициентуудыг шинэчилнэ. Ийм модульчлагдсан бүтэц нь бодит хугацааны удирдлага болон тооцооллын хувьд

хүнд RL сургалтыг тусгаарлан хэрэгжүүлэх боломж олгосон. Arduino талд MPU6050 мэдрэгчээс дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн өнцөг болон өнцгийн хурдтай холбоотой мэдээллийг уншиж, roll, pitch, gx, gy зэрэг хувьсагчийг Python-тал руу сериалаар дамжуулан илгээдэг. MPU6050-ийн DMP (Digital Motion Processor) функцийг ашиглан тодорхой хурдтайгаар байрлалын мэдээллийг авна.



Зураг 2: Системийн ерөнхий бүтэц

Энэхүү мэдээллээр pitch-roll өнцгүүдийг бодож авна. MPU6050 мэдрэгчийн DMP функцийг ашигласнаар төхөөрөмжийн чиглэлийн quaternion өгөгдлийг бодит хугацаанд авна. Quaternion ( $q_0q_1q_2q_3$ )-оос roll болон pitch өнцгийг дараах байдлаар тооцоолно:

$$roll = \tan^{-1} \left( \frac{2(q_0q_1 + q_2q_3)}{1 - 2(q_1^2 + q_2^2)} \right) \quad (2)$$

$$pitch = \sin^{-1}(2(q_0q_2 - q_3q_1)) \quad (3)$$

Эдгээрийг градусаар илэрхийлэхдээ:

$$rollDeg =$$

$$degrees \left( \tan^{-1} \left( \frac{2(q_0q_1 + q_2q_3)}{1 - 2(q_1^2 + q_2^2)} \right) \right) \quad (4)$$

$$pitchDeg = degrees(\sin^{-1}(2(q_0q_2 - q_3q_1))) \quad (5)$$

Мөн өнцөгийн хурдны мэдээллийг гирокопоос авч

$$g_x = gyroX, \quad g_y = gyroY$$

гэж тэмдэглэн roll болон pitch тэнхлэгийн өнцгийн хурд болгон ашиглана. Ийнхүү roll, pitch  $g_x, g_y$  хувьсагчдыг Python тал руу сериалаар дамжуулан илгээж, RL агентын төлөвийн оролт болгон хэрэглэдэг. Python кодонд ч roll, pitch,  $g_x, g_y$  утгуудыг state болон reward тооцоонд ашиглаж байна.

Үүний зэрэгцээ Python талаас шинэчлэгдсэн  $K_{(p,r)}, K_{(d,r)}, K_{(p,p)}, K_{(d,p)}$  коэффициентуудыг хүлээн авч моторын удирдлагад ашиглана. Өөрөөр хэлбэл, Arduino нь бодит объекттой харилцах интерфейс ба локал хяналтын давхарга болж,

Python- нь ухаалаг шийдвэр гаргах агентын үүргийг гүйцэтгэнэ. Ийм хуваарилалт нь бодит туршилтын үед системийн модульчлал, өргөтгөх боломж, алдаа онош лох чадварыг сайжруулдаг.

PD хянагчид зөвхөн тухайн үеийн алдаа бус, алдаа хэр хурдан өөрчлөгдөж байгааг харгалзан үздэг. Үүнийг дараах байдлаар бичнэ.

$$\begin{aligned} \dot{e}_\phi(t) &= \frac{de_\phi(t)}{dt} \\ \dot{e}_\theta(t) &= \frac{de_\theta(t)}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

Үүнд:

- $e_\phi(t)$  = roll тэнхлэгийн алдаа
- $e_\theta(t)$  = pitch тэнхлэгийн алдаа
- $\dot{e}_\phi(t), \dot{e}_\theta(t)$  = эдгээр алдааны өөрчлөгдөх хурд

Алдаа нь дөрвөн сэнстийн хэлбэлзэл, савлалтын шинж чанарыг бууруулахад чухал үүрэгтэй. Практикт энэхүү хэмжигдэхүүн нь гироскопын мэдрэгчийн өгөгдөлтэй холбоотойгоор ойролцоолон үнэлэгдэж болно.

Python орчинд хэрэгжүүлсэн RL агент нь TD3 алгоритм дээр суурилсан. Энэхүү алгоритмыг сонгосон шалтгаан нь тасралтгүй үйлдлийн орон зайд тогтвортой суралцах чадвар сайтай, DDPG төрлийн аргуудад түгээмэл ажиглагддаг Q-утгын хэт үнэлгээний асуудлыг хоёр critic сүлжээ ашиглан бууруулдаг оршино. Тухайн системийн төлөв нь нийт найман хэмжээст вектороос бүрдэх бөгөөд үүнд roll өнцөг, pitch өнцөг, тухайн тэнхлэгүүдийн өнцгийн хурд, мөн тухайн мөчид хэрэглэгдэж буй дөрвөн коэффициент орсон. RL агентын оролтын төлөвийг дараах вектороор илэрхийлж болно.

$$st = [\phi_t, \theta_t, g_{x,t}, g_{y,t}, K_{p,\phi,t}, K_{d,\phi,t}, K_{p,\theta,t}, K_{d,\theta,t}] \quad (7)$$

Энд

- $\phi_t, \theta_t$ — тухайн мөчийн roll, pitch өнцөг,
- $g_{x,t}, g_{y,t}$ — өнцгийн хурдтай холбоотой мэдрэгчийн хэмжилт,
- $K_{p,\phi,t}, K_{d,\phi,t}, K_{p,\theta,t}, K_{d,\theta,t}$ — тухайн мөчид хэрэглэж буй gain коэффициентууд болно.

Ийм төлөв сонгосноор агент зөвхөн механик төлөвийг бус, өөрийн өмнөх шийдвэрийн нөлөөллийг хамтад нь ажиглаж, дараагийн gain өөрчлөлтөө илүү үндэслэлтэй гаргах боломжтой болсон. Кодын түвшинд энэ төлөвийн хэмжээ STATE\_DIM = 8, үйлдлийн хэмжээ ACTION\_DIM = 4 гэж тодорхойлогдсон.

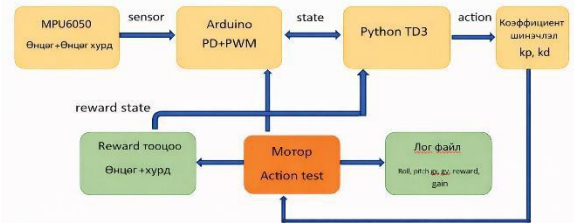
RL агентын үйлдлийг ашиглан gain-уудыг дараах байдлаар шинэчилнэ.

$$\begin{aligned} K_{p,\phi,t+1} &= \text{clip}(K_{p,\phi,t} + \Delta K_{p,\phi,t}, K_{p,\min}, K_{p,\max}) \\ K_{d,\phi,t+1} &= \text{clip}(K_{d,\phi,t} + \Delta K_{d,\phi,t}, K_{d,\min}, K_{d,\max}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{p,\theta,t+1} &= \text{clip}(K_{p,\theta,t} + \Delta K_{p,\theta,t}, K_{p,\min}, K_{p,\max}) \\ K_{d,\theta,t+1} &= \text{clip}(K_{d,\theta,t} + \Delta K_{d,\theta,t}, K_{d,\min}, K_{d,\max}) \end{aligned} \quad (8)$$

Энд clip(·) функц нь gain утгыг урьдчилан тогтоосон доод ба дээд хязгаарт барина.

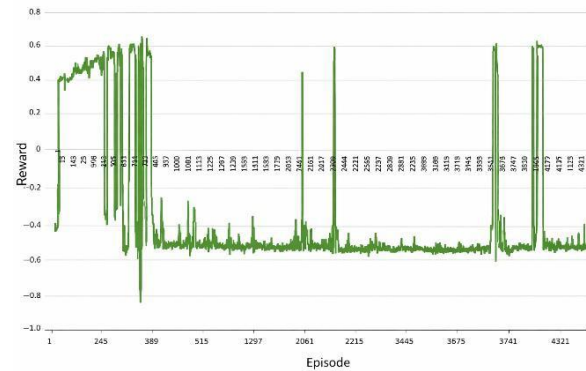
Сургалтаар гарсан эдгээр өнцгийн утгуудаар дроны байрлал, хазайлтыг харж болно. Мөн дроны моторын PWM -утгуудыг удирдахад ашиглагдана. Туршилтын явцад коэффициентуудыг эхлээд санамсаргүй мужид (ойролцоогоор 0–3) эхлүүлж, дараа нь эпизод бүрээр TD3 агентын бодлого сайжрах тусам шинэчлэгдсэн.



Зураг 3: RL-д суурилсан дөрвөн сэнстийн PD tuning системийн блок

total step	kp roll	kd roll	kp pitch	kd pitch	roll	pitch	gx	gy	reward
13746	3	0.90953	3	0.03377	-1.883	3.25433	-0.44767	-0.08167	-0.44571
13747	3	0.89535	3	0.02931	-2.09033	3.496	-0.54733	-0.48633	-0.47711
13748	3	0.88684	3	0.01117	-2.333	3.722	-0.68433	-0.089	-0.51712
13749	3	0.88295	3	0	-2.36167	3.69367	0.27733	0.42	-0.50531
13750	3	0.8739	3	0	-2.18933	3.57567	-0.135	0.11933	-0.49398
13751	2.98827	1.38471	3	0	-2.11167	3.45667	0.34833	0.173	-0.48063
13752	2.98895	1.36765	3	0	-1.954	3.46267	-0.15267	0.26967	-0.46794
13753	2.99135	1.34409	3	0	-1.92233	3.27	-0.02567	0.229	-0.45536
13754	2.99397	1.32473	3	0	-1.87167	3.29533	-0.295	-0.107	-0.45517
13755	2.99422	1.3113	3	0	-2.04	3.46933	-0.229	-0.17567	-0.47422
13756	2.99615	1.30286	2.99997	0	-2.27033	3.66433	-0.794	-0.23167	-0.50363
13757	2.99665	1.28261	3	0	-2.52067	3.792	-0.28267	0.16533	-0.52904
13758	3	1.28835	3	0	-2.30033	3.72733	0.237	0.32067	-0.51629
13759	3	1.26215	3	0	-2.09567	3.38067	0.90833	-0.018	-0.4821
13760	3	1.24518	3	0	-1.972	3.33633	0.22133	-0.074	-0.45612
13761	3	1.23386	3	0	-1.864	3.42767	-0.407	0.31567	-0.46012
13762	3	1.23372	3	0	-2.07267	3.43167	-0.36667	-0.30767	-0.47137
13763	2.99955	1.22766	2.99986	0	-2.184	3.66833	0.00233	-0.318	-0.49861
13764	3	1.23272	3	0	-2.40367	3.742	-1.46567	0.63333	-0.52038

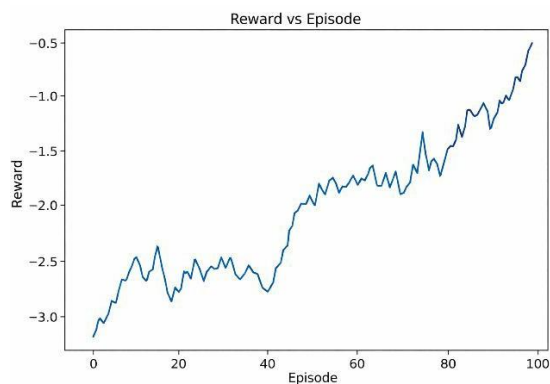
Зураг 4: Серилаар дамжуулан бүртгэгдсэн төлөв ба шагналын хэсэг



Зураг 5: Туршилтын явцад сурч буй дата

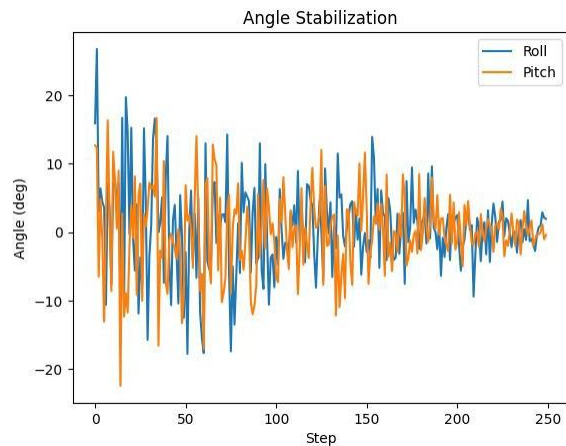
Зураг 6: Сериалаар дамжуулан бүртгэгдсэн төлөв ба reward-ийн хэсэг өгөгдөл

**V. ТУРШИЛТЫН ҮР ДҮН**  
 Туршилтын явцад RL агентын суралцах явцыг шагнал, өнцгийн хэлбэлзэл, коэффициентуудын өөрчлөлт гэсэн үндсэн үзүүлэлтүүдээр үнэлж үзлээ. Шагналын графикаас харахад сургалтын эхний хэсэгт агентын үйлдлүүд тогтворгүй, санамсаргүй шинжтэй байснаас шалтгаалан reward харьцангуй бага буюу сөрөг утгатай байсан. Харин туршилтын тоо нэмэгдэхийн хэрээр шагнал аажмаар өссөн нь агент илүү оновчтой коэффициент сонгож эхэлснийг илтгэнэ.



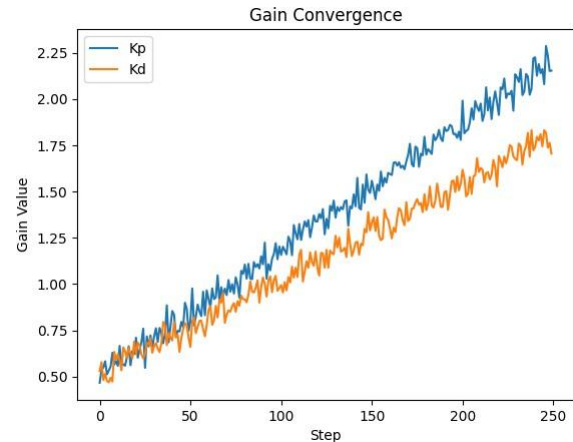
Зураг 7: Reward-ийн өсөлт

Шагнал болон эпизодын графикаас харахад сургалтын эхний шатанд утга нь ойролцоогоор  $-3$  орчим байсан бол дараагийн шагналуудын явцад аажмаар өсөж  $-0.5$  орчимд хүрсэн байна. Шагналын өсөлт жигд биш, тодорхой хэсгүүдэд хэлбэлзэлтэй байгаа нь бодит системийн шуугиан, механик чичиргээ, мэдрэгчийн алдаа, сериал холбооны саатал, off-policy сургалтын онцлогтой холбоотой байж болно.



Зураг 8: Өнцөгийн тогтворжилт

Сургалтын эхэнд roll болон pitch тэнхлэгүүд  $\pm 20^\circ$  орчим хүчтэй савлаж байсан бол сургалтын сүүл үед хэлбэлзлийн амплитуд мэдэгдэхүйц багасаж  $\pm 2-5^\circ$  орчимд тогтворжсон байна. Энэ нь RL зөвхөн тохируулсан утгад ойртуулах биш, мөн системийн савлалт, огцом хариуг багасгах чиглэлд коэффициентуудыг тохируулж чадсаныг харуулж байна. Дөрвөн сэнстийн механик чичиргээ, мэдрэгчийн шуугиан, сэнсний микро саатлыг тооцвол энэ үр дүн нь бодит туршилтын хувьд сайн үзүүлэлт юм.



Зураг 9: Kp ба Kd коэффициентүүдийн тогтворжилт

Kp болон Kd утгууд сургалтын эхэнд санамсаргүй утгуудаас эхэлсэн боловч эпизодын явцад тодорхой муж руу дөхөн тогтворжиж байгааг харж болно. Энэ нь RL-ийн бодит системийн динамикт нийцсэн ашигтай коэффициентуудыг олж чадсаныг илтгэж байна.

**A. Хэлэлцүүлэг**

Энэхүү судалгааны үр дүнгээс харахад RL-д суурилсан PD tuning арга нь бодит дөрвөн сэнст нисэх төхөөрөмж дээр хэрэгжих боломжтой бөгөөд уламжлалт гараар тохируулдаг аргыг тодорхой хэмжээнд орлох чадвартай байна. Ялангуяа системийн параметрууд, ачаалал, механик орчин, мэдрэгчийн шуугиан өөрчлөгдөх үед статик коэффициентуудтай хянагчаас илүү уян хатан шийдэл болж чадаж байна.

Гэсэн хэдий ч энэхүү аргын үр дүн нь хэд хэдэн нөхцөлөөс ихээхэн хамаарна. Үүнд:

1. Шагналын функцийг оновчтой загварчлах нь маш чухал. Хэрэв шагналын функц зохистой сонгогдоогүй бол агент буруу чиглэлд суралцах, эсвэл хэт савлалтыг зөвшөөрөх сул талтай.
2. Бодит систем дээр сериалаар өгөгдөл дамжуулах үед үүсэх саатал, мэдрэгчийн шуугиан, тоон квантчлал зэрэг хүчин зүйлс нь RL сургалтын тогтвортой байдалд сөргөөр нөлөөлж болно.

3. Бодит төхөөрөмж дээр туршилт хийх явцад аюулгүй ажиллагааны асуудал маш чухал байр суурь эзэлнэ.

### ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн roll болон pitch тэнхлэгийн тогтворжилтыг сайжруулах зорилгоор TD3 бататган суралцах алгоритмд суурилсан коэффициентуудыг автоматаар тохируулах аргыг бодит систем дээр туршив. Сургалтын явцад шагнал аажмаар багасаж байна. Харин өнцгийн алдаа  $\pm 20^\circ$  орчим хүчтэй савлаж байсан бол сургалтын сүүл үед хэлбэлзлийн амплитуд мэдэгдэхүйц багасаж  $\pm 2-5^\circ$  орчимд тогтворжсон. Kp болон Kd утгууд сургалтын эхэнд санамсаргүй утгуудаас эхэлсэн боловч туршилтын эпизодуудын явцад тодорхой муж руу дөхөж Kp=2.1, kd=1.75 орчимд тогтворжсон нь RL-ийн бодит хяналтын параметруудийг амжилттай суралцаж буйг харуулж байна. Судалгааны гол практик ач холбогдол нь дөрвөн сэнст төхөөрөмжийн шугаман бус, олон хувьсагчтай системд гар аргаар коэффициент тохируулах шаардлагыг бууруулж, нөхцөл өөрчлөгдөхөд дасан зохицох хяналтын суурь шийдэл санал болгосонд оршино. Туршилтын хэрэгжилт нь одоогоор PD коэффициентод төвлөрсөн боловч бүрэн PID сургах боломж бүрдсэн гэж үзэж байна.

### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] W. Koch, R. Mancuso, R. West, and A. Bestavros, "Reinforcement Learning for UAV Attitude Control," arXiv preprint arXiv:1804.04154, Apr. 2018.
- [2] J. Wu, Z. Yang, H. Zhuo, C. Xu, C. Zhang, N. He, L. Liao, and Z. Wang, "A Supervised Reinforcement Learning Algorithm for Controlling Drone Hovering," *Drones*, vol. 8, no. 3, Art. no. 69, 2024, doi: 10.3390/drones8030069.
- [3] T. Y. Trad, K. Choutri, M. Lagha, S. Meshoul, F. Khenfri, R. Fareh, and H. Shaiba, "Real-Time Implementation of Quadrotor UAV Control System Based on a Deep Reinforcement Learning Approach," *Computers, Materials & Continua*, vol. 81, no. 3, pp. 4757-4786, 2024, doi: 10.32604/cmc.2024.055634.
- [4] S. Sönmez, L. Montecchio, S. Martini, M. J. Rutherford, A. Rizzo, M. Stefanovic, and K. P. Valavanis, "Reinforcement Learning-Based PD Controller Gains Prediction for Quadrotor UAVs," *Drones*, vol. 9, no. 8, Art. no. 581, 2025, doi: 10.3390/drones9080581.
- [5] T. Luukkonen, *Modelling and Control of Quadcopter*. Espoo, Finland: Aalto University School of Science, Aug. 2011.
- [6] S. Bouabdallah, A. Noth, and R. Siegwart, "PID vs LQ Control Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor," in *Proc. 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2004, pp. 2451-2456, doi: 10.1109/IROS.2004.1389776.
- [7] Y. N. Cooper, R. K. Ganesh Ram, V. Kalaichelvi, and V. Bhatia, "Stabilization and Control of an Autonomous Quadcopter," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 666, pp.

- 161-165, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.666.161.
- [8] J. Hwangbo, I. Sa, R. Siegwart, and M. Hutter, "Control of a Quadrotor with Reinforcement Learning," *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017. [Online]. Available: arXiv:1707.05110.
- [9] C.-H. Pi, Y.-W. Dai, K.-C. Hu, and S. Cheng, "General Purpose Low-Level Reinforcement Learning Control for Multi-Axis Rotor Aerial Vehicles," *Sensors*, vol. 21, no. 13, Art. no. 4560, 2021, doi: 10.3390/s21134560.
- [10] Z. Zhang, X. Zhang, Y. Chen, and H. Li, "Control of UAV Quadrotor Using Reinforcement Learning and Robust Compensator," *IET Cyber Systems and Robotics*, 2023, doi: 10.1049/cth2.12496.
- [11] P. C. Yuste, J. A. Iglesias Martínez, and M. A. Sanchis de Miguel, "Simulation-Based Evaluation of Model-Free Reinforcement Learning Algorithms for Quadcopter Attitude Control and Trajectory Tracking," *Neurocomputing*, vol. 608, Art. no. 128362, 2024, doi: 10.1016/j.neucom.2024.128362.
- [12] Y. Ren, F. Zhu, S. Sui, Z. Yi, and K. Chen, "Enhancing Quadrotor Control Robustness with Multi-Proportional-Integral-Derivative Self Attention-Guided Deep Reinforcement Learning," *Drones*, vol. 8, no. 7, Art. no. 315, 2024, doi: 10.3390/drones8070315.
- [13] Y. Yan, H. Cao, B. Zhang, W. Ni, B. Wang, and X. Ma, "Large Scale Solar-Powered UAV Attitude Control Using Deep Reinforcement Learning in Hardware-in-Loop Verification," *Drones*, vol. 8, no. 9, Art. no. 428, 2024, doi: 10.3390/drones8090428.
- [14] D. Wada, S. A. Araujo-Estrada, and S. Windsor, "Unmanned Aerial Vehicle Pitch Control Using Deep Reinforcement Learning with Discrete Actions in Wind Tunnel Test," *Aerospace*, vol. 8, no. 1, Art. no. 18, 2021, doi: 10.3390/aerospace8010018.
- [15] A. T. Azar, A. Koubaa, N. Ali Mohamed, H. A. Ibrahim, Z. F. Ibrahim, M. Kazim, A. Ammar, B. Benjdira, A. M. Khamis, I. A. Hameed, and A. Al-Darraj, "Drone Deep Reinforcement Learning: A Review," *Electronics*, vol. 10, no. 9, Art. no. 999, 2021, doi: 10.3390/electronics10090999.
- [16] E. Kaufmann, L. Bauersfeld, A. Loquercio, M. Müller, V. Koltun, and D. Scaramuzza, "Champion-Level Drone Racing Using Deep Reinforcement Learning," *Nature*, vol. 620, pp. 982-987, 2023, doi: 10.1038/s41586-023-06419-4

# ХИЙМЭЛ ОЮУН УХААНД СУУРИЛСАН SUVMAX ТООЦООЛЛООР УМАЙН ХҮЗҮҮНИЙ ХОРТ ХАВДРЫН ҮЕ ШАТ БА ҮСЭРХИЙЛЛИЙГ ҮНЭЛЭХ НЬ

Мөнхбаярын ТҮМЭН-АЮУШ<sup>1</sup>, Соном-Очирын ӨЛЗИЙБАЯР<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Мэдээллийн технологийн  
ТЭНХИМ

*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: J.DS25E007@must.edu.mn*

*Хураангуй* — Умайн хүзүүний хорт хавдар нь Монгол Улсад эмэгтэйчүүдийн дундах зонхилох эмгэгийн нэг бөгөөд өвчнийг эрт илрүүлж үе шатыг үнэн зөв тогтоох нь эрүүл мэндийн байдал, эмчилгээний үр дүнг дээшлүүлэх гол хүчин зүйл болдог. Позитрон эмиссийн томографи компьютер томографи (PET/CT) нь хавдрын эд дэх метаболизмын өөрчлөлтийг илтгэх SUVmax үзүүлэлтээр хавдрын голомт болон үсэрхийллийг өндөр нарийвчлалтай илрүүлэх боломжтой оношилгооны чухал арга юм. Гэвч PET/CT дүрслэл нь олон огтлол бүхий нарийн бүтэцтэй тул уншилтыг гар ажиллагаагаар хийх нь цаг их зарцуулдаг, туршлагаас хамаарах субъектив ялгаа үүсгэдэг, тухайн салбарын мэргэжилтэн хомс нөхцөлд үр дүнгийн найдвартай байдал алдагдах эрсдэлтэй. Энэхүү судалгаанд PET болон CT дүрслэлийг хослуулан боловсруулж, эрхтэн бүрийн SUVmax үзүүлэлтийг автоматаар тодорхойлох, хэвийн байх ёстой утгатай харьцуулан метаболизмын идэвхжил нэмэгдсэн хэсгийг илрүүлэх хиймэл оюун ухаанд суурилсан алгоритм боловсруулахыг зорив. Боловсруулсан загвар нь эрхтэн тогтолцооны сегментчиллийг ашиглан SUVmax тархалтын зураглалыг үүсгэж, тухайн мэдээлэлд тулгуурлан умайн хүзүүний хорт хавдрын TNM/FIGO үе шатыг тогтоох, ойр орчмын болон алс эрхтний үсэрхийллийг үнэлэх боломжийг бүрдүүлнэ. SUVmax-ийн үнэлгээг хиймэл оюун ухаан ашиглал тооцоолон гаргах нь оношлогооны хурдыг нэмэгдүүлж, уншигч хоорондын хэлбэлзлийг бууруулан, мэргэжилтнүүдийн туршлагын зөрүүгээс үүдэх алдааг арилгах зэрэг давуу талтай. Түүнчлэн PET/CT шинжилгээний хүртээмж хязгаарлагдмал Монголын нөхцөлд оношлогооны үр ашиг, найдвартай байдлыг дээшлүүлэхэд өндөр ач холбогдолтой. Судалгааны дүнд боловсруулсан алгоритм нь умайн хүзүүний хорт хавдрын оношлогооны автоматжуулалтыг түргэтгэж, клиникийн шийдвэр гаргах үйл явцыг боловсронгуй болгох, улмаар өвчтөнд үйлчилгээ үзүүлэх хугацааг богиносгох боломжтой гэж дүгнэгдэв.

*Түлхүүр үг* — PET/CT, дүрс оношилгоо, SUVmax, метаболизмын идэвхжил, умайн хүзүүний хорт хавдар, үе шат, үсэрхийлэл, хиймэл оюун ухаан, гүн сургалт, сегментчилэл

## I. УДИРТГАЛ

Хиймэл оюун ухаанд суурилсан SUVmax тооцооллоор умайн хүзүүний хорт хавдрын үе шат болон үсэрхийллийг үнэлэх нь оношилгоо, эмчилгээний шийдвэр гаргалтад дэмжлэг үзүүлэх, эмнэлзүйн алдаа эрсдэлийг бууруулах, улмаар иргэдийн эрүүл мэндийн тусламж үйлчилгээний чанар, аюулгүй байдалд нийцсэн, найдвартай эмчилгээний боломжийг бүрдүүлэх зорилготой технологийн шийдэл юм. Умайн хүзүүний хорт хавдар нь дэлхий дахинд эмэгтэйчүүдийн дунд өвчлөлөөрөө дөрөвдүгээрт ордог бөгөөд Дэлхийн Эрүүл Мэндийн Байгууллага (ДЭМБ)-ын мэдээлснээр, 2023 оны байдлаар жилд ойролцоогоор 600,000 шинэ тохиолдол, 340,000 орчим нас баралт бүртгэгдэж байна. Энэхүү өндөр өвчлөл, нас баралтын түвшин нь умайн хүзүүний хорт хавдрыг нийгмийн эрүүл мэндийн ноцтой тулгамдсан асуудал болгож, оношилгоо, үе шат тогтоолт, үсэрхийллийн үнэлгээг илүү нарийвчлалтай, үр дүнтэй гүйцэтгэх шаардлагыг бий болгож байна. Одоогийн байдлаар уламжлалт дүрс оношилгоо, эмнэлзүйн үнэлгээнд тулгуурласан аргууд нь эмчийн туршлагаас ихээхэн хамааралтай, субъектив шинжтэй байх тохиолдол элбэг бөгөөд энэ нь эмчилгээний тактик тодорхойлох, өвчтөний

урьдчилсан таамаглалд сөргөөр нөлөөлөх эрсдэлтэй. Иймээс оношилгооны нарийвчлалыг сайжруулах, эмчилгээний шийдвэр гаргалтыг дэмжих шинэ технологийн шийдэл зайлшгүй шаардлагатай болж байна.

Үүний хүрээнд хиймэл оюун ухаанд суурилсан умайн хүзүүний хорт хавдрыг илрүүлэх, метаболизмын идэвхийг (SUVmax) тооцоолох, хавдрын тархалт болон үе шатыг үнэлэх үйл явцыг автоматжуулах замаар оношилгооны нарийвчлал, хурд, давтагдах боломжийг сайжруулж, эмнэлзүйн шийдвэр гаргалтыг дэмжих хиймэл оюун ухаанд суурилсан системийг боловсруулах боломж бүрдэж байна. Энэхүү технологийн шийдэл нь эмнэлзүйн алдаа эрсдэлийг бууруулах, эмчилгээний үр дүнг сайжруулах, улмаар эмэгтэйчүүдийн амьдралын чанар, эрүүл мэндийн тусламж үйлчилгээний аюулгүй байдалд нийцсэн шийдвэр гаргалтыг дэмжихэд чухал ач холбогдолтой юм.

Тиймээс хиймэл оюун ухаанд суурилсан оношилгоо, үнэлгээний аргачлалуудыг умайн хүзүүний хорт хавдрын менежментэд нэвтрүүлэх чиглэлээр судлаачид сүүлийн жилүүдэд идэвхтэй судалгаа явуулж, уг салбар эрчимтэй хөгжиж байна.

Өмнөх судалгаануудын үр дүнгээс харахад умайн хүзүүний хорт хавдрын эрт илрүүлэлт нь өвчтөний амьд үлдэх түвшинд шууд нөлөөлдөг бөгөөд нийт

тохиолдолд 5 жилийн амьд үлдэх хувь 30–55%-ийн хооронд хэлбэлздэг бол I үе шатанд илэрсэн тохиолдолд энэхүү үзүүлэлт 90%-иас дээш хүрдэг байна. Иймээс хавдрын үе шат, үсэрхийллийг нарийвчлалтай үнэлэх нь эмчилгээний тактик сонгох, эмчилгээний үр дүнг сайжруулахад нэн чухал ач холбогдолтой.

Энэ чиглэлээр хийгдсэн судалгаануудыг ашигласан технологи, арга аргачлалаас нь хамааруулан (i) дүрсийн боловсруулалтад суурилсан арга, (ii) төхөөрөмжид суурилсан арга, (iii) эдгээр аргын хосолсон арга гэсэн үндсэн гурван бүлэгт ангилан авч үздэг. Төхөөрөмжид суурилсан болон хосолсон аргууд нь өндөр нарийвчлалтай хэдий ч өртөг зардал ихтэй, техник хангамжийн хувьд хязгаарлалттай байх сул талтай. Харин дүрсийн боловсруулалтад суурилсан аргууд нь харьцангуй бага өртгөөр хэрэгжих боломжтой, программ хангамжид суурилсан, олон төвд нэвтрүүлэхэд тохиромжтой давуу талтай юм.

Иймд энэхүү судалгаанд эдгээр аргуудаас өртөг багатай боловч үр дүн сайтай тооцогдох дүрсийн боловсруулалтад суурилсан аргыг сонгон авч, PET/CT дүрснээс SUVmax үзүүлэлтийг тооцоолох замаар умайн хүзүүний хорт хавдрын үе шат болон үсэрхийллийг үнэлэх, дүгнэлт гаргахад эмчид дэмжлэг үзүүлэх, автоматжуулахыг зорьсон.

Умайн хүзүүний хорт хавдрын үе шат, үсэрхийллийг үнэлэх чиглэлээр хийгдсэн өмнөх судалгаанууд нь оношилгоонд ашигласан дүрсийн төрөл, тоон үзүүлэлт, тооцооллын аргачлалаасаа хамааран олон ялгаатай байна. Эдгээр судалгаанд MRI, CT, PET/CT зэрэг дүрс оношилгооны аргуудыг ашиглан хавдрын хэмжээ, хэлбэр, тархалтыг үнэлэхээс гадна метаболизмд суурилсан SUV, SUVmax, SUVmean, MTV (Metabolic Tumor Volume), TLG (Total Lesion Glycolysis) зэрэг олон төрлийн хагас тоон болон нийлмэл үзүүлэлтүүдийг хэрэглэсэн байна.

Дээрх арга, үзүүлэлтүүдийг харьцуулан судлахад MRI болон CT-д суурилсан морфологийн үнэлгээ нь анатомийн өөрчлөлтийг сайн илэрхийлдэг боловч хавдрын биологийн идэвхийг бүрэн тусгаж чаддаггүй сул талтай. Харин PET/CT-д суурилсан метаболизмын үнэлгээ нь хавдрын идэвх, түрэмгий шинж, үсэрхийллийн эрсдэлийг илүү мэдрэг, нарийвчлалтай илрүүлэх боломжтой болох нь олон судалгаагаар тогтоогдсон байна. SUVmean, MTV, TLG зэрэг үзүүлэлтүүд нь хавдрын нийт метаболизмын ачааллыг илэрхийлэх давуу талтай хэдий ч сонирхсон эрхтний бүсийн тодорхойлолт, сегментацийн аргаас ихээхэн хамааралтай, тооцооллын хувьд илүү нарийн төвөгтэй байдаг.

Иймээс энэхүү судалгаанд тооцооллын энгийн байдал, дахин давтагдах боломж, клиникийн практикт өргөн хэрэглэгддэг байдал зэргийг харгалзан PET/CT дүрс дээр суурилсан SUVmax үзүүлэлтийг үндсэн параметр болгон сонгов. SUVmax нь сонирхсон бүс дэх хамгийн өндөр FDG /Фтордезоксиглюкоз/ хуримтлалыг илэрхийлдэг тул

хавдрын метаболизмын идэвхийг төлөөлөх, үе шат болон үсэрхийллийг үнэлэхэд тохиромжтой, эмнэлзүйн хэрэглээнд баталгаажсан үзүүлэлт юм.

PET/CT болон SUVmax-д суурилсан энэхүү үнэлгээг илүү үр дүнтэй болгохын тулд бид дүрс боловсруулалт, объект таних чиглэлээр ашиглагддаг олон төрлийн гүн сургалтын алгоритмуудыг судалж, тэдгээрийн гүйцэтгэл, нарийвчлал, тооцооллын нөөцийн шаардлагыг харьцуулан авч үзсэн. Объект таних алгоритмуудын ялгаа нь үндсэндээ боловсруулалтын хурд, илрүүлэлтийн нарийвчлал, сүлжээний архитектурын нарийн төвөгтэй байдлын тэнцвэрт оршдог бөгөөд эдгээр нь бодит хэрэглээний нөхцөлтэй шууд уялддаг.

Судалгааны зорилго, ашиглах өгөгдлийн онцлог, PET/CT дүрсийн нягтрал, мөн бодит эмнэлзүйн орчинд хэрэгжих боломжийг харгалзан бид сүлжээний дизайн, алдааны хувь, нэгж хугацаанд боловсруулах фреймүүдийн тоо (FPS), дундаж гүйцэтгэлийн үзүүлэлтүүдийг нарийвчлан үнэлсний үндсэн дээр YOLO (You Only Look Once) загварыг сонгон авсан. YOLO нь дүрсийг нэг дамжлагаар боловсруулж объект илрүүлэх зарчимд тулгуурладаг тул PET/CT дүрс дээрх хавдрын сонирхсон бүсийг автоматаар илрүүлэх, улмаар SUVmax үзүүлэлтийг найдвартай, хурдан тооцоолох боломжийг бүрдүүлдэг.

Ингэснээр энэхүү судалгаа нь PET/CT-д суурилсан SUVmax тооцооллыг хиймэл оюун ухааны дүрс боловсруулалтын аргатай хослуулан ашигласнаар умайн хүзүүний хорт хавдрын үе шат, үсэрхийллийг үнэлэх өртөг багатай, үр дүн сайтай, клиникийн практикт нэвтрэх боломжтой технологийн шийдлийг боловсруулахад чиглэж байна.

Энэхүү судалгаанд санал болгож буй систем нь PET/CT дүрсэд суурилсан хавдрын метаболизмын идэвхийг тоон хэлбэрээр үнэлж, умайн хүзүүний хорт хавдрын үе шат болон үсэрхийллийг тодорхойлох шийдлийг танилцуулж байна. Уг систем нь машин сургалт, дүрсийн боловсруулалт, эмнэлзүйн дүрсийн шинжилгээ зэрэг дэвшилтэт аргачлалуудыг хослуулсан бөгөөд PET/CT дүрсээс хавдрын сонирхсон бүсийг автоматаар илрүүлж, SUVmax үзүүлэлтийг бодитой, давтагдах боломжтойгоор тооцоолдог.

Камераар биш харин PET/CT дүрсийн өгөгдөл тулгуурлан хавдрын байршил, тархалт, метаболизмын идэвхийг тодорхойлж, дүрс боловсруулалтын аргаар дүн шинжилгээ хийдэг нь энэхүү системийн гол онцлог юм. Дүрс боловсруулалтын салбарын сүүлийн үеийн ололт, хиймэл оюун ухааны загваруудыг ашигласнаар уламжлалт субъектив үнэлгээг бууруулж, эмнэлзүйн шийдвэр гаргалтыг дэмжих боломж бүрдэж байна. Иймд PET/CT-д суурилсан SUVmax тооцоолол бүхий энэхүү ухаалаг систем нь хавдрын үе шат тогтоолт, үсэрхийллийн эрт илрүүлэлтэд тулгарч буй асуудлуудыг шийдвэрлэх, оношилгооны

нарийвчлалыг сайжруулах, улмаар эмчилгээний үр дүнг нэмэгдүүлэхэд чухал ач холбогдолтой юм.

Эцэст нь, бид PET/CT дүрс дээр бодит хугацаанд сонирхсон бүс илрүүлэх, SUVmax тооцоолох системийн хөгжлийн чиг хандлагыг тодорхойлж, цаашдын судалгаа, хөгжүүлэлтийн боломжит чиглэлүүдийг судалсан. Мөн системийн онцлог, давуу талуудыг SUVmean, MTV, TLG зэрэг бусад PET үзүүлэлтэд суурилсан судалгаануудтай харьцуулан авч үзснээр, манай санал болгож буй шийдэл нь тооцооллын энгийн байдал, клиникийн хэрэглээнд нийцэх байдал, өртөг-үр ашгийн харьцаагаараа ялгарч байгааг тодотгосон.

Судалгааны ажлуудын харьцуулалтаас харахад өмнөх ижил төстэй судалгаанууд нь өгөгдлийн багцын хэмжээ хязгаарлагдмал, автомат сегментаци дутмаг, эсвэл тооцооллын нарийн төвөгтэй байдал өндөр зэрэг сул талуудтай байсан бол энэхүү судалгаанд YOLO загварт суурилсан объект илрүүлэлтийг ашиглан PET/CT дүрс дээрх хавдрын бүсийг автоматаар тодорхойлж, SUVmax-ийг найдвартай тооцоолох боломжийг бүрдүүлсэн нь онцлог юм.

Ингэснээр дан ганц хавдрыг илрүүлэхээс гадна түүний метаболизмын идэвх, орон зайн тархалт, үсэрхийллийн боломжит хэв шинжийг тоон мэдээлэлд суурилан үнэлэх боломж бүрдэж, эмч, мэргэжилтнүүдэд илүү бодитой, нотолгоонд суурилсан шийдвэр гаргахад дэмжлэг үзүүлэх цогц системийг санал болгож байна.

## II. ХЭРЭГЛЭГЧИЙН СУДАЛГАА

### A. Хэрэглэгчийн тодорхойлолт

Энэхүү судалгааны хэрэглэгч нь умайн хүзүүний хорт хавдраар оношлогдож, онош баталгаажуулалт, үе шат тогтоолт болон эмчилгээний үр дүнгийн үнэлгээний зорилгоор PET/CT шинжилгээнд хамрагдсан эмэгтэй өвчтөнүүд юм. Эдгээр өвчтөнүүд нь ихэвчлэн 30–65 насны, хөдөлмөрийн насны эмэгтэйчүүд байх ба хавдрын үе шат, эмчилгээний тактикаас хамааран давтан дүрс оношилгоонд орох шаардлагатай болдог.

Умайн хүзүүний хорт хавдартай өвчтөнүүдийн хувьд хавдрын үе шат, үсэрхийллийн үнэлгээ нь эмчилгээний аргыг (мэс засал, хими эмчилгээ, туяа эмчилгээ, хавсарсан эмчилгээ) сонгоход шууд нөлөөлдөг. Иймээс оношилгооны үнэн зөв, хурдан, давтагдах боломжтой байдал нь өвчтөний амьд үлдэх магадлал, амьдралын чанарт чухал ач холбогдолтой.

### B. Хэрэглэгчийн өнөөгийн тулгамдсан асуудал

PET/CT шинжилгээ нь хавдрын метаболизмын идэвхийг үнэлэх өндөр ач холбогдолтой боловч дараах хүндрэл, бэрхшээлүүд өвчтөнүүдийн хувьд түгээмэл ажиглагддаг. Үүнд:

- Дүрс уншилт, тайлбар нь ихэвчлэн эмчийн туршлагаас хамааралтай тул өөр өөр эмчийн дүгнэлт хоорондоо зөрөх тохиолдол гардаг.

- SUVmax зэрэг тоон үзүүлэлтийг гар ажиллагаагаар тодорхойлох нь цаг их шаарддаг тул хариу удаашрах.
- Давтан шинжилгээ хийхэд өмнөх үр дүнтэй харьцуулахад субъектив үнэлгээ давамгайлах.
- Онош тодорхойгүй, эсвэл хоорондоо зөрүүтэй дүгнэлтээс үүдэн өвчтөнд сэтгэл зүйн дарамт үүсэх
- Монгол Улсын нөхцөлд PET/CT шинжилгээний хүртээмж хязгаарлагдмал /улсын-1,хувийн-1эмнэлэг/, мэргэжлийн хүний нөөц дутмаг байх. Эдгээр хүчин зүйлс нь өвчтөнд үзүүлэх эмнэлзүйн тусламж үйлчилгээний чанар, тасралтгүй байдалд сөргөөр нөлөөлөх эрсдэлтэй.

### C. Хэрэглэгчийн хэрэгцээ, шаардлага

Умайн хүзүүний хорт хавдраар эмчлэгдэж буй өвчтөнүүдийн хувьд дараах үндсэн хэрэгцээ, шаардлагууд тодорхойлогдож байна. Үүнд:

- Оношилгооны үнэн зөв байдал буюу хавдрын үе шат, үсэрхийллийг алдаагүй, бодитой үнэлэх нь өвчтөнд хамгийн чухал шаардлага юм.
- Шинжилгээний хариу хурдан гарах буюу PET/CT шинжилгээний дүнг богино хугацаанд боловсруулах нь эмчилгээ эхлэх хугацааг наашлуулж, сэтгэл зүйн дарамтыг бууруулна.
- Давтагдах боломжтой, стандартчилсан үнэлгээ буюу давтан шинжилгээнд ороход SUVmax болон бусад үзүүлэлтүүдийг өмнөх үр дүнтэй бодитой харьцуулах боломжтой байх.
- Субъектив алдаа багатай дүгнэлт буюу Эмчийн туршлага, ачааллаас хамаарах алдааг багасгасан, автоматжуулсан тоон үнэлгээ.
- Эмчилгээний шийдвэрийг дэмжих ойлгомжтой мэдээлэл буюу өвчтөнд тайлбарлахад хялбар, ойлгомжтой, тоон үндэслэлтэй оношилгооны дүн.

### D. Судалгаанд санал болгож буй системийн хэрэглэгчид үзүүлэх давуу тал

Энэхүү судалгаанд боловсруулж буй хиймэл оюун ухаанд суурилсан SUVmax автомат тооцооллын систем нь дээр дурдсан хэрэглэгчийн хэрэгцээг дараах байдлаар хангана. Үүнд:

- ✓ PET/CT дүрсээс хавдрын сонирхсон бүсийг автоматаар илрүүлж, SUVmax-ийг бодитой, давтагдах боломжтойгоор тооцоолно.
- ✓ Хавдрын TNM/FIGO үе шат болон бүс нутгийн, алс эрхтний үсэрхийллийг илүү нарийвчлалтай үнэлэх боломж бүрдүүлнэ.
- ✓ Дүрс уншилтын хугацааг багасгаж, оношилгооны хариуг түргэсгэнэ.
- ✓ Уншигч хоорондын зөрүүг бууруулж, өвчтөнд илүү найдвартай дүгнэлт хүргэх нөхцөлийг бүрдүүлнэ

Эмчилгээний явцын хяналт, үр дүнгийн үнэлгээнд SUVmax-ийн өөрчлөлтийг тоон хэлбэрээр харьцуулах боломж олгоно

Үүнээс дүгнэхэд, умайн хүзүүний хорт хавдраар эмчлэгдэж буй өвчтөнүүдийн хувьд оношилгооны нарийвчлал, хурд, найдвартай байдал нь амьд үлдэх

түвшин, амьдралын чанарт шууд нөлөөлдөг чухал хүчин зүйл юм. Хиймэл оюун ухаанд суурилсан SUVmax автомат тооцооллын систем нь өвчтөн төвтэй, нотолгоонд суурилсан, стандартчилсан оношилгооны орчинг бүрдүүлж, эмнэлзүйн алдаа эрсдэлийг бууруулах замаар хэрэглэгчийн бодит хэрэгцээг хангах өндөр боломжтой гэж үзэв.

### III. СУДЛАГДСАН БАЙДАЛ

Өмнөх судалгаануудад умайн хүзүүний хорт хавдрын үе шат, үсэрхийллийг үнэлэх зорилгоор PET/CT дүрс оношлогоонд суурилсан метаболик үзүүлэлтүүдийг өргөнөөр ашиглаж ирсэн байдаг. Ялангуяа 18F-FDG PET/CT шинжилгээгээр хэмжигддэг SUVmax, SUVmean, MTV, TLG зэрэг үзүүлэлтүүд нь хавдрын биологийн идэвх, түрэмгий шинж, эмчилгээний үр дүн болон урьдчилсан таамаглалтай статистик ач холбогдолтой холбоотой болохыг олон судалгаагаар тогтоосон байна.

Гэвч эдгээр судалгааны ихэнх нь PET/CT дүрс дээр сонирхсон бүсийг (ROI) гар ажиллагаагаар тодорхойлж, SUVmax-ийг хэмжих уламжлалт аргачлалд тулгуурласан бөгөөд энэ нь дараах сул талуудыг үүсгэж байна. Үүнд:

- ROI сонголт нь эмчийн туршлагаас хамаарч субъектив байх
- Уншигч хоорондын хэлбэлзэл (inter-observer variability) ихтэй
- Давтан шинжилгээний үед харьцуулах боломж хязгаарлагдмал
- Цаг хугацаа, хүний нөөц их шаарддаг

Иймээс SUVmax зэрэг метаболик үзүүлэлтүүдийг илүү бодитой, давтагдах боломжтой, автоматжуулсан байдлаар тооцоолох шаардлага судалгааны түвшинд ч, клиникийн практикт ч тулгамдсан асуудал болж байна.

#### A. Судалгааны ажил

Takagi et al. (2018) нарын судалгаанд PET/CT шинжилгээгээр хэмжигдсэн SUVmax үзүүлэлтийг умайн хүзүүний хорт хавдрын эхний шатны үнэлгээнд ашиглах боломжийг судалсан. Судалгааны үр дүнд SUVmax нь өвчний шат  $\leq I$  болон  $\geq II$  хооронд статистик ач холбогдолтой ялгаатай байгааг харуулсан бөгөөд өндөр SUVmax утга нь өвчний ахилт, дахин сэргэлтийн эрсдэл өндөртэй холбоотой болохыг тогтоосон.

❖ Тус судалгаа нь SUVmax-ийг эмнэлзүйн чухал үзүүлэлт болохыг нотолсон боловч хэмжилт нь гар ажиллагаанд тулгуурласан, автомат сегментаци хийгдээгүй, бодит хугацааны хэрэглээ хязгаарлагдмал байсан сул талтай.

#### B. Судалгааны ажил

Luo et al. (2021) нарын судалгаанд умайн хүзүүний хорт хавдрын эмчилгээний үр дүнг урьдчилан таамаглах зорилгоор статистик загвар, дүрс оношлогоо болон машин сургалтын аргуудыг харьцуулан судалсан. Судалгаанд MRI, CT, PET/CT дүрсийн өгөгдөл болон радиомикс, нейрон сүлжээ,

Random Forest зэрэг машин сургалтын аргуудыг ашигласан.

❖ Судалгааны дүгнэлтээс харахад машин сургалтын аргууд нь уламжлалт статистик аргаас олон хувьсагчтай өгөгдөл дээр илүү давуу талтай боловч өгөгдлийн хэмжээ бага, загварын тайлбарлагч чанар сул, клиник хэрэглээнд шууд нэвтрүүлэхэд хүндрэлтэй байгааг онцолсон.

#### C. Судалгааны ажил

Otani et al. (2023) нар умайн хүзүүний хорт хавдрын хоёр гол хистологийн төрөл болох squamous cell carcinoma болон adenocarcinoma-ийн өвчтөнүүдэд эмчилгээний өмнөх FDG PET/CT-ээр хэмжигдсэн SUVmax болон бусад метаболик параметруудийн урьдчилан таамаглах чадамжийг судалсан.

❖ Судалгаагаар PET/CT-ийн метаболик үзүүлэлтүүд нь өвчний урьдчилсан таамаглалд ач холбогдолтой боловч хистологийн төрөл нь SUVmax-ийн тайлбарт нөлөөлөх боломжтойг тэмдэглэсэн. Энэ нь SUVmax-ийг ганцаарчилсан үзүүлэлт бус, автомат, олон параметртэй системийн хүрээнд ашиглах шаардлагыг харуулж байна.

#### D. Судалгааны ажил

Sari et al. (2023) нар IVB шатны умайн хүзүүний хорт хавдартай өвчтөнүүдэд метастаз болон анхдагч хавдрын SUVmax-ийн харьцааг (metastasis-to-tumor SUVmax ratio) шинэ урьдчилан таамаглах индекс болгон судалсан. Судалгааны үр дүнд энэхүү харьцаа өндөр байх нь муу урьдчилсан таамаглалтай холбоотой байж болохыг харуулсан.

❖ Гэвч энэхүү харьцааг бодит практикт хэрэглэхэд метастаз болон анхдагч голомтыг нарийн, хурдан илрүүлэх автомат механизм дутмаг байгаа нь тодорхой болсон.

#### E. Судалгааны ажил

Zhang et al. (2021) нарын судалгаанд SUVmax, MTV, TLG зэрэг PET/CT-ийн метаболик параметруудийг умайн хүзүүний хорт хавдрын эмчилгээний үр дүн, ахилт, дахин сэргэлттэй уялдуулан судалсан. Судалгаагаар эдгээр үзүүлэлтүүд нь статистик ач холбогдолтой холбоотой болохыг тогтоосон боловч параметр бүрийг гар ажиллагаагаар тодорхойлсон, сегментацийн аргачлал ялгаатай байсан нь үр дүнг ерөнхийчлэхэд хүндрэлтэй байжээ.

❖ Судалгааны дүгнэлтээр PET/CT-ийн метаболик параметруудийг клиник практикт ашиглах боломжтой боловч автоматжуулалт, стандартчлал зайлшгүй шаардлагатайг онцолсон.

#### Судалгааны ажлуудын харьцуулсан дүгнэлт

Дээр дурдсан судалгаанууд нь PET/CT-д суурилсан SUVmax болон бусад метаболик үзүүлэлтүүд нь умайн хүзүүний хорт хавдрын үе шат тогтоолт, үсэрхийллийн үнэлгээ, эмчилгээний төлөвлөлт, урьдчилсан таамаглалд чухал ач холбогдолтой болохыг нотолж байна. Гэвч дараах нийтлэг сул талууд ажиглагдаж байна. Үүнд:

- SUVmax тооцоолол гар ажиллагаанд тулгуурласан
- Автомат сегментаци, объект илрүүлэлт дутмаг
- Уншигч хоорондын хэлбэлзэл өндөр
- Бодит хугацааны хэрэглээ хязгаарлагдмал
- AI-д суурилсан системийг клиник практикт бүрэн нэвтрүүлээгүй

Иймд дээрх судалгаануудын сул талыг нөхөх зорилгоор PET/CT дүрсээс хавдрын голомт болон үсэрхийллийг хиймэл оюун ухаан, гүн сургалтын аргаар илрүүлж, SUVmax-ийг стандартчилсан, хурдан, давтагдах боломжтой байдлаар тооцоолох шинэ аргачлал боловсруулах шаардлага зүй ёсоор тавигдаж байна.

Энэхүү судалгааны ажил нь дээрх судалгаануудын үр дүнг нэгтгэн, тэдгээрийн хязгаарлалтыг арилгах зорилгоор AI-д суурилсан SUVmax автомат тооцооллын системийг санал болгож буйгаараа онцлог бөгөөд умайн хүзүүний хорт хавдрын үе шат болон үсэрхийллийг илүү үнэн зөв, клиникийн практикт хэрэгжих боломжтой түвшинд үнэлэхэд чиглэж байна.

**Судалгааны ажлуудын харьцуулсан хүснэгт**

Хүснэгт 1. Умайн хүзүүний хорт хавдрын PET/CT-д суурилсан судалгаануудын харьцуулалт

Судалгааны ажил	Арга зүй	Давуу тал	Хязгаарлалт	Миний судалгаатай нийцэмж
Takagi et al., 2018	Гар ажиллаг аатай ROI, статистик шинжилгээ	SUVmax нь үе шат, ахилттай холбоотой нотолсон	Автоматжилтгүй, уншигчийн субъектив нөлөө их	SUVmax-ийн ач холбогдлыг баталсан суурь судалгаа
Luo et al., 2021	Машин сургалт, статистик загвар	AI ба дүрс оношлогооны хосоллын боломж	Interpretability сул, клиник нэвтрэлт хязгаарлагдмал	AI ашиглах концепцийн суурь
Otani et al., 2023	Хистологийн ангилалд суурилсан анализ	Урьдчилан таамаглах чадамжийг харуулсан	Хистологийн нөлөө, автомат сегментаци дутмаг	SUVmax-ийг олон хүчин зүйлтэй хослуулах шаардлагыг харуулсан
Sari et al., 2023	Харьцаат үзүүлэлт	Шинэ прогностик индекс санал болгосон	Метастаз, голомтыг гар ажиллагаагаар тодорхойлсон	AI-аар ratio-г автомат тооцоолох боломж
Zhang et al., 2021	Статистик корреляци	Метаболик параметруудийн ач холбогдлыг нотолсон	Тооцоолол төвөгтэй, стандартчилал сул	Автоматжуулалтын хэрэгцээг баталсан

Энэхүү судалгаа	YOLO + гүн сургалт + сегментаци	Хурдан, стандартчилсан, давтагдах боломжтой	Өгөгдлийн хэмжээ өсгөх шаардлагатай	Клиник практикт шууд хэрэгжих боломж
-----------------	---------------------------------	---	-------------------------------------	--------------------------------------

Энэхүү судалгааны ажил нь өмнөх PET/CT-д суурилсан умайн хүзүүний хорт хавдрын судалгаануудын үр дүнд тулгуурлан, тэдгээрийн нийтлэг сул талыг арилгах зорилготойгоор боловсруулагдсан цогц шийдэл юм. Өмнөх судалгаанууд SUVmax болон бусад метаболик параметрууд нь хавдрын үе шат, үсэрхийлэл, эмчилгээний үр дүнтэй нягт холбоотой болохыг нотолсон боловч эдгээр үзүүлэлтүүдийг тодорхойлох үйл явц нь ихэвчлэн гар ажиллагаатай, субъектив шинжтэй, клиникийн бодит хэрэглээнд цаг хугацаа их шаарддаг байсаар ирсэн.

Харин энэхүү судалгааны ажлын гол давуу тал нь PET/CT дүрс дээрх хавдрын голомт болон үсэрхийллийг хиймэл оюун ухаан, гүн сургалтын (YOLO) загвар ашиглан автоматаар илрүүлж, SUVmax-ийг стандартчилсан, хурдан, давтагдах боломжтой байдлаар тооцоолдогт оршино. Ингэснээр уншигч хоорондын хэлбэлзлийг мэдэгдэхүйц бууруулж, эмчийн туршлагаас хамаарах субъектив алдааг арилгах боломж бүрдэж байна.

Мөн энэхүү судалгаа нь зөвхөн хавдрын илрүүлэлтэд хязгаарлагдахгүй, харин SUVmax тархалтын мэдээлэлд тулгуурлан TNM/FIGO үе шат тогтоолт, бүс нутгийн болон алс эрхтний үсэрхийллийн үнэлгээ хийх боломжийг нэг дор шийдсэнээрээ онцлог юм. Энэ нь өмнөх судалгаануудад тус тусад нь авч үзэгдэж байсан асуудлуудыг нэг системд нэгтгэж, клиникийн шийдвэр гаргалтыг бодитоор дэмжих түвшинд хүргэж байна.

Түүнчлэн Монгол Улсын нөхцөлд PET/CT шинжилгээний хүртээмж хязгаарлагдмал, мэргэжлийн хүний нөөц дутмаг байгаа өнөөгийн байдалд энэхүү автоматжуулсан AI систем нь оношлогооны үр ашгийг нэмэгдүүлэх, өвчтөнд үйлчилгээ үзүүлэх хугацааг богиносгох, эмчилгээний үр дүнг сайжруулах практик ач холбогдолтой гэж үзэж байна.

Иймд уг судалгаа нь PET/CT-д суурилсан SUVmax үнэлгээг шинжлэх ухааны судалгаанаас клиникийн практик руу шилжүүлэх гүүр болж, умайн хүзүүний хорт хавдрын оношилгоо, үе шат тогтоолт, үсэрхийллийн үнэлгээнд хиймэл оюун ухааныг бодитоор нэвтрүүлэх шинэ шатанд хүргэж байна.

**IV. ТӨСЛИЙН ХЭСЭГ**

Энэхүү хэсэгт PET/CT дүрс оношилгоонд суурилсан умайн хүзүүний хорт хавдрын үе шат болон үсэрхийллийг үнэлэх хиймэл оюун ухаанд суурилсан системийн бүтэц, үйл ажиллагааны

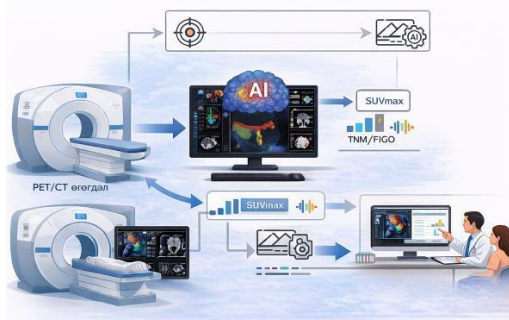
дараалал, хэрэгжилтийн үндсэн зарчмуудыг тодорхойлно. Төслийн хүрээнд боловсруулсан систем нь хавдрын сонирхсон бүсийг автоматаар илрүүлэх, SUVmax үзүүлэлтийг стандартчилсан байдлаар тооцоолох, улмаар TNM/FIGO үе шат тогтоолтыг дэмжихэд чиглэсэн бөгөөд клиникийн практикт ашиглах боломж, давуу болон сул талыг цогцоор нь авч үзсэн.

Мөн энэхүү судалгаа нь өвчтөний бодит өгөгдөл дээр суурилан хийгдэж байгаа тул өгөгдлийн аюулгүй байдал, нууцлалыг хангах үүднээс өгөгдлийн багцыг бүрдүүлсний дараа шууд ашиглахгүйгээр холбогдох стандартын дагуу дата анонимжуулалт хийж боловсруулсан болно. Үүнд хувь хүнийг таних боломжтой бүх мэдээллийг (нэр, регистрийн дугаар, огноо, эмнэлгийн дугаар зэрэг) устгах буюу кодчилох замаар өгөгдлийг танигдах боломжгүй хэлбэрт шилжүүлж, улмаар хиймэл оюун ухааны загвар сургах болон үнэлгээ хийх процессод ашигласан.

### Төслийн үйл ажиллагаа

Төслийн үйл ажиллагаа нь умайн хүзүүний хорт хавдраар өвчилсөн эмэгтэйчүүдийн оношилгоо, үе шат тогтоолт, эмчилгээний хяналтыг сайжруулахад чиглэсэн бөгөөд PET/CT дүрс оношилгоонд суурилсан SUVmax автомат тооцооллын ухаалаг системийг хөгжүүлэх, турших, клиникийн хэрэглээнд нийцүүлэх ажлуудаас бүрдэнэ.

Төслийн эхний шатанд умайн хүзүүний хорт хавдрын PET/CT дүрсийн өгөгдөлд ашиглагдаж буй SUVmax тодорхойлох уламжлалт аргачлалууд, хиймэл оюун ухаанд суурилсан объект илрүүлэлт, сегментацийн технологиудыг судалж, гүн сургалтын YOLO алгоритмыг ашиглан хавдрын голомт болон үсэрхийллийг автоматаар илрүүлэх үндсэн загварыг боловсруулсан.



1-р зураг. Системийн ерөнхий ажиллагаа

Энэхүү системийн ерөнхий ажиллагааны зурагт бодит PET/CT дүрс оношилгоонд суурилан умайн хүзүүний хорт хавдрыг илрүүлэх, метаболизмын идэвхийг (SUVmax) тооцоолох, хавдрын тархалт болон үе шатыг үнэлэх үйл явцыг автоматжуулах замаар оношилгооны нарийвчлал, хурд, давтагдах боломжийг сайжруулж, эмнэлзүйн шийдвэр гаргалтыг дэмжих хиймэл оюун ухаанд суурилсан системийн архитектурыг харуулав. Өгөгдөл оруулах, дүрс боловсруулалт, YOLO загварт

суурилсан объект илрүүлэлт, ROI сегментаци, SUVmax тооцоолол, үе шат тогтоолтыг дэмжих мэдээлэл боловсруулах модулиудын уялдаа холбоог харуулсан.

Системийн үндсэн ажиллагаа дараах үе шатуудаас бүрдэнэ.

### 1. Өгөгдөл хүлээн авах ба анхны боловсруулалт

Энэ нь эхний шат бөгөөд системд дата анонимжуулалт хийж боловсруулах, PET/CT DICOM өгөгдөл оруулах, зураг авах, SUV тооцоолол хийх, 3D хэмжээст дүрсийг гаргах зэрэг үйлдлүүдийг багтаана. Энэ шатанд өгөгдлийг боловсруулж, шаардлагатай бүх анхны мэдээллийг гаргаж авна.

### 2. Дүрс боловсруулах ба шинжилгээ хийх

Энэ шат нь дараагийн боловсруулах үе юм. Тухайлбал, элэгний арын SUV тооцоолол хийх, адаптив хязгаар тогтоох, холбогдсон бүрдэл хэсгүүдийг илрүүлэх, элэгний харьцааг тооцох зэрэг үйлдлүүдийг багтааж, дүрсийг нарийвчлан боловсруулна. Энэ үе шатанд шинжилгээ хийж, эмчилгээнд шаардлагатай нарийвчилсан мэдээллийг гаргана.

### 3. Тайлан гаргах ба үр дүн боловсруулалт

Эцсийн шат нь бүхий л боловсруулсан өгөгдлийг ашиглан эмчилгээний тайлан дүгнэлт гаргах, 3D визуализаци хийх, үр дүнг экспортлох зэрэг үйлдлүүдийг багтаана. Тайлан болон дүгнэлт нь эмч, өвчтөнд өгөгдлийн нарийвчилсан тайлбарыг олгож, үр дүнг шийдвэрлэхэд тусална.

### Төслийн шинэлэг тал

Энэхүү төслийн шинэлэг байдал нь өвчтөний бодит PET/CT зурган өгөгдөлд суурилсан умайн хүзүүний хорт хавдрын үнэлгээг хиймэл оюун ухааны аргаар бүрэн автоматжуулж, клиникийн практикт бодитоор ашиглах боломжтой шийдэл санал болгож буйд оршино.

Нэгдүгээрт, SUVmax-ийг гар ажиллагаагүй, стандартчилсан байдлаар автоматаар тооцоолдог нь уншигч хоорондын субъектив ялгааг бууруулж, оношилгооны найдвартай байдлыг нэмэгдүүлж байна.

Хоёрдугаарт, зөвхөн анхдагч хавдрыг бус, бүс нутгийн болон алс үсэрхийллийг нэг системийн хүрээнд илрүүлж, метаболизмын идэвхийг иж бүрэн үнэлэх боломжийг бүрдүүлсэн.

Гуравдугаарт, SUVmax үзүүлэлтийг TNM/FIGO үе шат тогтоолтын логиктой уялдуулан ашиглах боломж олгосноор эмчилгээний тактик сонголт, эмчилгээний хариу урвалыг үнэлэхэд дэмжлэг үзүүлнэ.

Дөрөвдүгээрт, нэмэлт өндөр өртөгтэй төхөөрөмж шаардахгүй, программ хангамжид суурилсан

шийдэл нь Монгол Улсын нөхцөлд практик ач холбогдол өндөртэй.

**Төслийн давуу тал**

- SUVmax-ийг стандартчилсан, давтагдах боломжтой байдлаар тооцоолно.
- PET/CT уншилтын хугацааг мэдэгдэхүйц хэмнэнэ.
- Клиник шийдвэр гаргалтыг дэмжинэ.
- Давтан шинжилгээг тоон байдлаар харьцуулах боломжтой.
- Бусад хавдрын төрөлд өргөтгөх боломжтой.

**Сул тал**

- Сургалтын өгөгдлийн хэмжээ, чанараас гүйцэтгэл хамаарна.
- PET/CT төхөөрөмжийн хүртээмж хязгаарлагдмал.
- Клиник орчинд бүрэн нэвтрүүлэхийн өмнө илүү өргөн хүрээний туршилт шаардлагатай.

Үүнээс дүгнэхэд, энэхүү төслийн хүрээнд өвчтөний бодит PET/CT дүрс оношилгоонд суурилсан умайн хүзүүний хорт хавдрын SUVmax автомат тооцооллын ухаалаг системийг боловсруулж, хавдрын үе шат болон үсэрхийллийг үнэлэх клиник ач холбогдол бүхий шийдлийг санал болголоо. Судалгааны үр дүн нь уламжлалт гар ажиллагааг халж, оношилгооны хурд, нарийвчлал, давтагдах боломжийг сайжруулах, улмаар эмнэлзүйн шийдвэр гаргалтыг бодитой, нотолгоонд суурилсан болгоход чухал хувь нэмэр оруулна гэж үзэж байна.

**V. МОДУЛЬ**

Манай систем нь өвчтөний PET/CT дүрс оношилгоонд суурилан умайн хүзүүний хорт хавдрыг илрүүлэх, метаболизмын идэвхийг (SUVmax) тооцоолох, хавдрын тархалт болон үе шатыг үнэлэх үйл явцыг автоматжуулах замаар оношилгооны нарийвчлал, хурд, давтагдах боломжийг сайжруулж, эмнэлзүйн шийдвэр гаргалтыг дэмжих хиймэл оюун ухаанд суурилсан системийг боловсруулахыг зорьсон бөгөөд 3 үндсэн модулиас бүрдэнэ. Модулиуд хоорондоо уялдаа холбоотой ажиллаж, клиникийн хэрэглээнд зориулсан нэгтгэсэн үр дүнг бий болгоно.

**Модулиуд:**

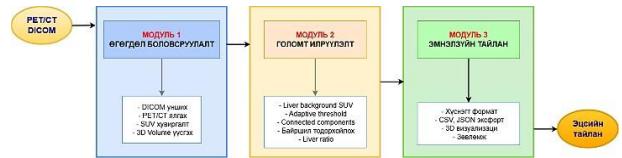
1. **Модуль 1: Өгөгдөл боловсруулалт**  
Энэхүү модуль нь системд орж ирж буй өгөгдлийн анхан шатны боловсруулалтыг гүйцэтгэх үндсэн хэсэг юм. Уг шатанд PET/CT төрлийн дүрсүүдийг DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) стандарт форматаар хүлээн авна.
2. **Модуль 2: Голомт илрүүлэлт**  
Энэхүү модуль нь дүрсийг боловсруулж, өвчний шинж тэмдгийг илрүүлэхэд чиглэнэ.

Элэгний арын зузаан хэсгээс SUV тооцоолол хийж, адаптив хязгаар тогтоох арга ашиглан зурган дээрх эх сурвалжийн мэдээллийг илүү зөв тусгах бөгөөд, холбогдсон бүрдэл хэсгүүдийг тодорхойлон, хураангуй мэдээлэл гаргана. Мөн элэгний харьцааг тооцож, өвчний тархалтыг илрүүлнэ.

3. **Модуль 3: Дүгнэлт болон тайлан**  
Энэхүү модуль нь бүх боловсруулсан өгөгдлийг эмчилгээний дүгнэлт болон тайлан болгон гаргаж, хэрэглэгчид эсвэл эмч нарт тайлагнаж, эмчилгээний үр дүнг танилцуулна. Өгөгдлийг CSV болон JSON форматуудад экспортлох боломжтой бөгөөд 3D дүрс ашиглан тайланг илүү ойлгомжтой харуулах бөгөөд эцсийн тайланд оношлогоо, эмчилгээний зааварчилгаа, үр дүнг бүрэн тайлагнана.

**Модулиудын холбоо хамаарал:**

- Өгөгдөл боловсруулалт → Голомт илрүүлэлт → Эмнэлзүйн тайлан, дүгнэлт гаргах
- Модулиудын хоорондын өгөгдлийн урсгал (data flow) нь нэг модулын гарсан өгөгдлийг дараагийн модульд дамжуулж, эцсийн тайланг гаргана.



2-р зураг. Модулиудын холбоо хамаарал

Системийн модуль бүр нь дарааллын дагуу мэдээллийг боловсруулж, эцсийн үр дүнг клиникийн хэрэглээнд ашиглахад бэлэн болгоно. Урсгал нь PET/CT өгөгдлөөс эхлэн дүрсийн боловсруулалт, хавдрын голомт илрүүлэлт, метаболизмын идэвхийг тооцоолох, үе шат тогтоох, тайлан болон дүгнэлт гаргах хүртэлх бүх үндсэн үйл явцын холбоог харуулж байна.

**VI. ӨГӨГДӨЛ БОЛОВСРУУЛАЛТ**

Энэ шат нь өгөгдлийг анх боловсруулдаг хэсэг юм. PET/CT DICOM форматаар өгөгдөл орж ирнэ. DICOM нь медицин зураг боловсруулалтын стандарт формат бөгөөд, энэ нь бидэнд PET (Positron Emission Tomography) болон CT (Computed Tomography) зураг авах боломжийг олгодог. Модуль 1-ийн үндсэн зорилго нь эдгээр зурагнуудыг боловсруулсны дараа, тухайн мэдээллээс шаардлагатай өгөгдлийг боловсруулан гаргах юм.

- **PET/CT дүрс:** Энэ нь өвчтөний биед байгаа өвчин эсвэл эдийн дүрсийг тодорхойлж, эмчилгээнд туслах гол өгөгдөл юм.
- **SUV тооцоолол:** SUV (Standardized Uptake Value) нь тухайн хэсгийн радиологийн хэмжилтийг стандартад тохируулсан утга юм. Эдгээр утгуудыг ашиглан эмчилгээний үр дүнг илүү нарийвчилж үнэлэх боломжтой.
- **3D хэмжээст дүрс:** Энэ шатанд 3D дүрсүүдийг гаргаж авах бөгөөд, энэ нь эд эрхтний бүтцийг харах болон үнэлэхэд маш чухал юм. Энэ нь эмчид дүрсийг томруулан, нарийвчилсан үзүүлэлтүүдийг харах боломжийг олгоно.

Энэхүү модуль нь дараагийн AI боловсруулалтын чанарт шууд нөлөөлөх тул дангаар болон системийн урсгалын хувьд (PET/CT → Дүрс боловсруулалт → Объект илрүүлэлт → SUVmax тооцоолол → Үе шат тогтоолт → Үр дүн гаргах) маш чухал үүрэгтэй. Энэхүү модуль нь дараагийн AI боловсруулалтын чанарт шууд нөлөөлнө.

## VII. ГОЛОМТ ИЛРҮҮЛЭЛТ

Модуль 2 нь дүрсийг боловсруулж, өвчний шинж тэмдгүүдийг илрүүлэхээр зорилготой. Энэ шатанд хэд хэдэн хэрэгтэй үйлдлүүд хийгдэнэ.

- **Элэгний арын SUV тооцоолол:** Элэгний арын бүсийн SUV тооцоог гаргаж, өвчний тархалтыг тодорхойлоход ашигладаг. Элэг нь хүний биеийн чухал эрхтэн учраас энэ бүсийн шинжилгээ нь нэн чухал.
- **Адаптив хязгаар тогтоох:** Адаптив хязгаар тогтоох нь зураг дээрх шууд утгуудыг өөрчлөхөд зориулагдсан арга юм. Энэ нь тухайн зурган дээрх эх сурвалжийн мэдээллийг илүү зөв тусгах зорилготой.
- **Холбогдсон бүрдэл хэсгүүд:** Тухайн зургийн холбогдсон бүрдэл хэсгүүдийг тодорхойлон, эдгээр хэсгүүдийг бүрдүүлж, хураангуй мэдээлэл гаргана.
- **Элэгний харьцаа:** Элэгний харьцааг тооцож, өвчний үед элэгний өөрчлөлтийг тодорхойлно. Энэ нь эмчид энгийн үзүүлэлтүүдийг илүү нарийвчилж, өвчнийг илрүүлэхэд туслах ач холбогдолтой.

## VIII. ЭМНЭЛЗҮЙН ТАЙЛАН

Эцсийн шат нь бүхий л боловсруулсан өгөгдлийг эмчилгээний тайлан буюу дүгнэлт болгон гаргаж, хэрэглэгчид танилцуулна. Энэ нь хамгийн чухал шат бөгөөд өвчтөнд эмчилгээний үр дүнг мөн танилцуулдаг.

- **Экспорт хийх формат:** Энд өгөгдлийг олон төрлийн форматаар гаргаж болох бөгөөд эдгээр нь CSV болон JSON форматуудад экспортлогдоно. CSV нь өргөн хэрэглэгддэг өгөгдөл хадгалах формат бөгөөд JSON нь програмчлалын хэрэглэгчдэд зориулсан илүү тохиромжтой формат юм.
- **3D визуализаци:** Тайланд 3D дүрсийг ашиглан тайланг харах боломжтой болно. Энэ нь ашиглагчдад эд ангийн бүтэц болон эмчилгээний үр дүнг үзэхэд тусална.
- **Эмчилгээний тайлан:** Эцсийн тайланг гарган, өвчтөнд оношлогоо, эмчилгээний зааварчилгаа, үр дүнг бүрэн тайлагнана. Энэ нь мэргэжлийн эмч болон өвчтөнд хэрэгтэй бүх мэдээллийг багтаасан бүрэн тайлан болно.

## IX. ХЭРЭГЖҮҮЛЭЛТ

Хиймэл оюун ухаанд суурилсан SUVmax тооцооллоор умайн хүзүүний хорт хавдрын үе шат болон үсэрхийллийг үнэлэх системийн хэрэгжүүлэлтийг 3 үндсэн модулиудад хуваан боловсруулсан. Систем нь PET/CT дүрсийн өгөгдөл дээр боловсруулалт хийж хавдрын бүсийг илрүүлэх, SUVmax утгыг тооцоолох, мөн хавдрын үе шат болон үсэрхийллийн талаар дүн шинжилгээ хийх боломжтой байдлаар зохион байгуулагдсан.

Туршилтыг дараах үндсэн модулиудын дагуу хэрэгжүүлсэн.

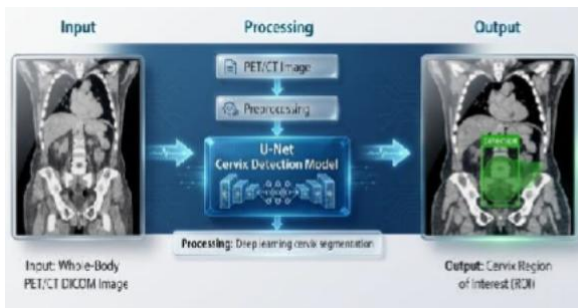
- Өгөгдөл боловсруулалт
- Голомт илрүүлэлт
- Эмнэлзүйн тайлан

Хэрэгжүүлэх явцад нийт 200 гаруй өвчтөний бодит PET/CT дүрсийн өгөгдөл ашиглан туршилт хийсэн бөгөөд систем нь хавдрын сэжигтэй бүсүүдийг илрүүлж, SUVmax утгыг автоматаар тооцоолон үр дүнг дүрсэн дээр харуулсан. Туршилтын үр дүн нь системийн одоогийн ажиллагааны түвшинг тодорхойлох боломжийг олгосон бөгөөд цаашид алгоритмын нарийвчлалыг сайжруулах шаардлагатай чиглэлүүдийг тодорхойлоход тус болсон.

❖ **Модуль 1: Өгөгдөл боловсруулалт**

Энэхүү модуль нь бүтэн биеийн PET/CT дүрсээс умайн хүзүүний анатомийн хэсгийг автоматаар илрүүлэх зорилготой. Deep learning суурьтай U-Net segmentation загвар ашиглан CT дүрс дээр умайн хүзүүний байршлыг тодорхойлж, тухайн хэсгийг ROI (Region of Interest) болгон ялгана.

Ингэснээр дараагийн шатны шинжилгээ зөвхөн шаардлагатай хэсэг дээр хийгдэж, тооцооллын ачаалал багасах болон илрүүлэлтийн нарийвчлал нэмэгдэх боломж бүрдэнэ. Дараах зурагт модуль 1-ийн ажиллагааны үр дүнгийн зургийг хавсаргав.

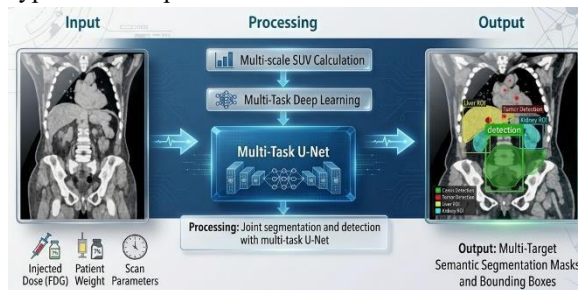


3-р зураг. Модуль 1-ийн үр дүн

❖ **Модуль 2: Голомт илрүүлэлт**

Энэхүү модуль нь автоматаар ялган авсан умайн хүзүүний ROI-д PET/CT дүрсийн FDG идэвхжилтийг тооцоолох зорилготой. ROI дахь PET дүрсийг анализ хийж, Standardized Uptake Value (SUV) зэрэг метрикүүдийг гаргаж авснаар, умайн хүзүүний метаболизм, хорт хавдрын идэвхжилтийг үнэлэх боломж бүрдсэн.

Ингэснээр эмнэлзүйн оношлогоо болон үр дүнгийн үнэлгээний нарийвчлалыг нэмэгдүүлэхэд хувь нэмэр оруулсан. Дараах зурагт модуль 2-ын ажиллагааны үр дүнгийн зургийг хавсаргав.



4-р зураг. Модуль 2-ын үр дүн

❖ **Модуль 3: Эмнэлзүйн тайлан**

Энэхүү модульд өмнөх модуль 1 болон 2-ын үр дүнг нэгтгэн умайн хүзүүний хавдрын илрүүлэлтийн автоматжуулсан системийг бүтээх

зорилт тавьсан. U-Net segmentation болон SUV анализын үр дүнд гарсан мэдээллийг ашиглан хавдрын магадлал, байршил, хэмжээ зэрэг шинж чанарыг автомат байдлаар тодорхойлж, эмнэлзүйн шийдвэр гаргах процессыг хялбаршуулсан.

Ийнхүү модуль 3 нь бүтэн системийн интеграцчилсан туршилт, автомат илрүүлэлтийн нарийвчлалыг баталгаажуулсан.

Энэхүү судалгаанд боловсруулсан AI-д суурилсан PET/CT боловсруулалтын системийг туршилтын орчинд хэрэгжүүлж, модуль тус бүрийн гүйцэтгэлийг үнэлэв. Системийн хэрэгжилт дараах үндсэн урсгалаар явагдана.

- ✓ Preprocessing → Detection → Segmentation → SUVmax Calculation → TNM/FIGO Staging → Follow-up Analysis → Reporting

**A. Туршилтын орчин**

Хүснэгт 2. Системийн туршилтын орчин

Үзүүлэлт	Тайлбар
Framework:	PyTorch
GPU:	NVIDIA, A100
DICOM Processing:	pydicom
Segmentation:	U-Net
Detection:	YOLO
Statistical Analysis:	SciPy, NumPy

**B. Туршилтын өгөгдөл**

Хүснэгт 3. Системийн туршилтын орчин

Source	Өвчтөний бодит өгөгдөл дээр сургасан.
Size	200 өвчтөний зураг <ul style="list-style-type: none"> <li>• Train: 140 /70%/</li> <li>• Validation: 40 /20%/</li> <li>• Test: 20 /10%/</li> </ul>
Structure	<ul style="list-style-type: none"> <li>• images</li> <li>• labels</li> </ul>

**ДҮГНЭЛТ**

Энэхүү судалгааны хүрээнд умайн хүзүүний хавдрыг PET/CT imaging дүрс дээр үндэслэн илрүүлэх хиймэл оюун ухаанд суурилсан (AI-based) дүрс боловсруулалтын систем-ийг боловсруулж, туршин хэрэгжүүлэв. Судалгааны гол зорилго нь эмнэлзүйн оношлогоонд дэмжлэг үзүүлэхүйц автоматжуулсан шийдлийг бий болгох, хавдрын илрүүлэлтийн хурд болон нарийвчлалыг нэмэгдүүлэхэд чиглэсэн болно.

Системийн хүрээнд CT болон PET дүрсийг хослуулан боловсруулах pipeline боловсруулсан. Үүнд, CT дүрс дээр суурилан умайн хүзүүний бүсийн ROI (Region of Interest)-ийг автоматаар

ялгах алгоритмыг хэрэгжүүлсэн бөгөөд энэ нь цаашдын анализын үндсэн суурь болсон. PET дүрсийн хувьд, стандартчилагдсан uptake утга болох Standardized Uptake Value (SUV)-ийг тооцоолох аргыг ашиглан метаболик идэвхийг тоон хэлбэрт шилжүүлсэн.

Хавдрын сэжигтэй хэсгийг илрүүлэхдээ адаптив босго (adaptive thresholding) болон segmentation аргуудыг хослуулсан. Ингэснээр физиологийн болон эмгэг uptake-ийг ялган таних боломжийг нэмэгдүүлж, дүрсний онцлогт тохируулан уян хатан шийдвэр гаргах нөхцөлийг бүрдүүлсэн. Мөн segmentation алгоритм нь дүрсний орон зайн мэдээллийг ашиглан хавдрын боломжит хил хязгаарыг тодорхойлсон.

Туршилтын үр дүнгээс харахад, умайн хүзүүний бүсийг ялган авах segmentation модуль дунджаар 65%-ийн нарийвчлалтай, харин PET дүрсээс метаболик үзүүлэлтүүд (SUVmax, SUVmean зэрэг)-ийг тооцоолох модуль 75%-ийн нарийвчлалтай ажилласан. Эдгээр үзүүлэлтүүд нь анхан шатны судалгааны түвшинд боломжийн үр дүн гэж үзэж болох бөгөөд цаашид өгөгдлийн санг өргөжүүлэх, алгоритмыг сайжруулах шаардлагатайг харуулж байна.

Онцлох нэг үр дүн нь харьцангуй бага хэмжээний сургалтын өгөгдөл ашигласан хэдий ч систем нь тогтвортой, практикт ашиглах боломжтой түвшний үр дүнг үзүүлсэн явдал юм. Энэ нь боловсруулсан аргачлал нь өгөгдлийн хомс нөхцөлд ч хэрэгжих боломжтойг илтгэж байна.

Иймээс энэхүү судалгаанд боловсруулсан AI суурьтай дүрс боловсруулалтын систем нь умайн хүзүүний хавдрын илрүүлэлтийг автоматжуулах, эмчийн оношлогооны шийдвэр гаргалтыг дэмжих, цаашлаад эмнэлзүйн практикт нэвтрүүлэх боломжтой суурь шийдэл болохыг харуулж байна.

#### ТАЛАРХАЛ

Энэхүү төслийг амжилттай хэрэгжүүлэхэд үнэтэй хувь нэмэр оруулж, мэдлэг туршлагаасаа харамгүй хуваалцан, чиглэл өгч ажилласан удирдагч багш Доктор (Ph.D) С.Өлзийбаярт гүн талархал илэрхийлье.

Түүнчлэн энэхүү ажлыг гүйцэтгэхэд хамтран ажиллаж, практик орчинд дэмжлэг үзүүлсэн Бриллиант эмнэлгийн Радиологи, дүрс оношлогооны тасгийн хамт олонд гүн талархал илэрхийлж байна.

#### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] World Health Organization (WHO). (2023). *Cervical cancer: Global statistics and burden of disease*. Geneva: WHO.
- [2] Takagi, T., et al. (2018). Prognostic value of SUVmax measured by 18F-FDG PET/CT in patients with cervical cancer. *European Journal of Radiology*, 105, 195–201.
- [3] Luo, Y., et al. (2021). Machine learning-based prediction of treatment outcomes in cervical cancer using MRI, CT and PET/CT imaging features. *Frontiers in Oncology*, 11, 678–689.
- [4] Otani, K., et al. (2023). Prognostic impact of pre-treatment FDG PET/CT metabolic parameters in squamous cell carcinoma and adenocarcinoma of the cervix. *Cancers*, 15(4), 1123.
- [5] Sari, H., et al. (2023). Metastasis-to-tumor SUVmax ratio as a novel prognostic indicator in stage IVB cervical cancer. *Clinical Nuclear Medicine*, 48(6), 452–459.
- [6] Zhang, Y., et al. (2021). Correlation of PET/CT metabolic parameters (SUVmax, MTV, TLG) with treatment response and recurrence in cervical cancer. *Nuclear Medicine Communications*, 42(9), 987–995.
- [7] Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 779–788.
- [8] Siegel, R. L., Miller, K. D., & Jemal, A. (2023). Cancer statistics, 2023. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 73(1), 17–48.
- [9] Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., & Bray, F. (2021). Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 71(3), 209–249.
- [10] Bhatla, N., Aoki, D., Sharma, D. N., & Sankaranarayanan, R. (2018). Cancer of the cervix uteri. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, 143(S2), 22–36.
- [11] Kidd, E. A., Siegel, B. A., Dehdashti, F., & Grigsby, P. W. (2010). The standardized uptake value for FDG is a sensitive predictive biomarker of cervical cancer response to chemoradiation therapy. *Cancer*, 116(20), 4825–4834.
- [12] Chung, H. H., et al. (2006). Prognostic value of preoperative metabolic tumor volume measured by FDG PET/CT in patients with cervical cancer. *Gynecologic Oncology*, 102(3), 567–572.
- [13] Herrera, F. G., et al. (2011). Prognostic significance of FDG-PET/CT metabolic parameters in cervical cancer treated with radiotherapy. *Radiotherapy and Oncology*, 99(3), 358–363.
- [14] Kitajima, K., et al. (2014). Diagnostic accuracy of integrated FDG-PET/CT for staging of uterine cervical cancer. *European Radiology*, 24(8), 1785–1794.
- [15] Liao, S., et al. (2012). FDG PET/CT in evaluating lymph node metastasis in cervical cancer. *Journal of Nuclear Medicine*, 53(2), 185–191.
- [16] Lim, K., et al. (2011). FIGO staging and the role of imaging in cervical cancer. *The Lancet Oncology*, 12(2), 125–135.
- [17] Bhatla, N., et al. (2019). Revised FIGO staging for carcinoma of the cervix uteri. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, 145(1), 129–135.
- [18] Edge, S. B., et al. (2017). *AJCC Cancer Staging Manual* (8th ed.). New York: Springer.
- [19] Litjens, G., et al. (2017). A survey on deep learning in medical image analysis. *Medical Image Analysis*, 42, 60–88.
- [20] Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, 234–241.

## ЦУУРАЙГҮЙ ЧАМБЕРТ АНТЕННЫ ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮДИЙГ ХЭМЖИХ АРГАЧЛАЛЫН СУДАЛГАА

Алтангэрэлийн ЭРДЭНЭТУЯА<sup>1</sup>, Пүрэвдоржийн УУГАНБАЯР<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Холбооны инженерчлэлийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [erdenetuya.a@must.edu.mn](mailto:erdenetuya.a@must.edu.mn)<sup>1</sup>

**Хураангуй:** Утасгүй холбоо, радарын технологид шинэ төрлийн радио цацаргагч төхөөрөмжүүдийн загварууд бий болж буйтай зэрэгцэн антенны чиглэлийн диаграмм, өсгөлт, чиглүүлэмж, туйлшрал, оролтын эсэргүүцэл зэрэг үзүүлэлтүүдийг хэмжих аргууд боловсруулагдан гарсан. Орчин үед компьютерын удирдлагатай бүрэн автомат хэмжилтийн системүүд бий болсноор антенны техникийн үзүүлэлтүүдийг хэмжихэд шаардлагатай механик тохируулгын ажлууд багассан, ойрын зайн оронгийн бүсийн хэмжилтийн утгуудыг алсын оронгийн бүсийн утгуудад дохио боловсруулалтын алгоритмуудын тусламжтайгаар хөрвүүлэх боломж бүрдсэн зэрэг давуу талууд үүсээд байна. Ингэснээр антенны хэмжилтийг явуулах өрөө тасалгааны хувьд хэмжилт хийх радио давтамж, антенны овор хэмжээ зэргээс үл хамааран харьцангуй бага орон зайд зохион байгуулагдах боломжтой болсон.

**Түлхүүр үг:** Антенны хэмжилт, орон зай, радио долгион, цацаргалт, чиглэлийн диаграмм

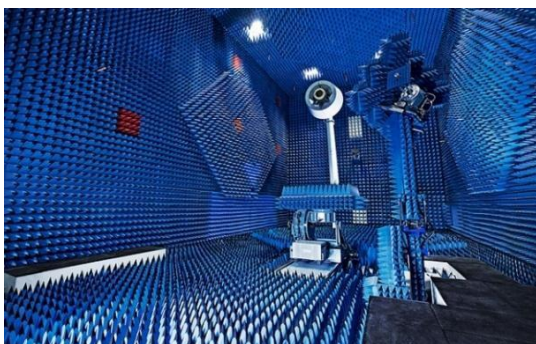
### I. УДИРТГАЛ

Энэхүү өгүүлэл нь өмнөх жилүүдэд антенны хэмжилтийн салбарт гарсан сүүлийн үеийн дэвшлүүдийг тоймлон авч үзнэ. Өгүүлэл нь антенн хэмжих орчны танилцуулга тоймоор эхэлж, дараа нь хэмжилтийн системүүдийн техникийн сайжруулалтуудыг авч үзнэ.

Хэмжилтийг арга зүй, зарчимаар нь авч үзвэл хэмжилтийн орчинг ойлгтой орчин, чөлөөт орон зайн орчин, бага оврын орчин гэж ангилдаг.

Хэмжилт хийхийн тулд наад зах нь хэмжих антенны төрөл, нэвтрүүлэх, хүлээн авах антенны байрлах цамхагийн өндөр зэрэг параметруудийг тодорхойлсон байх шаардлагатай.

Цуурайгүй лаборатори нь антенны хэмжилтийг хийхэд ялангуяа бичил долгионы давтамжийн цард антенны хэмжилт хийхэд нэн тохиромжтой орчин юм.



1-р зураг. Цуурайгүй лабораторийн өрөө

Лабораторийн хувьд том оврын антенн болон ойлгогч гадаргуунуудын алсын оронгийн хэмжилт хийхэд орон зайн шаардлагаар хязгаарлалтанд ордог. Үүнийг шийдэх аргын нэг нь антенны тест хийх бага оврын орчин (овор хэмжээ багатай зөөврийн кабин- CATR) бөгөөд олон тооны

ойлгогчуудын системийн (нэг ширхэг парабол ойлгогч элемент) тусламжтайгаар маш богино зайд нэгэн жигд хавтгай долгионыг үүсгэж хэмжилт хийдэг орчин юм.

Батлан хамгаалах болон сансрын салбаруудад өндөр нарийвчлалтай хэмжилт хийх шаардлага одоог хүртэл хэвээр байна. Антенны хэмжилтийн судалгаанд гарсан сүүлийн үеийн дэвшлүүд, мөн шинэ технологийн боломжууд (өгөгдлийг илүү хурдан бөгөөд нарийн төвөгтэй байдлаар боловсруулах, туршилтад орж буй антенн (AUT) болон хэмжилтийн датчикүүдийн байрлалыг өндөр нарийвчлалтай тогтоох зэрэг) нь шинэ антенны технологийн улмаас бий болсон хэмжилтийн сорилтуудыг шийдвэрлэх боломжийг бүрдүүлж байна. Энэхүү өгүүлэлд сүүлийн жилүүдэд антенны хэмжилтийн салбарт гарсан техник хангамж болон програм хангамжийн чухал дэвшлүүдийг тоймлон авч үзсэн болно. Мөн ойрын ирээдүйд антенны хэмжилтийн салбарын өмнө тулгарч болох шинэ сорилтуудыг тодорхойлон авч үзнэ.

### II. АНТЕННЫ ХЭМЖИЛТИЙН ШИНЭ СИСТЕМҮҮДИЙН ХӨГЖИЛ, ДЭВШИЛ

Сүүлийн жилүүдэд антенны хэмжилтийн шийдлүүдийн шинэ ойлголт, аргачлалууд бий болсон. Шинэ үеийн холбооны системүүд нь жижиг бөгөөд нарийн бүтэцтэй терминал төхөөрөмжүүдийг шаарддаг бөгөөд орчны нөлөө нь радио долгионы гүйцэтгэлд мэдэгдэхүйц өөрчлөлт оруулдаг. Терминал төхөөрөмжүүдийг хэмжих өөр нэг шийдэл нь олон датчикт (multiprobe) хэмжилтийн систем юм.[11] Энэ тохиолдолд төхөөрөмжүүдийг чөлөөт орон зайн орчинд бараг бодит цагийн горимд хэмжих боломжтой. Уламжлалт ойрын орны (near-field) хэмжилтийн аргуудын хувьд ийм боломж байгаагүй бөгөөд хэмжилтийн өгөгдлийг авахын тулд антенныг янз бүрийн байрлалд шилжүүлэх олон байрлал тогтоогч

(positioner) ашиглах шаардлагатай байсан. Microwave Vision Group (MVG) нь Multiprobe буюу датчикийн технологийг Modulated Scattering Measurement Technique (MST) [10] аргыг ашиглан санал болгосон. Энэхүү арга нь антенны датчик бүрээс ирж буй дохиог өөр өөр, харилцан ортогональ бага давтамжийн кодоор ялган таних боломжийг олгодог.



2-р зураг: Терминал төхөөрөмж дээрх жишээг антеннуудыг хэмжихэд зориулсан

Ингэснээр пассив нийлүүлэгч сүлжээ (passive combiner network)-г ашиглах боломжтой бөгөөд датчик бүрээс ирэх дохионы амплитуд болон фазын мэдээллийг тус бүрд нь сэргээж авах боломж бүрддэг.[8]

Мэдээж энэхүү технологийг уламжлалт ойрын орны хэмжилтийн системүүдэд (сферик, цилиндр болон хавтгай хэлбэрийн) ашиглаж болно. Энэ тохиолдолд системийн нэг тэнхлэгийг multiprobe системээр орлуулах байдлаар хэрэгжүүлдэг.

### Антенны хэмжилтийн салбарт ойрын ирээдүйд тулгарч болох сорилтууд

Антенны технологийн хурдацтай хөгжлийн улмаас антенны хэмжилтэд улам илүү уян хатан байдал шаардлагатай болж, хэмжилтийн хугацааг багасгах хэрэгцээ нэмэгдэх болно. Антенны салбар нь газрын дээрх (in-situ), бодит цагийн, нарийвчлалтай, зардал багатай хэмжилтийг шаардах болно.

In-situ хэмжилтүүд шаардлагатай болох бөгөөд энэ нь уламжлалт шиг антенныг лаборатори руу авчрах биш, харин лабораторийг шууд антенны байрлалд зөөж очиж ажиллуулах боломжийг олгоно.

Антенны датчикийн байрлалыг тодорхойлох мэдээллийг (лазер трекер болон бусад технологи ашиглан) AUT-ийн геометрийн мэдлэгтэй хослуулан, эх үүсвэр сэргээх (source reconstruction) техникийг хэрэглэх нь байрлалын системийн өндөр нарийвчлалыг орлуулах боломжийг олгоно.

Симуляци ба хэмжилтийг хослуулан антенны үйлдвэрлэлийг оновчтой болгох боломжтой болно [7]. Антенны симуляци ба хэмжилтийн дараах процессын платформуудыг нэгтгэн нийтийн платформууд болгон хөгжүүлэх шаардлага гарна.

Мэдээж, сансрын болон аюулгүй байдлын зах зээл гэх мэт тодорхой зах зээлд уламжлалт антенны хэмжилтийн системүүд ашиглагдана. Энэ тохиолдолд байрлал тогтоох системийн нарийвчлал хамгийн чухал сорилт болж, антенны нарийвчлалыг сайжруулж, өндөр давтамжийн зурвасууд руу шилжих боломжийг бүрдүүлж өгнө.

## III. ЦУУРАЙГҮЙ ЧАМБЕРТ ХИЙХ АНТЕННЫ ХЭМЖИЛТ

### A. Цуурайгүй чамберт лаборатори

ШУТИС МХТС дээр 26 ГГц хүртэл радио давтамж дээр хэмжилт хийх цуурайгүй чамберыг 2022 онд байгуулагдсан. Төрийн болон хувийн хэвшлийн харилцаа холбоо, мэдээллийн технологийн компаниудын үйлчилгээндээ ашиглаж буй радио давтамжтай төхөөрөмжүүдийг баталгаажуулах, ШУ, судалгааны зорилгоор загварыг баталгаажуулах, материалын радио тусгаарлах үзүүлэлтийг хэмжиж баталгаажуулах зэрэгт ашиглах боломжтой болсон юм.

Тус лабораторид:

- 10 МГц -40 ГГц хүртэлх радио цацаргагч төрөөрөмжийн хэлхээний болон тархалтын параметруудийг хэмжих
- Радио станцын чадлын хэмжилт хийх (PӨН ба ТВ-ийн нэвтрүүлэгч)
- Антенны бүрэн хэмжилт хийх (Ойрын болон алсын бүсийн хэмжилтүүд)
- Материалын тусгаарлах үзүүлэлт хэмжих (диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар, дамжууллын характеристик)
- Өндөр давтамжийн радио төхөөрөмжийн хэмжилт (оролт гаралтын цахилгаан шүүр, салаалагч, чадал хвиарлагч), холигч зэрэг дамжууллын үзүүлэлтүүд (5-аас цөөн үзүүлэлт хэмжих тохиолдолд).
- Радио долгионы тархалтын хэмжилт хийх (1 км радиуст)

Эдгээр хэмжилтүүдийг хийх бүрэн боломжтой болсон.

Доорх хүснэгтэнд лабораторид хэрэглэгдэх хэмжих хэрэгсэл тоног төхөөрөмжийг жагсаалтаар харуулсан болно.

1-р хүснэгт. Лабораторийн тоног төхөөрөмж, хэмжих хэрэгслийн жагсаалт

д/д	Тоног төхөөрөмжийн нэр	Хэмжих хязгаар, нарийвчлал
1.	Anechoic chamber	300 МГц – 26 ГГц ± 0,01 Гц
2.	Antenna Positioning and Control System	Thi-Ta 360° ±0.01° Phi 360° ±0.01° Pol 360° ±0.001°
3.	Probe stand back wall	3mх6m ±0.1m
4.	Intelligent Measurement Controller	Thi-Ta 360° ±0.01° Phi 360° ±0.01°

		Pol 360° ±0.001° - 10MHz – 26.4GHz
5.	PNA NETWORK ANALYZER	
6.	ENA Network Analyzer	100kHz – 18GHz 0.01V/m
7.	Software: -NSI2000 -NSI2000 hardlock encryption code, -NSI Standard Edition Spherical Software -Antenna Measurement Software	-
8.	Handheld Spectrum Analyzer	100kHz – 3.0GHz ± 0,1 Гц
9.	Antenna analyzer - RegExpert	0.1 to 1400 MHz 1kHz resolution
10.	Auto range DC power supply	(60V/10A/200W)
11.	Dummy Load	25W, 50 Ohm
12.	Laser Printer (A4)	Windows 10

**В. Антенны хэмжилт хийх аргууд**

- i. Алсын оронгийн бүсийн чиглэлийн диаграммын хэмжилт

Алсын оронгийн бүсийн чиглэлийн диаграммыг тогтмол радиустай бөмбөрцгийн гадаргуу дээр хэмждэг. Бөмбөрцөг гадаргуу дээрх аливаа байрлалыг бөмбөрцөг координатын системийн  $\theta$  ба  $\phi$  чиглэлийн өнцгүүдээр тодорхойлно. Ерөнхийдөө антенны чиглэлийн диаграмм нь 3D буюу 3 хэмжээст байдаг.

Үндсэн хавтгайнууд нь хамгийн их цацацаргалтын чиглэлийг агуулсан байна. Чиглэлийн диаграммын хэмжилтийн системийн хялбаршуулсан блок диаграммыг доор үзүүлэв.



3-р зураг. Чиглэлийн диаграмм

$$|E| = \sqrt{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2} \quad (1)$$

- ii. Антенны өсгөлтийг хэмжих хэмжилт

1 ГГц-ээс дээш давтамжинд ажилладаг антенны өсгөлтийг хэмжихийн тулд ихэвчлэн цуурайгүй өрөө (Anechoic chamber) ашигладаг. Харин 0.1 ГГц-1 ГГц хүртэл давтамжийн цараанд ажиллах антеннуудын хувьд газрын ойлтгой хэмжилтийн орчинд хэмждэг. 0.1 ГГц -ээс доош давтамжийн цараанд чиглэлтэй антенууд нь маш том бөгөөд хэмжилтэнд үзүүлэх газрын нөлөө улам бүр тодрох болно. Ихэвчлэн эдгээр давтамжийн цараанд ажиллах антенны өсөлтийг бодит системийн ажиллагааны орчинд шууд хэмждэг.

Түгээмэл ашиглагддаг антенны өсгөлтийг хэмжих гурван арга байдаг. Эхний хоёр нь үнэмлэхүй

өсгөлтийг (абсолют өсгөлт) хэмжихэд чиглэсэн аргууд бөгөөд эдгээрийг хоёр антенны арга болон гурван антенны арга гэж нэрлэдэг. Гурав дахь аргыг өсгөлт шилжүүлэх арга (эсвэл өсгөлт харьцуулах) арга гэж нэрлэдэг.

- iii. Антенны чиглүүлэмжийг хэмжих хэмжилт

Цацаргалтын ашигт үйлийн коэффициентийг тооцолохын тулд эхлээд антенны өсгөлт болон чиглүүлэмжийг хэмжих ёстой. Эдгээр хэмжилтийн явцад эсэргүүцэл, туйлшралын үл зохицол зэрэг хүчин зүйлсийг багасгах шаардлагатай байдаг. Дараах илэрхийллээр антенны цацаргалтын ашигт үйлийн коэффициентийг тооцоолно.

$$e_{cd} = \frac{\text{Gain}}{\text{Directivity}} \quad (2)$$

- iv. Антенны цацаргалтын ашигт үйлийн коэффициентийг хэмжих хэмжилт

Антенны оролтын бүрэн эсэргүүцэл нь мэдэгдэж буй  $Z_c$  эсэргүүцэлтэй дамжуулах шугамд холбогдсон терминалуудын  $\Gamma$  ойлтын коэффициентээр тооцоологддог. Хэрэв ойлтын коэффициент  $\Gamma$ -ийн агууриг болон фаз нь мэдэгдэж байгаа бол антенны оролтын бүрэн эсэргүүцлийг дараах байдлаар тооцоолно.

$$Z_A = Z_c \left( \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \right), \Omega \quad (3)$$

- v. Антенны долгионы туйлшралыг хэмжих хэмжилт

Туйлшралыг хэмжих аргуудыг гурван ерөнхий ангилалд хуваадаг.

- Хэсэгчилсэн хэмжилтийн аргууд нь туйлшралын талаар бүрэн бус мэдээлэл өгдөг боловч энгийн бөгөөд уламжлалт тоног төхөөрөмж шаарддаг.

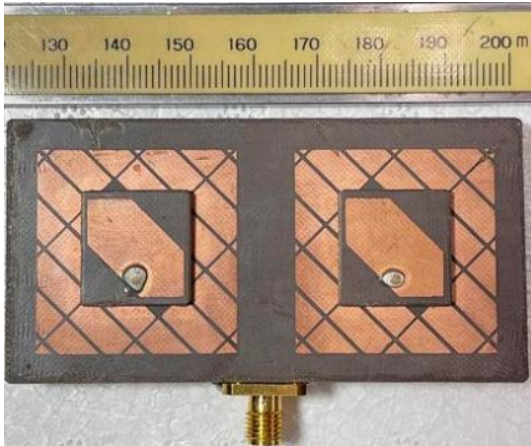
- Харьцуулсан хэмжилтийн аргууд нь туйлшралын талаархи бүрэн мэдээллийг өгдөг хэдий ч туйлшралын нарийн стандартыг шаарддаг.

- Үнэмлэхүй (абсолют) хэмжилтийн аргууд нь туйлшралын талаархи бүрэн мэдээллийг өгдөг бөгөөд туйлшралын нарийн стандартыг шаарддаггүй.

Туйлшралыг хэмжихэд  $x$  ба  $y$  тэнхлэгүүд нь хоёр антенныг холбосон шугамд перпендикуляр байх ёстой бөгөөд дохионы түвшинг хэмжиж  $\psi$  эргэлтийн өнцөгтэй хамааруулж график байгуулна. Энэ нь цацаргалтын тухайн чиглэл дэх туйлшралын диаграмм юм.

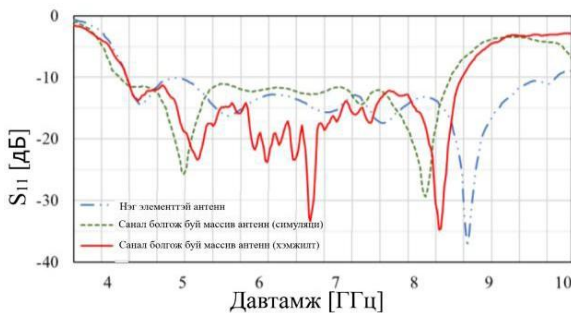
**С. Лабораторийн орчинд хийсэн симуляци**

Судалгааны ажлын хүрээнд гурван давхаргат суурь RT/Duroid 5880 материалтай ( $\epsilon_r = 2.2, \tan\delta = 0.0009$ ) антенныг ашигласан бөгөөд үүнийг **Зураг 4-т** үзүүлсэн.



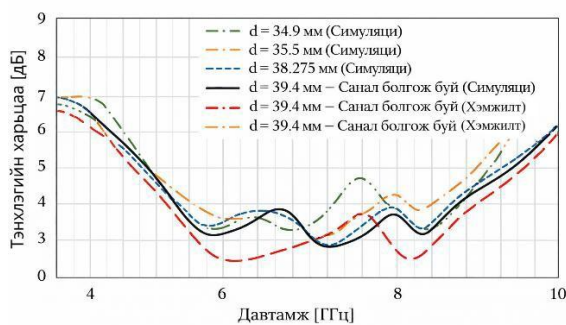
4-р зураг. Санал болгож буй антенн S параметр

Зураг 5-т санал болгож буй массив антенны симуляци болон хэмжилтээр гарсан S параметруудийг нэг элементийн гүйцэтгэлтэй харьцуулан харуулсан байна. Симуляцид суурилсан -10 дБ S<sub>11</sub> утгууд нь 4.18 ГГц-аас 8.5 ГГц хүртэлх давтамжийн хүрээнд гарч, 68% өргөн зурвасыг (bandwidth) өгч байна. Харин хэмжилтээр авсан -10 дБ S<sub>11</sub> утгууд нь 4.3 ГГц-аас 8.66 ГГц хүртэлх давтамжийн хүрээнд гарч, 67.2% өргөн зурвасыг бүрдүүлж байна.



5-р зураг. Нэг элементийн болон 2 элементийн санал болгож буй массивын S<sub>11</sub> шинж чанарууд Тэнхлэгийн харьцаа

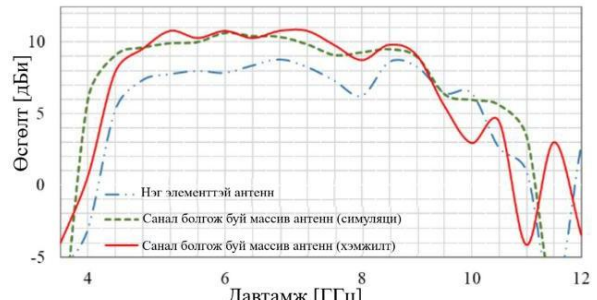
Нэг элементийн болон массивын 3-дБ тэнхлэгийн харьцаа нь бараг ижил төстэй бөгөөд симуляцид d = 39.4 мм-ийн зайтай нөхцөлд 5.40 ГГц-аас 8.16 ГГц хүртэлх 40% өргөн зурвастай байна. Харин хэмжилтээр авсан 3-дБ тэнхлэгийн харьцааны өргөн зурвас нь 5.2 ГГц-аас 8.05 ГГц хүртэл, 43% байна.



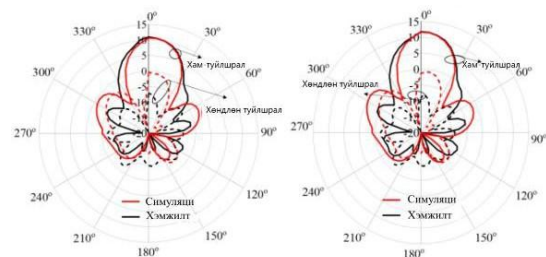
6-р зураг. Санал болгож буй массиван антенны тэнхлэгийн харьцааны (AR) шинж чанар

**Антенны өсгөлт ба цацаргалтын хэлбэр**

Хэмжилтээр авсан өсгөлтийн шинж чанарууд нь симуляцийн үр дүнтэй сайн тохирч байна. Массивын өсөлт нь 3 дБ тэнхлэгийн зурваст, нэг элементийн өсгөлттэй харьцуулахад ойролцоогоор 3 дБ-ээр нэмэгдсэн, Энэ нь урьдчилан таамагласан үр дүнтэй нийцэж байна.



7-р зураг. Нэг элементийн ба 2 элементийн санал болгож буй массиван антенны өсөлт



8-р зураг. 5.5 ГГц ба 6.5 ГГц давтамжийн YZ тэнхлэг дэхь цацрагын хэлбэр

**ДҮГНЭЛТ**

Энэхүү судалгааны ажлаар сүүлийн жилүүдэд антенны хэмжилтийн салбарт гарсан техник хангамж ба програм хангамжийн дэвшлүүдийг тоймлон авч үзсэн. Мөн антенны хэмжилтийн салбарт ирээдүйд тулгарах зарим сорилтуудыг танилцуулсан бөгөөд үүнд: In-situ буюу газар дээрх хэмжилтүүд, тэгш бус байрлал тогтоох системүүд (irregular positioning systems), симуляци болон хэмжилтийг хослуулах замаар загварчлалыг илүү үр дүнтэй болгох, харилцаа холбооны системд нэгтгэгдсэн антеннуудыг хэмжих зэрэг орж байна.

Эдгээр дэвшлүүдийг хослуулснаар антенны хэмжилтийн процесс илүү хялбар, үр ашигтай болох бөгөөд антенны болон системийн симуляцийн платформуудтай илүү интеграцлагдсан байдлаар ажиллах боломжийг бүрдүүлэх юм.

Сүүлийн бүлэгт цуурайгүй чамберт лабораторийн өрөөнд хийгдэх антенны хэмжилтийн аргачлал болон тоног төхөөрөмжийн талаар судалсан ба AGS ашигласан дугуй поляризацтай patch антенны массивын зохион байгуулалтыг танилцуулсан. Санал болгож буй массивын бүтэц нь 2 ширхэг нэг элементийн антеннаас бүрдэж, нэг элементийн адил 3-дБ

тэнхлэгийн харьцааны өргөн зурвасыг хадгалж, массивын өсөлтийг нэмэгдүүлсэн.

Ирээдүйн сорилт нь өргөн азимутын хүрээнд бага хөндлөн туйлшрал бүхий цацрагын хэдбэрийг бий болгох явдал юм.

#### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] IEEE Standard Test Procedures for Antennas, IEEE Std 149-1979, IEEE Inc., 1979, distributed by Wiley-Interscience.
- [2] J.S. Hollis, T.J. Lyon, and L. Clayton, Jr., Microwave Antenna Measurements, Scientific-Atlanta, Inc., Atlanta, Georgia, July 1970.
- [3] W.H. Kummer and E.S. Gillespie, "Antenna measurements-1978," Proc. IEEE, vol. 66, No. 4, pp. 483-507, April 1978.
- [4] C.A. Balanis, Antenna Theory, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
- [5] J. Kraus, Antennas, 2nd ed., McGraw Hill, Inc., New York, 1988.
- [6] J.R. Jones and D.W. Hess, "Automated three-antenna polarization measurements using digital signal processing," white paper available for download at <http://www.mitechnologies.com/techliterature/>
- [7] U.Purevdorj, R. Kuse, T. Fukusako: "Broadband Circularly Polarized Microstrip Patch Antenna Using Artificial Ground Structure with Rotated Rectangular Unit Cells", IEEE AP-S/URSI 2021, paper submitted
- [8] E.B. Joy, and D.T. Paris, "A practical method for measuring the complex polarization ratio of arbitrary antennas," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. AP-21, pp. 432-435, 1973.
- [9] A.C. Newell, and D.M. Kerns, "Determination of both polarization and power gain of antennas by a generalised 3-antenna measurement method," Electronics Letters, vol. 7, No. 3, pp. 68-70, February 11, 1971
- [10] [www.bluetest.com](http://www.bluetest.com)
- [11] [www.microwavevision.com](http://www.microwavevision.com)
- [12] J. C. Bolomey and F. Gardiol, Engineering Applications of the Modulated Scatterer Technique, Artech House, 2001.

# УЛААНБААТАР ХОТЫН ШИЛЭН КАБЕЛИЙН ДЭД БҮТЦИЙН МЭДЭЭЛЛИЙГ НЭЭЛТТЭЙ ӨГӨГДЛИЙН СИСТЕМД ХЭРХЭН НИЙТЛЭХ ЖИШИГ ЗАГВАР

Бат-Эрдэнийн БАТ-ӨЛЗИЙ<sup>1</sup>, Шагдарын ГАНБОЛД<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Холбооны инженерчлэлийн тэнхим

*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [batulzii.2255@gmail.com](mailto:batulzii.2255@gmail.com)*

**Хураангуй:** Улаанбаатар хотын шилэн кабелийн дэд бүтцийг нээлттэй өгөгдлийн системд нийтлэхэд шаардлагатай өгөгдлийн бүтэц, түвшин, техникийн шийдлийг тодорхойлох судалгаа юм. GIS (Geographic Information System)-д суурилсан стандартчилсан орон зайн мэдээллийг Үндэсний Геоортал болон нээлттэй өгөгдлийн шинэчлэсэн хууль эрх зүйн орчны дагуу нийтлэх боломжийг авч үзлээ. Судалгаагаар өгөгдлийг нээлттэй, хязгаарлалттай, дотоод хэрэглээний гэсэн гурван түвшинд ангилж, ерөнхийшүүлсэн геометртэй багц, мета өгөгдлийн загвар, СКАН суурьтай нийтлэх архитектур боловсруулсан. Энэхүү жишиг загварыг хэрэгжүүлж эхэлснээр дэд бүтцийн төлөвлөлт, операторуудын хамтын ашиглалт, засвар үйлчилгээ, байгууллагууд хоорондын мэдээлэл солилцох уялдаа холбоо, нээлттэй өгөгдлийн экосистемийн хөгжилд хувь нэмэр оруулах боломжтой.

**Түлхүүр үг:** орон зайн өгөгдөл, нээлттэй өгөгдөл, шилэн кабелийн дэд бүтэц, өгөгдөл ерөнхийшүүлэх, түвшинчилсэн мэдээлэл, аюулгүй байдал

## I. УДИРТГАЛ

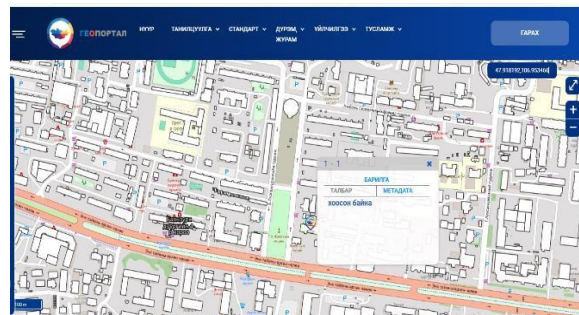
Улаанбаатар хотын цахим хөгжил эрчимтэй өргөжин тэлж байгаа өнөө үед өндөр хурдны интернэт, мэдээллийн системүүд, дата төвүүд, камерын хяналт, төрийн цахим үйлчилгээ, үүрэн болон суурин холбооны харилцан холболтын сүлжээ зэрэг олон салбарын үйл ажиллагаа нь мэдээлэл дамжуулах найдвартай дэд бүтцэд тулгуурлан ажиллаж байна. Эдгээрийн үндсэн суурийг хотын холбооны гол тулгуур болох шилэн кабелийн сүлжээ бүрдүүлдэг бөгөөд түүний тасралтгүй ажиллагаа, дамжуулах чадвар, бүтцийн найдвартай байдал нь хотын ухаалаг экосистемийн үндсэн нөхцөл болж байна.

Шилэн кабелийн дэд бүтцийн байршил, трассын чиглэл, зангилаа, сувагчлал, худаг, ашиглалтын төлөв зэрэг нь стратегийн ач холбогдол бүхий мэдээлэл учраас түүнийг орон зайн өгөгдлийн бүтэц (GIS)-тэй уялдуулан бүртгэх, хянах, удирдах шаардлага улам бүр нэмэгдэж байна. Гэвч одоогийн нөхцөлд энэхүү мэдээлэл нь олон байгууллагад тархай, стандартад нийцээгүй, өгөгдлийн формат харилцан адилгүй, зарим нь хаалттай хэлбэрээр хадгалагддаг тул хотын инженерийн шугам сүлжээний харилцан уялдааг хангах, шинэчлэл төлөвлөх, эрсдлийн үнэлгээ хийх, тасалдал үүссэн үед шуурхай арга хэмжээ авах үйл явцыг хүндрүүлж байна.

Гэвч дэд бүтцийн нарийвчилсан координат, зангилааны мэдээлэл нь эмзэг шинжтэй тул түүнийг бүрэн нээлттэй хэлбэрээр нийтлэх нь аюулгүй байдлын эрсдлийг бий болгож байна.

Монгол Улсад орон зайн өгөгдлийн нэгдсэн тогтолцоог бүрдүүлэх зорилгоор Үндэсний Геоортал хөгжүүлэгдэж, GeoJSON, GML, WMS, WMTS, WFS, Shapefile зэрэг олон улсын стандартад нийцсэн форматаар өгөгдөл түгээх MNS 6925-7:2021 стандартыг мөрдөх боломж бүрдээд байна. Энэ тогтолцоо нь өгөгдлийн давхардлыг бууруулах, байгууллага хоорондын мэдээллийн урсгалыг сайжруулах, суурь

болон салбарын орон зайн өгөгдлийг нэгдсэн стандартаар удирдах орчныг бий болгож байгаа нь дэд бүтцийн өгөгдлийг илүү үр ашигтай удирдах техникийн нөхцөл болж байна.[1]



1-р зураг. Үндэсний Геоортал (<https://nsdi.gov.mn>)

Мөн Нийтийн мэдээллийн ил тод байдлын тухай хуулийн 12-р зүйлийн 12.5-д заасны дагуу Монгол Улсын Засгийн газрын 2022 оны 200 дугаар тогтоолоор нээлттэй өгөгдлийг бий болгох, ангилан ялгах, хууль ёсны эх сурвалжаас бүрдүүлэх, нэгдсэн системд байршуулан нийтлэхтэй холбоотой эрх зүйн орчин шинэчлэгдсэн нь дэд бүтцийн мэдээллийг нээлттэй, хязгаарлалттай, хаалттай /дотоод хэрэглээний/ гэсэн түвшнүүдэд ангилан нийтлэх боломжийг бий болгосон байна. Дэд бүтцийн мэдээллийг бүхэлд нь ил тод байршуулах боломжгүй ч энэхүү зохицуулалт нь аюулгүй байдлыг хангасан түвшинчилсэн мэдээллийн загвар боловсруулах шаардлагыг тодорхой болгож байна.[2], [3]

Гэсэн хэдий ч Улаанбаатар хотод шилэн кабелийн сүлжээний нэгдсэн, стандартчилагдсан, түвшинчилсэн орон зайн мэдээллийн сан одоог хүртэл бүрдээгүй байгаа нь асуудал хэвээр байна. Энэ нөхцөл байдал нь өгөгдөл бий эсэхтэй холбоотой бус, харин өгөгдлийн

бүтэц, эзэмшил, аюулгүй байдал, нийтлэх аргачлал ерөнхийшүүлэх стандартыг тодорхойлох шаардлагатай байгааг харуулж байна.

Иймд энэхүү судалгааны зорилго нь Улаанбаатар хотын шилэн кабелийн дэд бүтцийн орон зайн мэдээллийг стандартчилсан GIS загварт оруулах, эмзэг байдлын түвшнээс хамааруулан ангилах, аюулгүй байдлыг ханган нээлттэй өгөгдлийн системд түвшинчилсэн байдлаар нийтлэх жишиг өгөгдлийн загвар болон техникийн аргачлалыг боловсруулахад оршино. Судалгааны үр дүнд харилцаа холбооны операторуудын мэдээллийн солилцоо сайжирч хотын инженерийн сүлжээний уялдаа холбоог нэмэгдэн нөөцийн үр ашигтай төлөвлөлт хийх, өгөгдөлд суурилсан бодлого боловсруулах боломжийг бий болгох ач холбогдолтой.

**1. Нээлттэй өгөгдөл болон гео-өгөгдлийн үндсэн ойлголт**

**2.1 Нээлттэй өгөгдөл гэж юу вэ?**

Нээлттэй өгөгдлийн хэрэглээ, шаардлага, олон улсын стандартын хөгжлийн үндэс нь мэдээллийн ил тод байдал, засаглалын үр ашиг, инноваца, олон нийтийн оролцоог дэмжихэд чиглэгддэг. Нээлттэй өгөгдөл нь хэн ч үнэ төлбөргүйгээр татаж авах, ашиглах, дахин боловсруулах, түгээх боломжтой мэдээллийн хэлбэр бөгөөд Засгийн газар, төрийн байгууллага, хувийн хэвшил, иргэдийн харилцан уялдааг бэхжүүлэх стратегийн ач холбогдолтой.[4]

**Нээлттэй өгөгдлийг тодорхойлох үндсэн зарчмууд:**

- Хүн бүрт үнэ төлбөргүй, хязгаарлалтгүй, нээлттэй байх
- CSV, JSON, GeoJSON, XML зэрэг машинд уншигдах форматтай байх
- MIT, ODbL, Creative Commons зэрэг нээлттэй лицензтэй байх (<https://creativecommons.org/licenses/>)
- Олон улсын OGC, W3C, ISO гэх мэт стандартуудын дагуу форматаар түгээх
- Эх сурвалж, мета өгөгдөл, үүссэн огноо тодорхой байж тогтмол шинэчлэгддэг байх зарчмууд нь нээлттэй өгөгдөл дахин боловсруулах боломжийг бүрдүүлж, олон нийтийн оролцоо болон инновацийн экосистемийг бий болгодог.

**НЭЭЛТТЭЙ ӨГӨГДЛИЙН 5 ОДНЫ ЗАРЧИМ**

**1-Р ХҮСНЭГТ**

Түвшин	Тайлбар	Жишээ
★	Вэбд нийтлэгдсэн, хүн унших формат	PDP, DOC
★★	Машинд унших боломжтой	CSV файл
★★★	Нээлттэй лицензтэй	Open Government License
★★★★	Стандарт URI-тэй өгөгдөл	RDF, JSON-LD
★★★★★	Холбоост өгөгдөл	SPARQL endpoint бүхий өгөгдөл

Сэр Тим Бернерс-Лигийн боловсруулсан зарчим (<https://5stardata.info/en>)

Энэхүү 5-Star Open Data Model нь өгөгдлийн нээлттэй байдлын түвшинг шаталсан байдлаар үнэлэх аргачлал юм. Энэ загвар нь нээлттэй өгөгдлийн чанар, холболтын боломж, дахин ашиглах чадамжийг тодорхойлдог. Шилэн кабелийн дэд бүтцийн өгөгдөл нь эмзэг мэдээллийн онцлогоос шалтгаалж 2 болон 3 одны түвшинд нийтлэх боломжтой боловч ерөнхийшүүлсэн GeoJSON формат ашигласнаар 4 одны түвшинд ойртуулан нийтлэх боломж бүрдэнэ.

Нээлттэй өгөгдөл нь цахим засаглалын үндсэн элемент бөгөөд төр, хувийн хэвшил, иргэний нийгэм, эрдэм шинжилгээний байгууллагын хамтын оролцоог нэмэгдүүлж, өгөгдөл суурьтай шийдвэр гаргалтыг дэмждэг. Төрийн байгууллагын дэд бүтэц болон үйлчилгээний өгөгдлийг нээлттэй болгох нь хотын хөгжил, засаглалын үр ашиг, инновац, эдийн засгийн өсөлтөд бодит хувь нэмэр болж төрийн төсөв, хөрөнгө оруулалт, төсөл хэрэгжилтийн ил тод байдлыг нэмэгдүүлж, хариуцлагын тогтолцоог бэхжүүлдэг. Мөн нээлттэй өгөгдөл нь инновац, стартап, экосистем, GIS болон хиймэл оюун ухаанд суурилсан бүтээгдэхүүн үйлчилгээг хөгжүүлэх чухал нөөц бөгөөд эдийн засгийн идэвхижил, технологийн шинэчлэлийг хурдасгадаг бөгөөд байгууллага хоорондын мэдээллийн урсгал, системийн интеграци, өгөгдлийн экосистем бүрэлдэх суурь болж, олон эх сурвалжийн өгөгдлийг нэгтгэхэд өгөгдлийг стандартжуулснаар мэдээлэл цуглуулах, боловсруулах, хадгалалтын давхардлыг арилгах чадварыг нэмэгдүүлдэг.

Харин орон зайн нээлттэй өгөгдөл нь хотын инженерийн уялдаа холбоо, техникийн үндэслэлийн төлөвлөлтийг сайжруулах, сүлжээ, хөрөнгө оруулалтын давхцах эрсдлийг бууруулах, тухайн өгөгдлөөс бий болж буй ерөнхийшүүлсэн мэдээлэл нь гамшиг осол, тасалдал, эвдрэл гэмтэл зэрэг онцгой нөхцөлд шийдвэр гаргалтыг дэмжих найдвартай эх сурвалж болно.

**2.2. Гео-өгөгдлийн тухай**

Гео-өгөгдөл буюу орон зайн өгөгдөл нь аливаа объект, үзэгдэл, дэд бүтцийн байрлал, хэлбэр хэмжээ, хоорондын орон зайн харилцан хамаарлыг тодорхойлсон өгөгдлийн төрөл бөгөөд хотын дэд бүтэц, инженерийн шийдэл, харилцаа холбооны сүлжээний төлөвлөлтийг шинжлэх ухааны үндэслэлтэйгээр загварчлахад зайлшгүй шаардлагатай мэдээллийн эх үүсвэр юм. Шилэн кабелийн дэд бүтцийн мэдээлэл нь байршлын нарийвчлал, топологийн бүтэц, зангилаа хоорондын хамаарал зэргээс үүдэн орон зайн өгөгдлийн ангилалд бүрэн хамаардаг бөгөөд уг мэдээллийг олон улсын гео-стандартад нийцүүлэн боловсруулах нь өгөгдлийн чанар, дэд бүтцийн аюулгүй байдлыг хангахад чухал суурь болно.[5]

**Орон зайн өгөгдлийн бүтэц**

Орон зайн өгөгдөл нь геометр, атрибут, топологи гэсэн гурван үндсэн бүрэлдэхүүнээс бүрдэнэ.

Геометр нь объектын хэлбэр ба байрлалыг тодорхойлдог бөгөөд шилэн кабелийн хувьд:

- LineString – Кабелийн трасс
- Point – Зангилаа, худаг, холболтын хайрцаг
- MultiLineString/Network geometry – Олон операторуудын замнал давхцах тохиолдолд

Геометрийн нарийвчлал нь дэд бүтцийн аюулгүй байдлын түвшнээс шалтгаалан ерөнхийшүүлэх (generalization) шаардлагатай.

Атрибут нь геометрийн ард буй текстэн болон тоон мэдээлэл юм. Жишээ нь:

- Сүлжээний төрөл (backbone, distribution)
- Урт (метрээр)
- Операторын нэр
- Ашиглалтад орсон он
- Багтаамж, дамжуулах хурд гэх мэт

Нээлттэй өгөгдлийн түвшинд эдгээр атрибутыг дэд бүтцийн аюулгүй байдлын үүднээс шүүн эрэмбэлж нийтлэх шаардлагатай.

Топологи нь объектуудын холболт, үргэлжлэл, салаалах бүтэц зэрэг харилцан хамаарлыг илэрхийлж, сүлжээний

найджвартай байдлыг дүгнэхэд ашиглагдана. Шилэн кабелийн дэд бүтцэд топологи нь:

- Зангилаа – шугамын холболт
- Шугамын салаа, давхцах байдал
- Сул болон идэвхитэй холболтын замнал
- Сүлжээний бүтцийн найдвартай байдлын анализ зэрэгт чухал

Топологийн алдаа (dangling lines, overshoots, undershoots) нь GIS дээр өгөгдөл боловсруулахад техникийн ноцтой асуудал үүсгэдэг тул стандартын дагуу засварлах шаардлагатай.

#### OGC стандартууд (Open Geospatial Standards)

OGC-ийн вэб болон вектор өгөгдлийн стандартууд нь орон зайн мэдээллийг солилцох олон улсын нийтлэг протокол юм. [6]

- WMS (Web Map Service) нь өгөгдлийг зураг хэлбэрээр түгээж, эмзэг мэдээллийг хамгаалан зөвхөн харах боломж олгох үед тохиромжтой.
- WFS (Web Feature Service) нь вектор өгөгдлийг бүтнээр татах, засварлах боломжтой тул дотоод системд хэрэглэнэ.
- GeoJSON нь вэб орчинд түгээмэл, хөнгөн, нээлттэй өгөгдлийн нийтлэлд оновчтой формат бөгөөд LineString хэлбэрээр кабелийн трасс, Point хэлбэрээр зангилааг дүрслэхэд стандарт хэлбэр болдог.
- GML (Geography Markup Language) нь XML суурьтай нарийвчилсан гео-өгөгдлийн хэл бөгөөд топологийн бүтэцтэй, олон давхаргат инженерийн өгөгдөл солилцоход тохиромжтой.

Эдгээр стандартууд нь сүлжээний өгөгдлийг олон улсын стандартад нийцүүлж, API – аар түгээх боломжийг бий болгодог.

**INSPIRE стандарт ба дэд бүтцийн өгөгдлийн ангилал**  
Энэхүү стандарт нь Европын орон зайн мэдээллийн нэгдсэн загвар бөгөөд дэд бүтцийн өгөгдөл аюулгүй байдлын шаталсан ангилалыг тогтоодог. Гол зарчим нь нарийвчилсан координатыг нээлттэй түвшинд нийтлэхгүй байх, геометрийг ерөнхийшүүлэх, атрибутыг шүүн ангилах, мета өгөгдлийг бүрдүүлэх үйл явц юм.

INSPIRE-ийн “Utility and Network Facilities” ангилалд шилэн кабелийн сүлжээг гурван түвшинд зохион байгуулдаг. [7] Үүнд:

- Нээлттэй түвшинд ерөнхий байршлын бүдүүвч, трассын ерөнхий чиглэл, сүлжээний төрөл зэрэг мэдээлэл;
- Хязгаарлалттай түвшинд зангилааны бүдүүвчилсэн байршил, топологийн тодорхой хэсэг, хамрах хүрээ зэрэг мэдээлэл;
- Дотоод түвшинд үнэн координат, зангилааны нарийвчилсан байрлал, тоног төхөөрөмжийн мэдээлэл зэрэг эмзэг өгөгдөл багтана.

Орон зайн өгөгдлийн бүтэц, OGC болон INSPIRE -ийн стандартуудыг мөрдөх нь шилэн кабелийн дэд бүтцийг аюулгүй, тохиромжтой, системтэй байдлаар түгээх үндэс болж, олон эх сурвалжийн өгөгдлийг интеграцлах боломжийг бүрдүүлнэ.

## 2. Орон зайн өгөгдлийн аюулгүй байдлыг хэрхэн хангах шийдэл

Шилэн кабелийн дэд бүтцийн орон зайн өгөгдөл нь стратегийн чухал ач холбогдолтой мэдээлэл тул нээлттэй түвшинд түгээх, солилцох, боловсруулах үйл явц нь мэдээллийн аюулгүй байдлын үндсэн зарчимд суурилсан байх шаардлагатай. Инженерийн болон

холбооны сүлжээний мэдээлэл нь үйл ажиллагааны тасралтгүй байдалд шууд нөлөөлдөг учраас нууцлал, бүрэн бүтэн байдал, хүртээмжийн шаардлагыг хангах нь зүйтэй. Иймд дэд бүтцийн өгөгдлийн эмзэг байдлыг үнэлэх, хандалтыг түвшинчлэх, CIA загвараар хамгаалалтын зохицуулалт хийх нь өгөгдөлтэй ажиллах бодлогын үндсэн чиглэл болно.

#### CIA загвар

Мэдээллийн аюулгүй байдлын гол тулгуур болох нууцлал (Confidentiality), бүрэн бүтэн байдал (Integrity), хүртээмж (Availability) нь дэд бүтцийн өгөгдлийг удирдах үндсэн механизм юм.

- Нууцлал: Нарийвчилсан координат, зангилааны байршил, хүчин чадал, нөөц чиглэл зэрэг өндөр эрсдэлтэй мэдээллийг нийлгэх боломжгүй.
- Бүрэн бүтэн байдал: Топологийн алдаа, координатын зөрүү, атрибутын гажуудал нь инженерийн тооцоололд ноцтой нөлөөлдөг тул өгөгдөл стандартад нийцсэн, баталгаажсан байх ёстой.
- Хүртээмж: Онцгой нөхцөл байдал, гэмтэл болон төлөвлөлтийн үед баталгаатай хандах боломжтой байх шаардлагатай бөгөөд нээлттэй өгөгдлийн портал болон дотоод GIS систем найдвартай ажиллах шаардлагатай. Мөн шилэн кабелийн дэд бүтцийн орон зайн өгөгдөл нь байрлалын мэдээллээс гадна шугам сүлжээний логик, топологи, нөөц, чиглэл, чадамж зэрэг стратегийн шинжтэй тул өндөр эмзэг мэдээлэлд тооцогддог тул эмзэг байдлын үнэлгээг дараах үндсэн шалгуурт тулгуурлана. Үүнд:

- Нарийвчилсан координат нь халдлага, физик гэмтэл, шугам давхцлын эрсдлийг нэмэгдүүлэх тул ерөнхийшүүлэх шаардлагатай.
- Топологийн хамаарал буюу зангилаа, салаа, нөөц чиглэлийн мэдээлэл ил болох нь тасалдлын нөлөөллийн хүрээ болон операторуудын нөөц сүлжээний загварыг ил болгох эрсдэлтэй.
- Switching, center, router, ODF, POP зэрэг тоног төхөөрөмжийн мэдээлэл нь өндөр нууцлал шаарддаг.
- Сүлжээний чадамж, ачааллын үзүүлэлтүүд нь бизнесийн нууцын шинжтэй тул зөвхөн дотоод ашиглалтад хамаарна.

Эдгээр шалгуур нь өгөгдлийг түвшинчилсэн хандалтын загвараар зохион байгуулах суурь болно.

Харин түвшинчилсэн мэдээллийн хандалтын зарчим нь дэд бүтцийн эмзэг өгөгдлийг хамгаалж, олон нийтэд шаардлагатай ерөнхий мэдээллийг нээлттэй түвшинд нийтлэх тэнцвэртэй зохицуулалт юм. Дээр дурдсан INSPIRE болон OGC-ийн зарчмаар өгөгдөл гурван түвшинд ангилагдана.

- Нээлттэй түвшин нь эрсдэлгүй, ерөнхий мэдээлэл багтаах бөгөөд бүдүүвч зураглал, сүлжээний ангилал, операторын төрлийн ангилал, мета өгөгдөл зэрэг нээлттэй байж болох мэдээллийг хамарна.
- Хязгаарлалттай түвшин нь зөвшөөрөлтэй байгууллагуудад зориулагдах бөгөөд ерөнхийшүүлсэн зангилааны байршил, сүлжээний хамаарал, дундаж чадамж, операторуудын уялдаа холбоо зэрэг нарийвчилсан мэдээллийг агуулна.
- Дотоод түвшин нь стратегийн өндөр эмзэг өгөгдөл болох нарийвчилсан координат, үнэн зангилааны байршил, тоног төхөөрөмжийн үзүүлэлт, нөөц чиглэл болон онцгой байдлын

маршрутын мэдээллийг багтааж, зөвхөн дотоод хэрэглэгчдэд хандалттай байна. Энэ загвар нь CIA загвар болон дэд бүтцийн эмзэг байдлын үнэлгээтэй уялдаж, мэдээллийн ил тод байдал ба аюулгүй байдлын зөв тэнцвэрийг хангах арга зам юм.

### ТҮВШИНЧЛЭЛИЙН ХАРЬЦУУЛСАН ЗАГВАР

#### 2-Р ХҮСНЭГТ

Элемент	Нээлттэй түвшин	Хязгаарлалт -тай түвшин	Дотоод түвшин
Геометр	Ерөнхий шүүлсэн LineString (50m tolerance)	25m tolerance LineString	Бүрэн нарийвчлалтай
Координат	Grid-snapped	Offset applied	GPS coordinate
Зангилаа	Ерөнхий бүс	30-60m офсет	Нарийн байршил
Атрибут	cable_type, operator_class	length_range, capacity_level	Serial numbers, specs
Хандалт	Public API, Free	License required	Internal only
Формат	GeoJSON, CSV	WFS, GML	Full GI

### 3. Судлагдсан байдал

Шилэн кабелийн дэд бүтцийн орон зайн мэдээллийг нээлттэй түвшинд нийтлэх асуудал нь гео-өгөгдлийн стандарт, аюулгүй байдлын шаардлага, нээлттэй өгөгдлийн бодлого, ерөнхийшүүлэх аргачлалын огтлолцолд орших олон талт судалгааны асуудал юм. Олон улсын туршлага болон Монгол Улсын судалгааны өнөөгийн нөхцөл байдал нь түвшинчилсэн хандалтын загвар зайлшгүй шаардлагатай байгааг харуулж байна.

#### Олон улсын туршлага

Сөүл, Токио, Сингапур зэрэг ухаалаг хотууд дэд бүтцийн гео-өгөгдлийг түвшинчилсэн загвараар ангилан, ерөнхийшүүлсэн мэдээллийг нээлттэй, эмзэг мэдээллийг хязгаарлалттай хэлбэрээр түгээдэг. Энэ нь инновац, хот төлөвлөлт, судалгаанд шаардлагатай өгөгдлийг нээлттэй байлгахын зэрэгцээ дэд бүтцийн аюулгүй байдлыг хамгаалах тэнцвэртэй стратеги болдог.

- Сөүл хот нь WMS, GeoJSON хэлбэрээр трассын ерөнхий чиглэл, хамрах хүрээг нийтэлж, нарийвчилсан координатыг дотоод түвшинд хадгалдаг.

- Токио хот нь SDI тогтолцоогоор дэд бүтцийн өгөгдлийг ерөнхийшүүлэн геометр, багтаамжийн түвшний хэмжээнд түгээж, нарийвчилсан шугам сүлжээг зөвшөөрөлттэй түвшинд ашиглуулдаг.

- Сингапур улс нь гурван түвшний хандалтын загвар (нээлттэй-зөвшөөрөлттэй-хязгаарлалттай) ашиглаж, инженерийн өгөгдлийг өндөр хамгаалалттай болгон удирддаг.

- Европын INSPIRE, АНУ-ын FGDC, Канадын OGDИ зэрэг стандартууд эмзэг мэдээллийг далдлах/ нуух, шилжүүлэх/ координатын зөрүү үүсгэх, торонд тааруулах/ координатыг торон сүлжээнд шивэх, ерөнхийшүүлэн нийтлэхийг зөвлөдөг.

#### Монгол Улсын нөхцөл байдал

Манай улсад орон зайн өгөгдлийн нэгдсэн тогтолцоог хөгжүүлэх чиглэлд ахиц гарч байгаа хэдий ч инженерийн дэд бүтцийн мэдээллийн нээлттэй байдал,

түвшинчилсэн нийтлэлийн стандартыг нэвтрүүлэх үйл явц удаашралтай хэвээр байна. Үндэсний Геоортал нь 18 төрлийн суурь давхаргын нээлттэй өгөгдлийг MNS 6925-7:2021 стандарт болон олон улсын стандартад нийцэх GeoJSON, WMS, WFS, GML форматаар нээлттэй өгөгдлийг нийтэлж түгээх орчныг бүрдүүлсэн боловч холбооны дэд бүтцийн давхарга нэгдсэн байдлаар хөгжүүлэлт хийгдээгүй хэвээр байна.

Төр болон хувийн хэвшлийн нээлттэй өгөгдлийн системүүд нь статистик мэдээлэлд төвлөрч, орон зайн болон дэд бүтцийн өгөгдлийг бараг нийтэлдэггүй.

Шалтгаан нь:

- Шилэн кабелийн дэд бүтцийн орон зайн өгөгдлийн эмзэг мэдээллийн ангилал тодорхойгүй
- Ерөнхийшүүлэх техникийн стандартгүй
- Эзэмшлийн давхардал, байгууллага хоорондын зохицуулалт сул зэргээс үүдэлтэй.

Олон улсын туршлагаас харахад дэд бүтцийн гео-өгөгдлийг нээлттэй болгох гол зарчим нь түвшинчилсэн, ерөнхийшүүлсэн мэдээллийг олон нийтэд түгээж, харин нарийвчилсан инженерийн өгөгдлийг хамгаалалттай түвшинд хадгалдаг байна. Монгол Улсад ийм загвар шаардлагатай ч стандартчлал, судалгаа хомс байгаа нь энэ чиглэлийн судалгааны хоосон зай хэвээр байгааг илтгэж байна.

### 4. Шилэн кабелийн дэд бүтцийн орон зайн өгөгдлийг нээлттэй нийтлэх жишиг загвар

Шилэн кабелийн дэд бүтцийн орон зайн өгөгдлийг нээлттэй өгөгдлийн системд түвшинчилсэн хэлбэрээр нийтлэх жишиг загварыг гаргахдаа өмнө дурдсан олон улсын INSPIRE/ OGC стандарт, мэдээллийн аюулгүй байдлын CIA загвар, орон зайн ерөнхийшүүлэх аргачлал, SKAN архитектурын шаардлагыг хангах техникийн нэгтгэсэн тогтолцоог бий болгоно. Тус загвар нь 5 үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгээс бүрдэнэ. Үүнд:

- Орон зайн өгөгдлийн бүтэц
- Эмзэг байдлын үнэлгээ
- Ерөнхийшүүлэх алгоритм
- Түвшинчилсэн хандалтын эрх
- SKAN-д нийцсэн нийтлэх архитектур болно.

Шилэн кабелийн дэд бүтцийг GIS суурьтайгаар нээлттэй өгөгдөл болгон загварчлахдаа кабелийн трасс, зангилаа, худаг, сувагчлалын байгууламж гэсэн үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгийг тодорхойлон өгөгдлийн бүтцийг боловсруулсан болно.[8]

#### - Трассын мэдээллийн загвар (Cable Route Schema)

- Геометр: LineString
- Гол атрибутууд:
  - cable\_type (backbone/distribution/drop)
  - core\_capacity
  - length\_m
  - operator\_name
  - install\_year
  - maintenance\_status
- Тайлбар: Шилэн кабелийн гол болон салбар шугамын замнал

#### - Зангилааны мэдээллийн загвар (Node / POP information)

- Геометр: Point
- Гол атрибутууд:
  - node\_type
  - elevation
  - power\_source
  - redundancy\_level

- Тайлбар: Хараат төв, ODF, POP, switch node зэрэг элемент

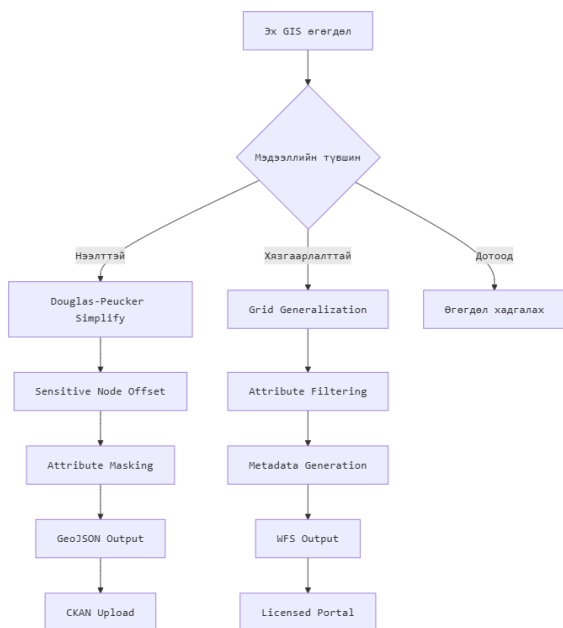
**- Худаг ба сувагчлалын мэдээлэл (Manhole and Duct system)**

- Геометр: Point (худаг), LineString (сувагчлал)
- Гол атрибутууд:
  - manhole\_type
  - duct\_count
  - diameter\_mm
  - construction\_year

Эдгээр өгөгдлийн бүтцийг INSPIRE-ийн ангилалд нийцүүлэн боловсруулсан бөгөөд дотоод, нээлттэй, хязгаарлалттай хэлбэрээр түвшинчилсэн.

**Өгөгдлийг ерөнхийшүүлэх алгоритм**

Шилэн кабелийн дэд бүтцийн мэдээлэл нь эмзэг мэдээлэл учраас координатыг шууд нийтэлбэл эрсдэл үүсэх учир INSPIRE болон OGC-ийн зөвлөмжийг мөрдөн ерөнхийшүүлэх алгоритмыг боловсруулав.



2-р зураг. Өгөгдөл ерөнхийшүүлэх алгоритмын загвар

**Geometry Simplification (Douglas-Peucker Algorithm)**

Нарийвчилсан LineString өгөгдлийг 30-50 метрийн хүлцэлтэйгээр багасгаж, ерөнхийшүүлсэн геометр гаргав. Энэ нь сүлжээний чиглэл хадгалагдах боловч нарийн координат алдагдана.

**Жишээ – 1**

```
SELECT
id,
ST_SimplifyPreserveTopology(geom, 40) AS geom_generalized
FROM fiber_route;
```

- Хүлцэл (tolerance) – ийг 30 – 50 м хооронд тохируулж болно.

**Sensitive Node Offset**

POP, ODF, худаг зэрэг зангилааны байршлыг санамсаргүй офсетээр шилжүүлэв. Аюулгүй байдлын үүднээс нээлттэй түвшинд зангилааны үнэн байршлыг харуулахгүй.

**Жишээ – 2**

```
SELECT
id,
ST_Translate(
geom,
(random() * (60 - 20) + 20) * cos(random() * 2 * pi()),
(random() * (60 - 20) + 20) * sin(random() * 2 * pi())
) AS geom_offset
FROM fiber_nodes;
```

- offset\_distance = random (20-60m)
- offset\_angle = random (0 - 360°)

**Grid-based Generalization**

Геометрийг 25-50 метрийн resolution бүхий grid-т тулгаж, координатын нарийвчлалыг бууруулав. Энэ нь маршрутын нууцлалыг өндөр түвшинд хамгаална.

**Жишээ – 3**

```
SELECT
id,
ST_SnapToGrid(geom, 40) AS geom_gridsnapped
FROM fiber_route;
```

- Зөвлөмж: grid\_size = 25-50 метр

**Attribute Masking**

Тоног төхөөрөмжийн төрөл, серийн дугаар, redundancy\_link гэх мэт эмзэг атрибутуудыг нээлттэй түвшинд ил гаргахгүйгээр шүүв.

**Жишээ – 4**

```
SELECT
id,
cable_type,
operator_class,
NULL::text AS serial_number,
NULL::text AS equipment_model,
NULL::text AS redundancy_link,
geom
FROM fiber_route_sanitized;
```

- Энд эмзэг атрибутын утгыг зориуд NULL болгож масклав.

**Нээлттэй түвшний Гео-өгөгдөл гаргах**

Дээрх тус тусдаа алхмуудыг нэгтгэн нээлттэй түвшний GeoJSON бэлтгэлээ.

**Жишээ – 5**

```
SELECT jsonb_build_object(
'type', 'Feature',
'id', id,
'geometry', ST_AsGeoJSON(
ST_SnapToGrid(
ST_SimplifyPreserveTopology(geom, 40),
40)
)::jsonb,
'properties', jsonb_build_object(
'cable_type', cable_type,
'operator_class', operator_class
)
) AS feature
FROM fiber_route
ORDER BY id;
```

- Шугамыг 40 метр хүлцэлтэйгээр simplification хийсэн.
- Grid-snapping ашиглан нууцлалыг нэмэгдүүлнэ.
- Эмзэг атрибутыг properties – аас хасна.
- GeoJSON хэлбэрийн өгөгдөл гаргана.

**Шилэн кабелийн дэд бүтцийн мета өгөгдлийн загвар**

CKAN болон ISO 19115:2003 стандартын шаардлагад нийцүүлэн дараах мета өгөгдлийн загварыг боловсруулав.

Мета өгөгдлийн стандарт нь нээлттэй өгөгдлийн чанарыг баталгаажуулах үндсэн нөхцөл болно.

**ШИЛЭН КАБЕЛИЙН ДЭД БҮТЦИЙН МЕТА ӨГӨГДӨЛ**

**3-Р ХҮСНЭГТ**

Талбар	Утга	Формат	Шаардлагатай эсэх
title	УБ хотын шилэн кабелийн ерөнхийшүүлсэн трасс	string	✓
description	Шилэн кабелийн чиглэл, ангилал, операторын мэдээлэл	text	✓
tags	fiber-optic, infrastructure, telecommunications	array	✓
spatial_coverage	POLYGON((106.6 47.8, 107.2 47.8, 107.2 48.1, 106.6 48.1, 106.6 47.8))	WKT	✓
temporal_coverage	2020-01-01/2025-12-31	ISO8601	✓
crs	EPSG:4326	string	✓
update_frequency	annually	string	✓
license	Open Data License	string	✓
processing_notes	Geometry simplified, nodes offset applied	text	-
data_quality	Accuracy ±25m, Completeness 95%	text	-

**Шилэн кабелийн дэд бүтцийг SKAN суурьтай нийтлэх**

Олон улсын болон бусад платформд нээлттэй өгөгдлийг нийтлэх боломжийг олгох SKAN-д нийцүүлэн архитектур боловсрууллаа.

Өгөгдийн урсгалын архитектурын загвар нь шилэн кабелийн орон зайн өгөгдлийг нээлттэй түвшинд түгээх үйл явцыг шаталсан өгөгдийн урсгалд тулгуурлан дараах үндсэн бүрэлдэхүүнийг хамааруулсан.

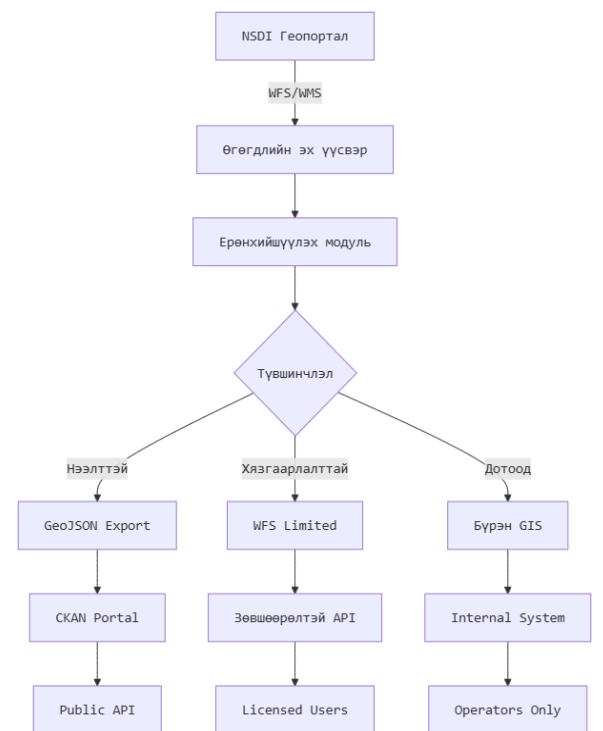
- GIS эх өгөгдийн эх үүсвэр нь инженерийн зураг, Геоорталын WFS/WMS давхарга, оператор байгууллагын GIS сервер зэрэг эх өгөгдийг хүлээн авна.

-Ерөнхийшүүлэх модуль нь эмзэг өгөгдийн хамгаалалтыг хангах зорилгоор геометрийн simplification, node\_offseting, grid\_based, generalization болон атрибутын masking зэрэг алгоритмыг ажиллуулна.

- Мета өгөгдөл үүсгэгч ISO 19115:2003 стандарт болон SKAN -ийн metadata-schema-д нийцүүлэн өгөгдийн тайлбар, хамаарал, огноо, лиценз, ерөнхийшүүлсэн тэмдэглэгээг бүрдүүлнэ.

- SKAN Resource Compiler ерөнхийшүүлсэн өгөгдийг GeoJSON, CSV, WMS зэрэг түгээхэд бэлэн хэлбэрт хөрвүүлж, нөөц (resource) түвшний бүтэц үүсгэнэ.

- SKAN нээлттэй өгөгдийн портал өгөгдөл нь dataset байдлаар нийтлэгдэж, хэрэглэгчдэд API байдлаар түгээгдэнэ.



**3-р зураг. Шилэн кабелийн өгөгдөл нийтлэх архитектур**

Энэхүү урсгал нь эмзэг өгөгдийг мэдээллийн аюулгүй байдлын шаардлагад нийцүүлэн боловсруулж, нээлттэй хэлбэрээр түгээх боломжийг бүрдүүлдэг.

**API ба хэрэглэгчийн түвшинчилсэн хандалт**

Шилэн кабелийн дэд бүтцийн өгөгдийг мэдээллийн аюулгүй байдлын шаардлагыг харгалзан түвшинчилсэн хандалт хийх боломжийг бий болгодог. Үүнд:

- Public API (нээлттэй түвшин): Ерөнхийшүүлсэн GeoJSON, CSV хэлбэрийн аюулгүй өгөгдийг олон нийт, судлаач, бизнесийн хэрэглэгчид авах боломжтойгоор түгээнэ.
- Restricted API (хязгаарлалттай түвшин): Аюулгүй байдлын шалгуурыг хангаж буй хэрэглэгчдэд зориулсан WFS давхаргыг санал болгоно. Энэ түвшинд ерөнхийшүүлсэн зангилаа болон сүлжээ хоорондын уялдааны өгөгдөл түгээгдэнэ.
- Internal API (дотоод түвшин): Операторын инженерүүд болон аюулгүй байдлын байгууллагуудад зориулан WFS/WMS болон GML форматуудыг агуулна. Энд нарийвчилсан координат, тоног төхөөрөмжийн үнэн байршил зэрэг стратегийн мэдээлэл багтана.

Хандалтын бүх эрх, боломжуудыг SKAN – ийн Role-Based Access Control (RBAC) тогтолцоогоор удирдана.

**Нэгдсэн системийн интеграцийн архитектур**

NSDI → Generalization Engine → SKAN гэсэн интерацийн дараалал нь Монгол Улсын гео-өгөгдийн тогтолцоог нэгтгэн байршуулах боломжийг бүрдүүлдэг.

- NSDI-ийн суурь давхарга Орон зайн өгөгдлийг олон улсын стандартын дагуу нэгдсэн байдлаар түгээдэг.
- SKAN нээлттэй өгөгдлийн портал ерөнхийшүүлсэн, аюулгүй түвшний өгөгдлийг олон нийт, судлаачид, төр, хувийн хэвшилд байршуулах боломжийг олгодог.
- Орон зайн өгөгдлийн нэгдсэн API үйлчилгээний давхаргад хэрэглэгчийг түвшинчлэн холбож, өгөгдлийг динамик байдлаар ашиглах үүд хаалгыг нээдэг.

Энэ архитектур нь Улаанбаатар хотын шилэн кабелийн дэд бүтцийн орон зайн мэдээллийг аюулгүй, тогтвортой, интероперабил байдлаар түгээх нөхцөл бүрдүүлж байгаа бөгөөд судалгааны үр дүн нь нээлттэй өгөгдлийн бодлого, мэдээллийн аюулгүй байдал, GIS стандартын огтлолцолд нийцсэн шийдэл болохыг харуулж байна. Боловсруулсан өгөгдлийн бүтэц, түвшинчилсэн загвар, ерөнхийшүүлэх алгоритм, мета өгөгдлийн стандарт болон SKAN-ийн архитектур нь дэд бүтцийн өгөгдлийн эмзэг байдлыг зохистой хамгаалж, нээлттэй өгөгдлийн бодлогын шаардлагыг хангаж, олон улсын INSPIRE/OGC стандарттай нийцэж, Монгол Улсад дэд бүтцийн өгөгдлийг ил тод, үр ашигтай удирдах боломжийг бүрдүүлсэн цогц арга зүй юм.

#### ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаа нь шилэн кабелийн дэд бүтцийн орон зайн өгөгдлийг стандартчилж, ерөнхийшүүлэн түвшинчилсэн байдлаар нээлттэй нийтлэх боломж Монгол Улсад техникийн болон Институцийн хувьд бүрэн боломжтой гэдгийг нотлохыг зорилоо. GIS-ийн ерөнхийшүүлэх алгоритмууд нь эмзэг координатыг хамгаалж, мэдээллийн аюулгүй байдлыг хангах үр дүнтэй арга болохыг олон улсын туршлага баталж байна. SKAN-д суурилсан нээлттэй өгөгдлийн архитектур нь ил тод байдал, өгөгдлийн засаглалын шаардлагыг хангаж, харилцаа холбооны дэд бүтцийн мэдээллийг зохистой түвшинд түгээх боломжийг олгож байна. Боловсруулсан жишиг загвар нь операторуудын уялдаа холбоог нэмэгдүүлж, хот төлөвлөлт, дэд бүтцийн хөгжлийг өгөгдөл суурьтай болгох нөхцөл бүрдүүлж, инновац болон шинэ үйлчилгээ хөгжих боломжийг нээж байна. Судалгааны загвар нь Улаанбаатар хот төдийгүй бусад хот суурингуудад хэрэгжүүлэх боломжтой юм.

#### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] Газар зохион байгуулалт, геодези, зураг зүйн ерөнхий газар. Үндэсний Геопорталын мэдээлэл. <https://nsdi.gov.mn>
- [2] Монгол Улсын Засгийн газар. Нийтийн мэдээллийн ил тод байдлын тухай хууль. <https://legalinfo.mn/mn/detail?lawId=16390263044601>
- [3] Монгол Улсын Засгийн газар. Нээлттэй өгөгдөл бий болгох, нийтлэх журам. <https://legalinfo.mn/mn/detail?lawId=16530378906831>
- [4] Төрийн цахим үйлчилгээний зохицуулалтын газар. Төрийн байгууллагаас нээлттэй өгөгдөл бий болгох гарын авлага. <https://opendata.khurdan.mn>
- [5] Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J. & Rhind, D.W. (2015). Geographic Information Science and Systems. 4th Edition. Wiley.

[6] OGC Standards. Web Map Service, Web Feature Service Implementation Specification. [ogc.org](http://ogc.org)

[7] INSPIRE Directive 2007/2/EC. Infrastructure for Spatial Information in the European Community. [inspire.ec.europa.eu](http://inspire.ec.europa.eu)

[8] Data Structures and Algorithms: Annotated Reference with Examples First Edition Copyright cGranville Barnett, and Luca Del Tongo 2008. <file:///C:/Users/User/Desktop/DATA/Dsa.pdf>

## ХУВИЙН ОРОН СУУЦНЫ ГАДНА БА ДОТОР ХОЛБООНЫ (ДОХИОЛЛЫН) АЖЛЫН ЗУРАГ БОЛОВСРУУЛАХ

**Батдорж СҮХ-ОЧИР<sup>1</sup>, Цэвэгмэдийн БАЛЖИННЯМ<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Холбооны инженерчлэлийн тэнхим

*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [erchimt.tsoilon@gmail.com](mailto:erchimt.tsoilon@gmail.com)<sup>1</sup>*

**Хураангуй:** Барилгын ажлын нэг гол хэсэг нь зураг төсөл юм. Барилга байгууламжийн цаашдын ирээдүй нь тухайн барилгын зураг төсөл хэрхэн үнэн зөв зохиогдсоноос шууд шалтгаалдаг. Барилга угсралтын ажилд гарч буй нэг үндсэн дутагдал нь тухайн барилгын зураг төсөлд байвал зохих норм стандарт түүнд заасан хэмжээс, технологийн шаардлага зэргийг үл хайхран хийх болсонтой холбоотой. Холбоо, дохиоллын зураг боловсруулахад ашиглах програмуудыг судалсаны үндсэн дээр холбоо, дохиоллын ажлын зургийг холбооны дотор монтаж суурилуулах стандартын дагуу шинэ үеийн техник технологи болох Autocad програм ашиглан барилгын гадна ба дотор холбоо, дохиоллын зураг, Estimator Pro програм ашиглан төсвийг боловсрууллаа.

**Түлхүүр үг:** Барилгын холбоо дохиолол, зураг төсөл, холболт, техник технолог

### I. AUTOCAD ПРОГРАММЫН ТУХАЙ

AutoCAD-ыг програм хангамжийг анх 1980 онд АНУ-ын Sousolith Autodesk компанид анх зохиосон. Энэ компани одоо Autodesk болж автомат зургийн хамгийн том компани болж өргөжжээ. Эдгээрээс 2005 хувилбар нь сургалт болон хэрэглээнд зориулсан сурахад хамгийн зохимжтой хувилбар юм. Эдгээрээс гадна тодорхой мэргэжлийн салбарт зориулсан MechCAD, MathCAD, MapCAD, AutoCAD, GeoCAD, ElectroCAD зэрэг хувилбар програмууд байдаг. AutoCAD програмын хувилбарууд нь инженерийн зураг төсөл боловсруулах ажилд хамгийн өргөн хэрэглэгдэж байгаа систем юм. Уг системийг ашиглан хавтгайн болон огторгуйн зураг төслийг боловсруулах, огторгуйд зурагдсан объектын бодит зургийг өндөр түвшинд дүрслэх, нэг зурсан зургаа масштаб, проекцийн хувьд олон хэлбэрээр харах, хэвлэж гаргах зэрэг боломжтой. Мөн өөрийн AutoLisp програмчлалын хэлийг ашиглан тооцоо, зургийн үйл ажиллагаагаа програмчлах боломжтой юм.

### II. ХОЛБОО, ДОХИОЛЛЫН СТАНДАРТУУДЫН ТУХАЙ

*A. Орон сууцны барилгын мэдээлэл, холбооны суурин сүлжээний төлөвлөлт. Ерөнхий шаардлага MNS 6580 : 2016*

Орон сууцны барилгын зураг төслийн төлөвлөгч зургийн даалгаврыг үндэслэн МХСС-ны зураг төслийн төлөвлөгчтэй харилцан тохиролцон дараах төлөвлөлтийг гүйцэтгэнэ. Үүнд:

- Орон сууцны барилгын дотор ашиглах МХСС-ний техник, хэрэгсэл байрлуулах техникийн өрөө,
- МХСС-ний гадна сүлжээний кабель шугамын оролт,

- Барилгын доторх кабелийн сүлжээний босоо чиглэлийн сувагчлалын орон зай,
- МХСС-ний давхарын хуваарилах хайрцаг суурилуулах орон зай ,
- Айлын сууцны МХСС-ний хуваарилах хайрцаг байрлуулах орон зай,

#### Техникийн өрөө

Орон сууцны барилгад МХСС-ний гадна ба дотоод кабель шугамын сүлжээний төгсгөлийн төхөөрөмж, техник хэрэгсэл, галын аюул, хамгаалалтын дохиололын систем, дотор холбооны станц, сүлжээний сервер зэрэг тоног төхөөрөмжийг суурилуулах зорилгоор техникийн өрөөг төлөвлөнө.

Техникийн өрөө нь гадна сүлжээний кабель шугамын сүлжээтэй холбоход ойр, үер усны гамшигт автагдахгүй байх зорилгоор барилгын 1-р давхарт байрлах.

Тайлбар: Барилгын зорийн давхарт үерийн болон хөрсний ус нэвтрэх боломжгүй нөхцөлд зорийн давхарт техникийн өрөөг байрлуулж болно.

Техникийн өрөөний талбайн хэмжээ 9 м<sup>2</sup>-аас багагүй байх.

Орон сууцны барилгад галын аюул, хамгаалалтын дохиолол ба дүрс хяналтын системийн байнгын хяналт тавих операторууд ажиллах бол техникийн өрөөнөөс тусад нь хөдөлмөрийн аюулгүй ажиллагаа, эрүүл ахуйн шаардлагыг хангасан өрөөг төлөвлөх.

Үүнд:

- Барилгын давхаруудад тархах кабелийн хамгаалалтын сувагчлал ба гадна сүлжээний кабелийн оролтонд ойрхон байрлалд,
- Дамжин өнгөрөх зориулалтын бус байх,
- Ашиглалтын явцад барилгын дотор галын аюул, хамгаалалтын дохиолол ба дүрс бичлэгийн хяналтын системийн тоног төхөөрөмж суурилуулах боломжийг хангасан байх,
- Барилгын доторх дулаан, цэвэр бохир усны сүлжээнд гарсан гэмтлийн улмаас осол аваарт өртөхөөргүй байршилд, хаалга нь шалаар

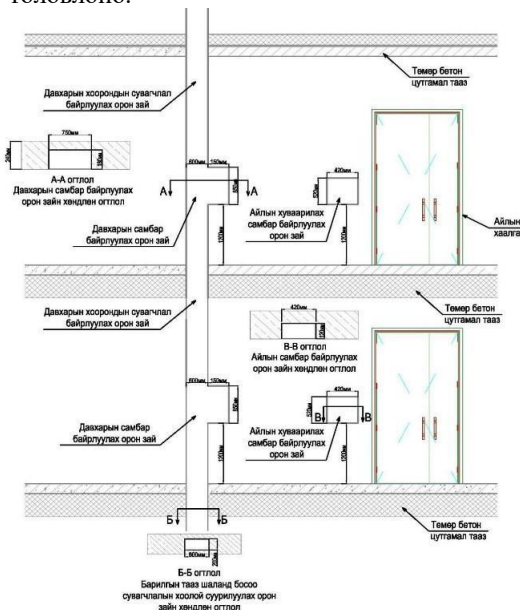
- дамжин ус орохоос хамгаалсан босготой байх.
- Техникийн шалнаас тааз (дүүжин тааз) хүртэлх өндөр 2600 мм-ээс багагүй, хаалга нь 2000мм х 900мм-ээс багагүй хэмжээтэй гадагшаа 180 градусаар нээгддэг байх,
- Цонх нь нарны шууд тусгалаас хамгаалагдсан
- Цахилгаан ба соронзон талбайн хүчтэй эх үүсвэр, хүчтэй доргилт өгөх тоног төхөөрөмжөөс 1 м-ээс багагүй зайтай байршилд,
- Барилгын ба байгалийн агааржуулах системд холбогдсон байх,
- Барилгын гал ба хамгаалалтын дохиоллын системд холбогдсон гадны халдлагаас найдвартай хамгаалагдсан байх,
- Техникийн шалар тоноглогдсон, антистатистик гадаргуутай байх,
- Инженерийн бусад шугам сүлжээ дамжин өнгөрөхгүй байх

**B. Орон сууцны барилгын давхарын ба айлын орон сууцны хуваарилах хайрцаг, давхар хоорондын сувагчлал суурилуулах ховил-орон зайг төлөвлөх**

Барилгын давхар бүрийн нийтийн эзэмшлийн талбайн зайг төлөвлөхдөө

- Мэдээлэл, холбоо болон дохиоллын сүлжээний кабель шугамын босоо сувагчлалын хоолой,
- давхарын хуваарилах хайрцаг,
- айлын орон сууцанд хуваарилах хайрцаг суурилуулах орон зайг 2-р хүснэгтэнд заагдсан хэмжээ 2-р зурагт заагдсан бүдүүвчийг үндэслэн төлөвлөнө.

Давхарын хуваарилах самбарын байршлийг айлын сууцны өрөөнүүдийн дунд, кабелийн тархалтын хэмжээ богино байхаар, барилгын хийц бүтээцийн архитектуртай уялдуулан төлөвлөнө.



**1-р зураг. Барилгын хийцийн зурагт МХСС-ний босоо тэнхлэгийн кабель шугамын сувагчлалын хоолой, давхарын ба айлын сууцны хуваарилах хайрцаг суурилуулах орон зайг төлөвлөх бүдүүвч**

Давхарын хуваарилах хайрцагийг цахилгааны сүлжээний шугамын хайрцаг (самбар)-аас тусдаа, зэрэгцээ нэг түвшинд аюулгүй ажиллагааны техникийн шаардлагыг хангасан орон зайд байрлахаар төлөвлөнө.

Айлын орон сууцны хуваарилах хайрцагийн орон зайг айлын сууцны өрөөнүүдийн дунд МХСС-ны утасгүй сүлжээний (Wi Fi) дохионы тархалтыг барилгын хананд хаагдахааргүй орчинг сонгож байрлуулахаар төлөвлөх

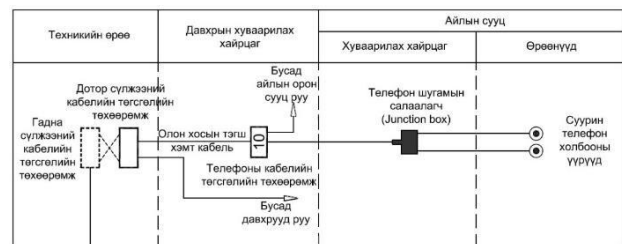
Барилгын зоорийн давхараас эхлэн бүх давхаруудын хооронд болон барилгын дээвэр дээр гартал мэдээлэл, холбооны суурин сүлжээний кабелийн хамгаалалтын 50мм-ээс 70мм-ийн гадна диаметртэй хуванцар хоолой 13 хүртэл ширхэгийг суурилуулах зорилгоор тааз, шаланд тэгш өнцөгт хэлбэртэй нүх (өргөн нь 200мм-ээс багагүй, урт нь 600 мм-ээс багагүй ) гаргахаар төлөвлөнө.

**Кабелийн хамгаалалтын сувагчлалын төлөвлөлт**

Орон сууцны барилгын дотор МХСС-ний кабель шугамыг барилга (орц)-ын техникийн өрөөнөөс хамгаалалтын сувагчлалыг давхар хооронд тараахаар төлөвлөнө.

Орон сууцны барилгын дотор мэдээлэл холбооны суурин сүлжээнээс гадна галын аюул, хамгаалалтын дохиолол, домофон (орцны харилцуурын систем), дүрс бичлэгийн хяналтын систем зэрэг сул гүйдлийн систем суурилуулах, өргөтгөх боломжийг хангах зорилгоор хамгаалалтын сувагчлал давхар хооронд, (давхарын хуваарилах самбараар дамжуулан) давхарын хуваарилах самбараас айлын доторх хуваарилах самбар хүртэл тодорхой нөөцтэй байхаар үндэслэн төлөвлөнө.

Орон сууцны доторх мэдээлэл, холбооны кабель шугамын сүлжээний хамгаалалтанд хагуу ба уян хуванцар хоолой, далдлагч, хүчитгэсэн хамгаалалт шаардлагатай нөхцөлд төмөр хоолойг ашиглахаар төлөвлөнө.



**2-р зураг. Орон сууцны барилгад суурин телефон холбооны кабель суурилуулах төлөвлөлтийн бүдүүвч**

Барилгын доторх суурин телефон холбооны кабелийн сүлжээг барилгын (орцны) техникийн өрөөнд төгсгөлийн төхөөрөмж байрлуулан, түүнээс давхаруудын хуваарилах самбар хүртэл олон улсын ISO/IEC 11801 ба ANSI TIA/EIA 568 C багц стандартаар тогтоосон 3 ба түүнээс дээш ангилалын

олон хосын тэгш хэмт кабелиар, хэрэглэгчийн шугаманд тэгш хэмт 1 ба 2 хосын кабель ашиглахаар төлөвлөнө.

### III. ХОЛБОО, ДОХИОЛЛЫН СТАНДАРТУУДЫН ТУХАЙ

#### A. Хотхоны гадна холбоо, камержуулалтын төлөвлөлт

Миний сонгосон хувийн орон сууцны хотхон нь

- Харуулын байр, техникийн байр мөн үйлчилгээний барилгатай
- Хоёр төрлийн 30-н ширхэг барилгатай
- Барилга тус бүр нь 2 давхартай
- 1-р давхартаа авто машины гараж, техникийн өрөөтэй

Барилгын гадна холбооны ажлын зургийг барилгын зурагт ГХ гэж тэмдэглэх ба үүнд тус барилгад гадна холбооны шугамын радио, холбоо, интернет, КАТВ-ын холболтуудыг техникийн нөхцөлд заасны дагуу зурагт үзүүлэн, холбогдох төхөөрөмжүүдэд холбох схем зураглал хийж, тайлбар бичиг хийж, таних тэмдэг, материалын түүврийг түүж төсөв тооцоог хийхэд бэлдэж өгдөг.

#### Зураг хийх үндэслэл

Улаанбаатар хот, Хан-Уул дүүргийн 8-р хороонд баригдах “Шинэ уулзвар” ХХК-ийн амралт сувилалын цогцолборын барилгын гадна холбооны угсралтын ажлын зургийг хотхоны ерөнхий төлөвлөгөөний зураг, холбооны Монгол улсад мөрдөгдөж буй **MNS6305:2012** тоот стандарт зэргийг үндэслэн хийж гүйцэтгэв.

Зурагт тусгасан үндсэн шийдэл

Одоо байгаа ХШ 411-н хүрээний М-N 1-4 худгаас төлөвлөж буй хотхон хүртэл 110 мм-н (2+0) PVC хоолойтой, хотхон доторх барилгууд хооронд 110 мм-н (1+0) хоолойтой сувагчлал хийхээр төлөвлөв.

Хотхон дотор авто зам хөндлөн гарч байгаа хэсгүүдэд  $\phi=159\text{мм}$  ган хоолойд сүвлэн хийхээр төлөвлөв.

Хотхон дотор ТБУХ-2 маркийн 10ш худаг суурилуулана.



3-р зураг. Хотхоны гадна холбооны сувагчлалын трассын зураг

Хотхоны нийтийн эзэмшлийн гудамж талбайн аюулгүй байдлыг хангах үүднээс дүрс ажиглалтын хяналтын систем суурилуулахаар төлөвлөв.



4-р зураг. Хотхоны гадна хяналтын камерийн зураг

#### B. Хотхоны дотор холбоо, дохиоллын төлөвлөлт

##### Зураг хийх үндэслэл

Улаанбаатар хот, Хан-Уул дүүрэг, 8-р хороонд баригдах "Шинэ уулзвар" ХХК-ийн амралт сувилалын цогцолборын барилгын тодорхойлолт:

- 3-н блок, 2 давхар амины орон сууцны зориулалттай
- Тус барилгад холбоо дохиоллын ажлын зургийг барилгын төлөвлөлт, байгуулалтын дараах стандарт, норм дүрмийг үндэслэн хийж гүйцэтгэв. Үүнд:
  - Холбоо дохиоллын ажлын зураг боловсруулах Улсын стандарт MNS 6586:2016
  - Барилга байгууламжийн гал унтраах автомат төхөөрөмж, дохиоллын хэрэгсэл БНБД 21-04-05
  - Галын дохиоллын төлөвлөлт, угсралт хийх дүрэм БНБД 21-04-04
  - Барилгын зурагт холбоо дохиоллын тоног төхөөрөмжүүдийн тэмдэглэгээ MNS 5532:2016
  - Зураг төсөл боловсруулах, зөвшилцөх, батлах дүрэм БНБД 01-11-98
  - Барилгын дотор холбоо, дохиоллын сувагчлал ба кабелийн угсралт хийх Улсын стандарт MNS 5471:2005

##### Зурагт тусгасан үндсэн шийдэл

Мэдээлэл холбооны суурин сүлжээний техникийн өрөө, босоо ба хөндлөн сувагчлалын төлөвлөлт:

- Орон сууцны барилгын 1-р давхрын холбооны хайрцагт МХСС-ний хуваарилах гол төхөөрөмжүүдийг байрлуулахаар төлөвлөв.
- Холбооны хайрцагаас гаргах МХСС-ний дэд бүтцийн кабелийн марк, тоо хэмжээг үндэслэн тооцож давхруудын хоорондын ачааллаас хамааруулан зорийн давхраас  $\Phi 70$  мм-ийн диаметртэй хуванцар хоолойг 2ш суурилуулахаар төлөвлөв.
- Босоо сувагчлалыг барилгын хананд ховил гарган, хөндлөн сувагчлалыг шалны бэлтгэлд далд шигтгэж суурилуулана.
- Давхар бүрт МХСС-ний дэд бүтцийн кабель шугамын сүлжээний хуваарилагчуудыг байрлуулана.

е. Давхрын хуваарилах хайрцагнаас өрөөнүүдэд суурилуулах МХСС-ний төгсгөлийн үүр хүртэл Ф20-32 мм-ийн хуванцар хоолойгоор шалны бэлтгэлд далд суурилуулахаар, галын дохиоллын мэдээлэгчүүдийг таазаар уян хоолойгоор далд суурилуулахаар тус тус төлөвлөв.

ф. МХСС-ний төгсгөлийн үүрийг хананд шалны түвшинөөс дээш 0.3 м-ийн өндөрт суурилуулахаар төлөвлөв.

г. МХСС-ний гадна оролт, кабелийг тусад нь гадна холбооны зурагт тусгагдах тул ХД-ын зурагт төлөвлөөгүй болно.

1. Суурин телефон холбооны төлөвлөлт:

1.1 Суурин телефон холбооны барилгын доторх сүлжээнд зориулан 1-р давхрын холбооны хайрцагт төгсгөлийн төхөөрөмж 10x2 төгсгөлийн төхөөрөмж суурилуулан холбохоор төлөвлөв.

1.2 Давхрын хуваарилах самбараас өрөөнүүдэд суурилуулах төгсгөлийн үүр хүртэл UTP 2x2x0.5 кабель татах ба ХД-7-аас ХД-12 -д (хөндлөн тэнхлэгийн сүлжээний кабелийн тархалтын зурагт) заагдсанаар суурилуулна,

2. Интернэтийн сүлжээний төлөвлөлт:

2.1 Интернэтийн сүлжээнд зориулан барилга бүрт Switch-ийг байрлуулан өрөөнүүдэд суурилуулах интернэтийн сүлжээний төгсгөлийн үүр хүртэл UTP 4x2x0.5 Cat.5/5e маркийн кабель татна.

3. Кабелийн телевизийн сүлжээний төлөвлөлт:

3.1 Кабелийн телевизийн сүлжээнд 1-р давхарт холбооны хайрцагт гол өсгүүрийн төхөөрөмжийг (3-аас доошгүй гаралттай) суурилуулан босоо сувагчлалаар 4ш RG 0.9 өндөр давтамжийн коаксиал кабель татаж 1 ба 2-р давхрын салаалагчид холбоно.

3.2 Өсгүүрээс давхар бүрт суурилуулсан салаалагч төхөөрөмжөөр дамжуулан өрөөнүүдийн үүр хүртэл RG 0.5-0.7 маркийн коаксиал кабель суурилуулахаар тус тус төлөвлөв.

4. Галын дохиоллын системийн төлөвлөлт:

4.1 Галын дохиоллын мэдээлэл хүлээн авах станцыг (мэдрэгч холбосон бүс бүрийн гэрлэн дохиотой) төв станцыг 24 цагаар байрлах харуулын байранд хананд суурилуулахаар төлөвлөв. Мөн барилга тус бүрт галын дохиоллын мэдээлэл хүлээн авах дэд станц (20 бүс холбох боломжтой, өөр дээрээ давхар хяналт хийх боломжтой) байрлуулан хооронд нь STP 4x2x0.5 кабелийг харуулын байр руу татна. /Станцуудыг холбох загварыг ХД-6-д харуулав/ Уг гадуур татах кабелийг хотхоны гадна холбооны зургаар хийгдэх сувагчлалаар татна.

4.2 Галын дохиоллын станц нь Хөдөлгөөнт холбооны сүлжээгээр дохиоллын мэдээллийг дамжуулах GSM модулийг дэмждэг станц байна.

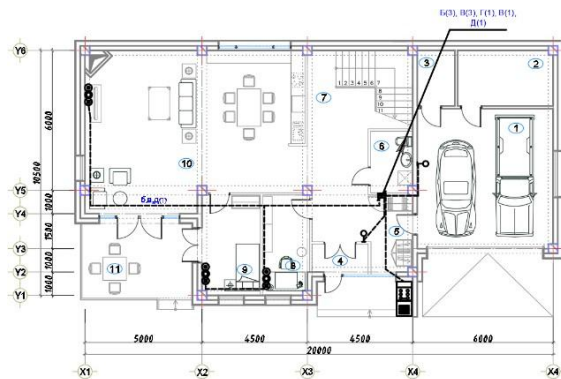
4.3 Дэд станцуудад галын дохиоллын утааны /S/, дулааны /H/ мэдээлэгч, галын гар мэдээлэгчүүдийг 1x4x0.6 маркийн галд тэсвэртэй кабелиар холбохоор, дуут дохиологчийг 1x2x1,5 хөндлөн огтлолтой кабелиар тус тус холбохоор төлөвлөв.

4.4 Галын дохиоллын төв ба дэд станцууд нь үл тасалдах тэжээлийн блокоос тэжээгдэнэ. Үл тасалдах тэжээлийн блок нь өөртөө нөөц батерейтэй байна. Энэ нь цахилгаан эрчим хүч тасарсан үед найдвартай ажиллагааг хангаж ажиллана.

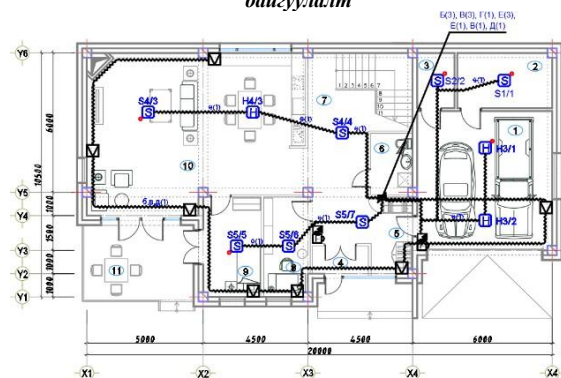
5. Хаалганы цоожны систем: / Домофон /

5.1 Хаалганы дуудлага /Домофон/-ыг 1-р давхарт дуудлагын хяналтын блок, дуудлагын станц, хаалганы электрон цоож, гарах товчлуур /Exit button/ зэргийг гадна хаалганы дотор талд байрлуулна.

5.2 Хаалганы дуудлагын станцаас босоо сувагчлалаар UTP-cat.5e кабель татаж давхар бүрт байрласан дуудлагын аудио- видео системийн дэд болон төв станц хүртэл татаж холбоно.



5-р зураг. А блокын барилгын 1-р давхрын холбооны байгуулалт



6-р зураг. А блокын барилгын 1-р давхрын дохиолол хамгаалалтын байгуулалт

С. Хотхон гадна, дотор, холбоо, дохиоллын ажлын төсөв

Улаанбаатар хот, Хан-Уул дүүрэг, 8-р хороонд баригдах "Шинэ уулзвар" ХХК-ийн амралт сувилалын цогцолборын барилгын гадна холбооны байдлаар төсвийн тооцоог хотхоны ерөнхий төлөвлөгөөний зургийг үндэслэн боловсруулагдсан зураг болон дараах материалуудыг үндэслэн хийв. Үүнд:

Зам, тээвэр, барилга, хот байгуулалтын сайдын 2012 оны 04-р сарын 20-ны өдрийн 110 дугаар тушаалын 5 дугаар хавсралтаар батлагдсан Барилгын холбоожуулалтын ажлын төсвийн суурь норм /БНБД 81-40-04/ Барилгын газрын ажил /БНБД 81-01-06/

1. Зам, тээвэр, барилга хот байгуулалтын сайдын 2012 оны 04-р сарын 20-ны өдрийн 110

дугаар тушаалын 7 дугаар хавсралтаар батлагдсан Холбооны өндөр хурдны, шилэн кабелийн залгааны ажлын хөдөлмөр зарцуулалтын норм /БНБД 83-30-12/, /БНБД 81-31-12

2. ЗТБХБ-ын сайдын 2012 оны 181 дүгээр тушаалаар батлагдсан Төсөв зохиох дүрэм /БНБД 81-95-12/

3. 2009 оны ЗТБХБ-ын сайдын 263 дугаар тушаалын дагуу, тээврийн зардлыг ЗТАЖЯ-ны сайдын 2008 оны 136 дугаар тушаалаар батлагдсан тариф, Механизмын зардлыг ЗТАЖЯ-ны сайдын 2012 оны 18 дугаар тушаалаар батлагдсан “Барилгын машин ашиглалтын нэг машин цагийн жишиг үнэ” /БД 81-112-11/

4. Материалын зардлыг өнөөгийн зах зээл дэхь материалын үнэ, Барилгын мэдээ сэтгүүл дэхь бараа материалын үнийг үндэслэн тооцов. Барилгын материалын бүтээц эдлэлийн үнийн лавлах /БД 81-109-16/II, Барилга.mn сэтгүүлийн үнийг судлан тооцлоо.

Угсралтанд мөрдөгдөх техникийн стандарт нөхцлүүд:

Угсралтын ажлын газар шорооны явцад бусад инженерийн байгууламжийн шугам сүлжээ гэмтэхээс сэргийлж мэргэжлийн байгууллагын ИТА-нуудын хяналтын дор Монгол улсад мөрдөгдөж байгаа доорхи стандартыг баримтлан гүйцэтгэх шаардлагатай.

- Телефон сүлжээний кабелийн худаг.

Техникийн ерөнхий шаардлага  
MNS 5016:2001

- Холбооны худаг сувагчлалын байгууламжийн техникийн үзүүлэлт, суурилуулалтын шаардлага  
MNS 6668:2017

- Телефон сүлжээний сувагчлалд зориулсан хуванцар яндан

MNS 5017:2001

- Холбооны кабелийн суурилуулалт  
MNS 5276:2013

- Барилга, орон сууц, гудамж талбайд тавих хяналтын

камер. Ерөнхий шаардлага

MNS 6523:2014

Барилгын ажил бүрэн дууссаны дараа хотын мэдээллийн санд инженерийн шугам сүлжээний зураг төслийг нэгтгэн өгч баталгаажуулна.

Угсралтын ажлыг холбооны техник, аюулгүй ажиллагааны дүрмийн дагуу ХХЗХорооноос олгогддог тусгай зөвшөөрөлтэй байгууллага, аж ахуйн нэгжээр гүйцэтгүүлэх шаардлагатай.

Холбооны кабелийн угсралтын ажлыг хийж гүйцэтгэхдээ батлагдсан стандарт, технологийн горимыг сайтар баримталж ажиллах ба аюулгүй ажиллагааны дүрэм журмыг нарийн чанд баримталж ажиллах шаардлагатай.

*1-р хүснэгт. Хотхоны гадна холбоо, хяналтын камерын төсвийн товчоо*

Д/Д	Зардлын нэр	Гадна холбоо, хяналтын камерын өртөг /төгрөг/	Тонгс төхөөрөмжийн өртөг /төгрөг/	Бүгд өртөг /төгрөг/
1	Ажиллах хүчний зардал	11 532 471		11 532 471
2	Материал	46 619 142	13 250 000	59 869 142
3	Тээвэр	727 608		727 608
4	Машин ашиглалт	4 386 097		4 386 097
	Шууд зардлын дүн	63 665 318	13 250 000	76 915 318
5	Нэмэгдэл зардал /36.9 %/	2 263 772		2 263 772
6	Ашиг / 15%/	9 889 363		9 889 363
	Барилга угсралтын ажлын дүн	75 818 453	13 250 000	89 068 453
7	НӨАТ 10%	7 581 845		7 581 845
8	Норичлолын сан 0.18%	136 473		136 473
	Дүн	83 536 772	13 250 000	96 786 772
9	Захиалагчийн албаны зардал	1 516 369		1 516 369
10	Инженер хайгуул, зураг төслийн ажлын дүн	-		-
11	Зураг төсөл зохиогчийн хяналтын зардал	758 185		758 185
	Дүн	85 811 325	13 250 000	99 061 325
12	Магадлашгүй ажил 2%	1 516 369		1 516 369
13	Бусад нэмэлт зардал	-		-
	Дүн	87 327 694	13 250 000	100 577 694

*2-р хүснэгт. А блокын дотор холбоо, дохиоллын төсвийн товчоо*

А блок 1 барилга Дотор холбоо, дохиоллын угсралтын ажил

Д/Д	Зардлын нэр	Бүгд өртөг /төгрөг/
1	Ажиллах хүчний зардал	1 533 594
2	Материал	4 151 970
3	Тээвэр	12 136
4	Машин ашиглалт	134 262
	Шууд зардлын дүн	5 831 961
5	Нэмэгдэл зардал /36.9 %/	290 946
6	Ашиг / 15%/	918 436
	Барилга угсралтын ажлын дүн	7 041 343
7	НӨАТ 10%	704 134
8	Норичлолын сан 0.18%	12 674
	Дүн	7 758 152
9	Захиалагчийн албаны зардал	140 827
10	Инженер хайгуул, зураг төслийн ажлын дүн	0
11	Зураг төсөл зохиогчийн хяналтын зардал	70 413
	Дүн	7 969 392
12	Магадлашгүй ажил 2%	140 827
13	Бусад нэмэлт зардал	0
	Дүн	8 110 219

*3-р хүснэгт. Техник, харуулын байрны дотор холбоо, дохиоллын төсвийн товчоо*

Техник, харуулын байр Холбоо, дохиоллын угсралтын ажил

Д/Д	Зардлын нэр	Бүгд өртөг /төгрөг/
1	Ажиллах хүчний зардал	846 658
2	Материал	2 004 697
3	Тээвэр	12 309
4	Машин ашиглалт	90 578
	Шууд зардлын дүн	2 954 242
5	Нэмэгдэл зардал /36.9 %/	160 624
6	Ашиг / 15%/	467 230
	Барилга угсралтын ажлын дүн	3 582 096
7	НӨАТ 10%	358 210
8	Норичлолын сан 0.18%	6 448
	Дүн	3 946 754
9	Захиалагчийн албаны зардал	71 642
10	Инженер хайгуул, зураг төслийн ажлын дүн	0
11	Зураг төсөл зохиогчийн хяналтын зардал	35 821
	Дүн	4 054 216
12	Магадлашгүй ажил 2%	71 642
13	Бусад нэмэлт зардал	0
	Дүн	4 125 858

## ДҮГНЭЛТ

Энэхүү дипломын ажил дээр хувийн орон сууцны хотхоны бүрэн хэмжээний гадна, дотор холбоо, дохиоллын зураг төслийг боловсрууллаа. Зураг төслийг боловсруулахдаа МУ-д даган мөрдөгдөж буй Мэдээлэл холбооны чиглэлийн стандарт болон норм дүрэм журмыг баримтлан хийж гүйцэтгэлээ.

- Хотхоны гадна холбооны төлөвлөлт
- Хотхоны гадна талбайн камержуулалт
- Суурин телефон холбоо
- Интернэтийн сүлжээ
- Кабелийн телевизийн сүлжээ

- Галын ба хамгаалалтын дохиоллын систем
- Хаалганы цоожны системийн зургуудыг Autocad програм дээр
- Нийт зургийн төсөвт өртөгийн тооцоог Estimator pro програм дээр хийж гүйцэтгэлээ.

Энэхүү дипломын ажлын зургаараа хувийн орон сууцны жишиг зураг, төсвийг боловсруулахаар зорилоо цаашид энэ төрлийн барилгын зураг зурахдаа миний зургаас ашиглах боломжтой.

Зураг төслийг гүйцэтгэх явцдаа шинээр батлагдсан болон хуучин мөрдөгдөж байсан стандартуудыг харьцуулан судлаж үзлээ.

Мэдээлэл технологийн салбар маш хурдацтай хөгжиж буй эрин үед МУ-д мөрдөгдөж буй стандарт, норм дүрмүүд байнгын хоцрогдсон байдалтай байна. Энэ нь стандартууд ойр ойрхон шинэчлэгдэж байгаагаар харагдаж байна.

Жишээ нь: Одоогоор Барилга, орон сууц, гудамж талбайд тавих хяналтын камер. Ерөнхий шаардлага MNS 6423 : 2013 стандартын технологийн үзүүлэлтүүд хоцрогдоод байна.

Мөн барилгын холбоо, дохиоллын угсралтын тусгай зөвшөөрлийг цахилгааны угсралттай хамтад нь өгдөг учир цахилгааны ажлыг хийж байгаа компанид холбоо, дохиоллын ажлыг гүйцэтгүүлэхээр өгдөг. Ингэснээр цахилгааны инженерүүд холбооны стандартуудыг сайн мэддэггүй учираас холбооны угсралтын явцад стандартын бус угсралт хийгдэх тохиолдол гардаг.

#### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [9] 2009 оны ЗТБХБ-ын сайдын 263 дугаар тушаалын дагуу, тээврийн зардлыг ЗТАЖЯ-ны сайдын 2008 оны 136 дугаар тушаалаар батлагдсан тариф, Механизмын зардлыг ЗТАЖЯ-ны сайдын 2012 оны 18 дугаар тушаалаар батлагдсан “Барилгын машин ашиглалтын нэг машин цагийн жишиг үнэ” /БД 81-112-11/
- [10] Материалын зардлыг өнөөгийн зах зээл дэхь материалын үнэ, Барилгын мэдээ сэтгүүл дэхь бараа материалын үнийг үндэслэн тооцов. Барилгын материалын бүтээц эдлэлийн үнийн лавлах /БД 81-109-16/II, Барилга.mn сэтгүүлийн үнийг судлан тооцлоо.
- [1] <http://crc.gov.mn/> - Харилцаа холбоо цохицуулах хороо
- [2] <http://new.telecommongolia.mn/>
- [3] Орон сууцны барилгын мэдээлэл, холбооны суурин сүлжээний төлөвлөлт. Ерөнхий шаардлага (MNS 6580 : 2016)
- [4] Барилгын зураг, мэдээлэл холбоо, дохиоллын тоног төхөөрөмжийн тэмдэглэгээ (MNS 5535 : 2016)
- [5] Холбооны худаг сувагчлалын байгууламжийн техникийн үзүүлэлт, суурилуулалтын шаардлага (MNS 6668:2017)
- [6] Барилга, байгууламжийн гал унтраах автомат төхөөрөмж, дохиоллын хэрэгсэл БНБД 21-04-05
- [7] Зам, тээвэр, барилга хот байгуулалтын сайдын 2012 оны 04-р сарын 20-ны өдрийн 110 дугаар тушаалын 7 дугаар хавсралтаар батлагдсан Холбооны өндөр хурдны, шилэн кабелийн залгааны ажлын хөдөлмөр зарцуулалтын норм /БНБД 83-30-12/, /БНБД 81-31-12
- [8] ЗТБХБ-ын сайдын 2012 оны 181 дүгээр тушаалаар батлагдсан Төсөв зохиох дүрэм /БНБД 81-95-12/

# ЗАМЫН ХӨДӨЛГӨӨНИЙ УДИРДЛАГЫН ТӨВИЙН ОПТИК КАБЕЛИЙН СҮЛЖЭЭНИЙ НАЙДВАРТАЙ АЖИЛЛАГААГ САЙЖРУУЛАХ БОЛОМЖИЙН СУДАЛГАА

Даваасамбуугийн ДЭЛГЭРНЯМ<sup>1</sup>, Зундуйн БУЯНХИШИГ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Холбооны инженерчлэлийн  
ТЭНХИМ

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [delgernyam.20@gmail.com](mailto:delgernyam.20@gmail.com)<sup>1</sup>

**Хураангуй:** Техник технологи хурдацтай хөгжиж үүнийг дагаад найдвартай ажиллагаа нэн тэргүүнд тавигддаг болоод байна. Үүний хамгийн том илрэл нь камерын системийн аюулгүй ажиллагаа юм. Замын хөдөлгөөний удирдлагын төв нь авто машины зөрчил илрүүлэх, гэрлэн дохионы найдвартай ажиллагааг хангах үүрэгтэй газар юм. Замын хөдөлгөөний камеруудын найдвартай ажиллагааг хангуулахын тулд хэрхэн зөв төлөвлөх нь чухал юм. Энэхүү өгүүлэлээр Улаанбаатар хотын замын хөдөлгөөний камеруудын оптик кабелийн сүлжээний холболтын одоогийн байдлыг судлан цацраг хэлбэрийн хамгийн найдвар муутай сүлжээний бүтэцтэй байгааг өөрчлөн цагариг хэлбэрийн бүтэцэд шилжүүлэх шийдлийг санал болгов.

**Түлхүүр үг:** хяналтын камер, шилэн кабелийн трасс, сувагчлалын шилэн кабель, агаарын шилэн кабель, цагариг сүлжээ

## I. УДИРТГАЛ

Замын хөдөлгөөний удирдлага, хяналтын систем нь хотын аюулгүй байдал, урсгал зохицуулалтад чухал үүрэгтэй. Эдгээр системүүдийн үндсэн холбооны дэд бүтэц нь өндөр хурд, найдвартай дамжуулалт бүхий оптик кабелийн сүлжээ байдаг.

Гвч бодит нөхцөлд кабелийн гэмтэл, тасалдал (ухалт, механик нөлөө, цаг агаар, тоног төхөөрөмжийн доголдол) байнга үүсч байна. Сүлжээ тасалдах үед замын дохио, камер, хяналтын систем доголдож, хөдөлгөөний аюулгүй байдалд сөргөөр нөлөөлдөг.

Иймд энэхүү өгүүлэлээр Улаанбаатар хотын замын хөдөлгөөний удирдлага хяналтын оптик кабелийн сүлжээний бүтцийг өөрчлөн найдвартай байдлыг нэмэгдүүлэх инженерийн шийдлийг санал болгоно.

## II. УЛААНБААТАР ХОТЫН ЗАМЫН ХЯНАЛТЫН КАМЕРИЙН ТӨЛӨВЛӨЛТИЙН ОДООГИЙН БАЙДАЛ

*A. Замын хөдөлгөөний хяналтын камерийн холболтын шилэн сүлжээний одоогийн байдал*

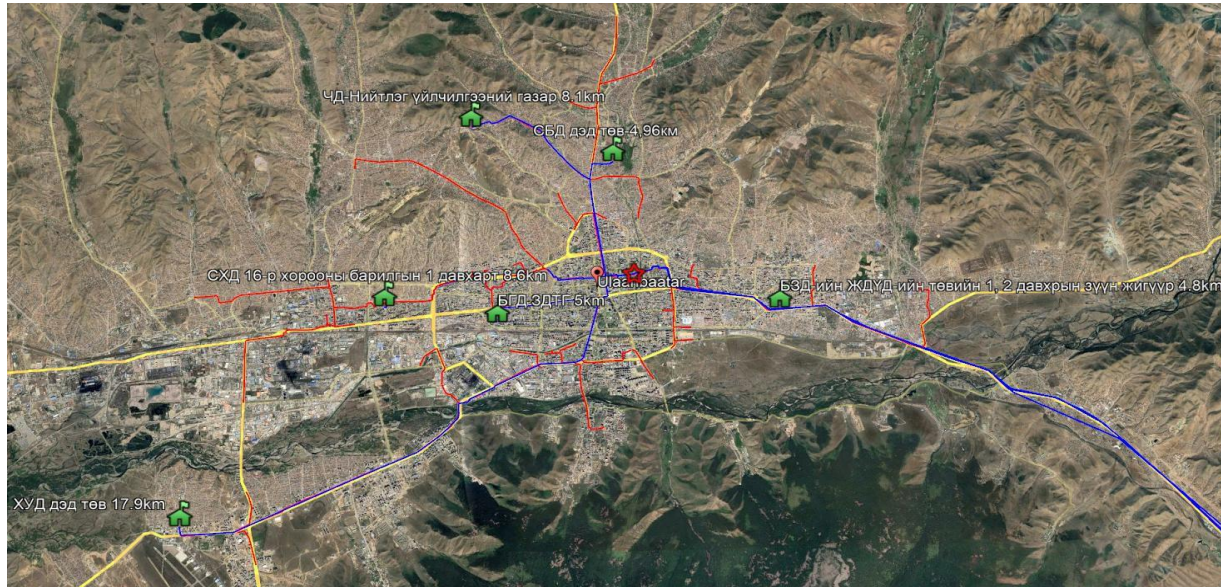
Улаанбаатар хотын замын хөдөлгөөний хяналтын камерууд нь бүрэн шилэн кабелиар холбогдсон байдаг. Уг сүлжээнд нийт 237797 метр шилэн кабель ашиглагдаж байгаагаас сувагчлалаар нийт 209280 метр шилэн кабель, агаараар нийт 26517 метр шилэн кабель суурилагдсан байна.

Улаанбаатар хотын хэмжээнд 6 дүүрэгт нийт 6 дэд төв байдаг ба бүх камерийг хяналтыг нэгтгэж, нэгдсэн 1 хяналтын төвтэй холбон замын хөдөлгөөний хяналтын үйл ажиллагааг зохицуулж байна. Хүснэгт 1-д Улаанбаатар хотын замын

хөдөлгөөний хяналтын камерын сүлжээний шилэн кабелийн судалгааг үзүүлэв.

*1-Р Хүснэгт. Шилэн кабелийн судалгаа*

№	Шилэн кабелийн төрөл	Корын тоо	Хэмжих нэгж	Тоо хэмжээ
1	Сувагчлалын шилэн кабель	96	метр	15261
2	Сувагчлалын шилэн кабель	48	метр	30019
3	Сувагчлалын шилэн кабель	24	метр	21000
4	Сувагчлалын шилэн кабель	12	метр	16000
5	Сувагчлалын шилэн кабель	8	метр	7500
6	Сувагчлалын шилэн кабель	4	метр	67500
7	Сувагчлалын шилэн кабель	2	метр	52000
	Агаарын шилэн кабель	24	метр	5430
8	Агаарын шилэн кабель	12	метр	1160
9	Агаарын шилэн кабель	8	метр	1227
10	Агаарын шилэн кабель	4	метр	2200
11	Агаарын шилэн кабель	2	метр	16500



1-р зураг. Шилэн кабелийн трассын тархалт

### В. Улаанбаатар хотын замын хөдөлгөөний хяналтын камерийн шилэн кабелийн трассын судалгаа

2010 оноос Улаанбаатар хотын замын хөдөлгөөний хяналтын камерт шилэн кабелийг ашиглаж эхэлсэн. Үүнээс хойш замын хөдөлгөөний хяналтын шилэн кабелийг зөвхөн цацраг хэлбэрээр олон удаа өргөтгөж, замын уулзвар бүрийг хянах зорилт тавин шилэн кабельд холбогдох хяналтын камерын тоог ихэсгэхэд анхаарч ирсэн байна. Харин сүлжээний найдвартай байдалд анхаарал хандуулах нь сул байжээ.

Зураг 1-д шилэн кабелийн трассын тархалтыг үзүүлсэн бөгөөд цэнхэрээр тэмдэглэсэн нь 2023, 2024 онд өргөтгөж шинээр татсан шилэн кабель, улаанаар тэмдэглэсэн нь 2010 оноос хойш суурилагдсан шилэн кабелийн трассын маршрут юм.

Замын хөдөлгөөний хяналтын камерууд нь замын хөдөлгөөний хяналтын төвтэйгээ цацраг хэлбэрийн сүлжээгээр холбогдсон байна. Иймээс аль нэг чиглэлд шилэн кабель гэмтэхэд тухайн чиглэлийн бүх камерууд мэдээллээ илгээх боломжгүй болж уулзваруудын замын хөдөлгөөний ачааллыг хянан зохицуулахад хүндрэл үүсч байна.

### III. ХЯНАЛТЫН КАМЕРИЙН ШИЛЭН КАБЕЛИЙН ТАРХАЛТЫН СУДАЛГАА

Зургаан дэд төв хоорондоо шилэн кабелиар холбогдож үндсэн нэг хяналтын төв дээр бүх камерын мэдээлэл очдог.

Замын хөдөлгөөний камерын холболтыг шилэн кабелиар шийдэх нь хамгийн найдвартай төлөвлөлт юм. Гэвч Улаанбаатар хотын сувагчлалын хүртээмжгүй байдал, инженерийн шугам сүлжээний замбараагүй төлөвлөлтөөс болж шилэн кабелийг агаараар татах тохиолдол байна.

Улаанбаатар хотын холбооны сувагчлалын байгууламж, замбараагүй хэрэглээнээс болж зарим сувагчлалууд дүүрсэн, мөн барилгын ажил болон зохион байгуулалтгүй инженерийн шугам сүлжээнээс болж гэмтсэн гэх мэт асуудлаас болоод зарим холболтыг сувагчлалаар явуулах боломжгүй байдал үүсдэг. Гэвч хамгийн эрсдэл багатай шилэн кабель татах арга бол сувагчлалаар татах юм. Зураг 2-т Улаанбаатар хотын замын хөдөлгөөний хяналтын камерын шилэн кабелийн сувагчлалын тархалтын одоогийн байдлыг үзүүлэв. Сувагчлал нь хотын зах уруу байхгүй зөвхөн хотын төв хэсэгт ашиглагдаж байна. Гэвч сувагчлалаар шинээр нэмэлт шилэн кабель татахад хүндрэлтэй, сувагчлал дүүрсэн газрууд олон байна.

Гэр хороололд худаг сувагчлал байхгүй учир шилэн кабелийг агаараар татахаас өөр аргагүй. Үүний тулд гэрэл, цахилгааны шон ашиглах байдал их байна. Энэ нь шилэн кабелийг эрсдэлд оруулж байна. Иймд агаараар татах шаардлага гарвал зориулалтын агаарын баганыг ашиглах шаардлагатай байдаг. Зураг 3-т гэр хорооллын агаарын шилэн кабелийн сүлжээг оролцуулсан замын хөдөлгөөний шилэн кабелийн сүлжээний бүтэц, түүнд ашиглагдаж буй шилэн кабелийн бүрэн өгөгдлийг агуулсан сүлжээний зураглалыг үзүүлэв.



Худаг сувагчлалын хүртээмж болон камерын цэг хоорондын уялдаа холбоо байхгүйгээс болж агаарын кабель ашиглаж байна.

Улаанбаатар хот нь Монголын хамгийн өндөр интернет хэрэглээтэй бүс бөгөөд ихэвчлэн FTTH технологи өргөн ашиглаж байна. 5G туршилт хийгдэж эхэлсэн. Холболтын хурдны хувьд хотын төв болон орон сууц гэр хороолол гэх мэт бүсүүдээр эрс ялгаатай байдалтай байна /Хүснэгт 2/.

2-Р Хүснэгт. Дэд бүтцийн ялгаа

Бүс	FTTH хүртээмж	Дундаж хурд
Хотын төв	90-100%	100-1000 Mbps
Орон сууцны хороолол	70-90%	50-200 Mbps
Гэр хороолол	20-50%	5-50 Mbps

#### IV. Одоогийн оптик кабелийн сүлжээний дутагдалтай талууд

Улаанбаатар хотын замын хөдөлгөөний хяналтын оптик кабелийн сүлжээг судалж үзэхэд дараах дутагтай зүйлүүд илэрч байна. Үүнд:

- ✓ Хяналтын камерууд нь замын хөдөлгөөний хяналтын төвтэйгээ цацраг хэлбэрийн сүлжээгээр холбогдсон байна.
- ✓ Нэг чиглэлд шилэн кабель гэмтэхэд тухайн чиглэлийн бүх камерууд хяналт хийх боломжгүй болно.
- ✓ Агаарын шилэн кабель нь механик гэмтэлд өртөмтгий, тасрах магадлал их /Зураг 4а/.
- ✓ Одоогийн сувагчлалаар нэмэлт шилэн кабель шинээр татах боломжгүй /Зураг 4б/.



4а-р зураг. Агаараар суурилуулсан шилэн кабелийн дутагдал



4б-р зураг. Сувагчлалаар суурилуулсан шилэн кабелийн дутагдал

#### V. Сайжруулах арга замууд ба хэлэлцүүлэг

Улаанбаатар хотын замын хөдөлгөөний хяналтын оптик кабелийн сүлжээний найдвартай байдлыг дээшлүүлэх дараах арга замыг санал болгож байна. Үүнд:

- ❖ Сүлжээний бүтцийг баруун, зүүн, урд, хойд чиглэлийн 4 цагариг бүтэцтэй болгох
- ❖ Цагариг үүсгэх нэмэлт замуудыг тодорхойлон түүнд шаардагдах шилэн кабелийн байгуулалтын хөрөнгө оруулалтын тооцоог хийх
- ❖ Цагариг бүтцээр холбогдсон камерууд нь мэдээллээ үндсэн ба нөөц гэсэн 2 замаар замын хөдөлгөөний төв рүү дамжуулах боломжтой болгох, камеруудын оролт дээр тавих идэвхгүй оптик салаалагчийн шийдлийг зохиох
- ❖ Шилэн кабелийн трассын одоогийн төлөвлөлтийг оновчлон сайжруулах, камеруудыг цагариг зам дээр цуваа холболтонд оруулж шилэн шөрмөсийн ашиглалтыг сайжруулах.
- ❖ Агаарын шилэн кабелийг аль болох сувагчлал руу шилжүүлэх.
- ❖ Чухал байршлуудыг тодорхойлж, уг байршилд орчин үеийн дэвшилтэт камерууд суурилуулах

#### Дүгнэлт

Замын хөдөлгөөний камерын хяналтын нэгдсэн системийг төлөвлөхдөө хотын инженерийн шугам сүлжээтэй уялдуулж, худаг сувагчлалаар шилэн кабель ашиглан цагариг хэлбэрийн сүлжээ үүсгэн төлөвлөх нь хамгийн найдвартай төлөвлөлт юм.

Замын хөдөлгөөний хяналтын камерын оптик сүлжээний бүтцийг цагариг хэлбэрт оруулснаар замын хөдөлгөөний хяналтын камерын тасралтгүй байдлыг дээшлүүлнэ.

Мөн шилэн кабелийн сүлжээ, ялангуяа шилэн шөрмөсийн ашиглалтыг оновчилсноор нэмэлтээр шинээр шилэн кабель татахад худаг сувагчлалын ашиглалтын хүндрэлтэй болон үргүй зардлыг хэмнэх сайн талтай болно.

Зайлшгүй шаардлагатай гэр хороолол орчимд агаарын кабель татах нь зөв шийдэл боловч хотын төвд аль болох худаг сувагчлал ашиглаж төлөвлөх нь зүйтэй юм.

Мөн камер хоорондын холболтыг үндсэн нэг кабелиас салбарлаж цөөн кабель ашиглах нь зөв төлөвлөлт юм.

#### **АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ**

- [1] [1] Замын хөдөлгөөний удирдлага хяналтын төвийн тайлан, Улаанбаатар хот, 2025
- [2] Ц.Төмөрбаатар, Г. Хишигжаргал “Ухаалаг хотын нэгдсэн сүлжээг зохион байгуулах боломжийн судалгаа” Улаанбаатар, 2018.
- [3] У.Гэрэлт, А. Эрдэнэтуяа “Гэрлэн дохионы ухаалаг удирдлагын системийн судалгаа” Улаанбаатар, 2021.
- [4] [www.icn.mn](http://www.icn.mn)

## 5G СҮЛЖЭЭНД ДАХИН ТОХИРУУЛАГДАХ УХААЛАГ ОЙЛГОГЧ ГАДАРГУУГИЙН СУДАЛГАА

Мөнхжаргалын ЭНХЗОРИГ<sup>1</sup>, Баярсайханы ПҮРЭВЦЭРЭН<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл холбоо технологийн сургууль, Холбооны инженерчлэлийн тэнхим

*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: enxzorig@gmail.com<sup>1</sup>*

**Хураангуй:** Дахин тохируулдаг ухаалаг ойлгогч гадаргуу Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) нь 5G-Advanced болон 6G сүлжээний хүрээнд хамгийн идэвхтэй судлагдаж буй технологийн нэг бөгөөд олон тооны программчлагдах нэгж элемент (programmable unit cell) бүхий мета-гадаргуу (metasurface)-аар дамжуулан ирж буй цахилгаан соронзон долгионы фаз (phase), зарим тохиолдолд амплитуд (amplitude) болон туйлшрал (polarization)-ыг удирдаж, долгионы тархалтыг хүссэн чиглэлд өөрчлөх боломж олгодог. Иймээс RIS нь шууд харагдах шугамгүй нөхцөл (Non-Line-of-Sight, NLoS)-д холбоос сэргээх, хамрах хүрээний завсар (coverage hole) бууруулах, интерференцийг бууруулах (interference mitigation), эрчим хүчний үр ашиг (energy efficiency) сайжруулах зэрэг хэрэглээнд өндөр ач холбогдолтой. RIS-ийн дараагийн үеийн судалгаанд нэвтрүүлэлт ба ойлтыг нэгэн зэрэг удирдах боломжтой RIS (STAR-RIS), идэвхтэй RIS (active RIS), хосолмол RIS (hybrid RIS), мэдрэхүй ба холбооны нэгдэл (sensing-communication integration), байршил тогтоолт (localization), хиймэл оюунд суурилсан дасан зохицох удирдлага (AI-based adaptive control) зэрэг чиглэлүүд давамгайл хөгжиж байна. Ялангуяа STAR-RIS нь дохионы нэвтрүүлэлт (transmission) болон ойлт (reflection)-ыг зэрэг удирдах боломжтой тул хамрах хүрээний хэлбэржүүлэлт (coverage shaping)-ийн хувьд илүү уян хатан шийдэл гэж үзэгдэж байна. Мөн машин сургалт (machine learning) болон бэхжүүлэн сургалт (reinforcement learning)-д тулгуурласан фазын төлөв сонголт (phase selection), кодын номын оновчлол (codebook optimization), хэрэглэгчийн мөрдөх удирдлага (user tracking), орчны нөхцөлд суурилсан удирдлага (environment-aware control) чиглэлийн судалгаа эрчимтэй өсөж байна. Энэ нь RIS-ийг бодит орчинд нэвтрүүлэх үед бодит хугацааны дасан зохицох (real-time adaptation) зайлшгүй шаардлагатай болсонтой холбоотой.

*Түлхүүр үг:* *Мета-гадаргуу (Metasurface), Программчлагдах утасгүй орчин (Programmable Wireless Environment),*

*Фазын шилжилт (Phase Shift), Цацраг хэлбэржүүлэлт (Beamforming), Сүвгийн загварчлал (Channel Modeling), Хамрах хүрээний сайжруулалт (Coverage Enhancement), Интерференцийн удирдлага (Interference Management), Эрчим хүчний үр ашиг (Energy Efficiency), Шууд харагдах шугамгүй нөхцөл (Non-Line-of-Sight NLoS)*

### I. УДИРТГАЛ

Дахин тохируулдаг ухаалаг ойлгогч гадаргуу Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) нь 5G-Advanced болон 6G сүлжээний хүрээнд хамгийн идэвхтэй судлагдаж буй технологийн нэг бөгөөд олон тооны программчлагдах нэгж элемент (programmable unit cell) бүхий мета-гадаргуу (metasurface)-аар дамжуулан ирж буй цахилгаан соронзон долгионы фаз (phase), зарим тохиолдолд амплитуд (amplitude) болон туйлшрал (polarization)-ыг удирдаж, долгионы тархалтыг хүссэн чиглэлд өөрчлөх боломж олгодог. Иймээс RIS нь шууд харагдах шугамгүй нөхцөл (Non-Line-of-Sight, NLoS)-д холбоос сэргээх, хамрах хүрээний завсар (coverage hole) бууруулах, интерференцийг бууруулах (interference mitigation), эрчим хүчний үр ашиг (energy efficiency) сайжруулах зэрэг хэрэглээнд өндөр ач холбогдолтой. RIS-ийн дараагийн үеийн

судалгаанд нэвтрүүлэлт ба ойлтыг нэгэн зэрэг удирдах боломжтой RIS (STAR-RIS), идэвхтэй RIS (active RIS), хосолмол RIS (hybrid RIS), мэдрэхүй ба холбооны нэгдэл (sensing-communication integration), байршил тогтоолт (localization), хиймэл оюунд суурилсан дасан зохицох удирдлага (AI-based adaptive control) зэрэг чиглэлүүд давамгайл хөгжиж байна. Ялангуяа STAR-RIS нь дохионы нэвтрүүлэлт (transmission) болон ойлт (reflection)-ыг зэрэг удирдах боломжтой тул хамрах хүрээний хэлбэржүүлэлт (coverage shaping)-ийн хувьд илүү уян хатан шийдэл гэж үзэж байна.

Мөн машин сургалт (machine learning) болон бэхжүүлэн сургалт (reinforcement learning)-д тулгуурласан фазын төлөв сонголт (phase selection), кодын номын оновчлол (codebook optimization), хэрэглэгчийн мөрдөх удирдлага (user tracking), орчны нөхцөлд суурилсан удирдлага (environment-

aware control) чиглэлийн судалгаа эрчимтэй өсөж байна. Энэ нь RIS-ийг бодит орчинд нэвтрүүлэх үед бодит хугацааны дасан зохицол (real-time adaptation) зайлшгүй шаардлагатай болсон.

## II. СУДЛАГДСАН СУДАЛГААНЫ ТОЙМ

Emil Björnson болон түүний хамтран зохиогчид болох Henk Wymeersch, Elisabeth de Carvalho, Luca Sanguinetti нарын судалгааны бүтээлүүдэд Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) технологийг сигнал боловсруулалтын үүднээс өргөн хүрээнд авч үзэж, түүний хэрэглээг зөвхөн харилцаа холбооны системээр хязгаарлахгүйгээр байршил тогтоолт, утасгүй эрчим хүч дамжуулалт зэрэг олон чиглэлд тэлэх боломжтойг онцолсон байдаг. Эдгээр судалгаанд RIS-ийг энгийн идэвхгүй ойлгогч гадаргуу бус, харин радио долгионы тархалтын орчныг ухаалгаар удирдах, олон үйлдэлт зориулалтаар ашиглах боломжтой технологийн платформ гэж үзсэн нь энэ чиглэлийн судалгааны онолын хүрээ, хэрэглээний цар хүрээг мэдэгдэхүйц өргөжүүлсэн юм.

RIS-ийн системийн онол, оновчлол, ойрын ба хол тархалтын нөхцөл, кодын номын зохиомж, цацрагийн сургалт, мөн маш их хэмжээний элементтэй RIS-ийн чиглэлээр Linglong Dai, Cunhua Pan, Wei Liu, Shi Jin, Jun Wang, Yong Zeng, Chong Huang, Yijie Mao, Chongwen Huang зэрэг Хятад болон Европын судлаачид идэвхтэй ажиллаж ирсэн бөгөөд 2024 оны өргөн хүрээний тойм судалгаанд тодорхой тусгагдсан байна.

RIS-ийн төхөөрөмжийн зохиомж, хэрэгжилт, практик загварчлалын чиглэлд A. Araghi болон түүний хамтран ажиллагчдын 6 ГГц-ээс доош давтамжийн муж дахь бодит хэрэгжилтийн судалгаа онцгой байр суурь эзэлдэг. Энэ төрлийн ажил нь RIS-ийг зөвхөн математикийн идеалчилсан загварын түвшинд бус, харин үйлдвэрлэл, нэгж элементийн хариу үйлдэл, ойлтын шинж төлөв, бодит орчин дахь байршуулалт зэрэг инженерийн олон хүчин зүйлтэй уялдсан бодит төхөөрөмжийн түвшинд авч үзэх шаардлагатайг харуулсан. Мөн практик чиглэлийн тойм судалгаа болон бодит орчны туршилтын өгүүлүүдэд RIS-ийн бодит хэрэгжилтэд төхөөрөмжийн алдагдал, дискрет фазын удирдлага, элементийн хийц, байршуулалтын геометр зэрэг үзүүлэлтүүд шийдвэрлэх нөлөөтэй болохыг онцлон тэмдэглэсэн нь уг технологийн үр ашгийг зөв үнэлэхэд онолын загварчлалыг инженерийн хэрэгжилттэй нягт уялдуулах шаардлагатайг илтгэж байна.

X.Pei болон түүний хамтрагчид дахин тохируулдаг ухаалаг ойлгогч гадаргуугийн туршилтын загвар, дасан зохицох цацраг хэлбэржүүлэлт, дотоод болон гадаад орчны бодит туршилтын чиглэлээр хамгийн өргөн ишлэгддэг ажлуудын нэгийг гүйцэтгэсэн байдаг. Тэдний 5.8

ГГц орчим давтамжийн мужид хэрэгжүүлсэн туршилтын загварт тулгуурласан судалгаа нь шууд харагдах шугамгүй нөхцөлд хүлээн авах дохионы чадлын өсөлт, холбоосыг сэргээх боломж, бага чадлын нөхцөлд цацрагийг удирдах боломжийг бодитоор харуулсан тул RIS технологийн практик хэрэгжих чадварыг нотолсон судалгааны нэг гэж үздэг.

5G сүлжээнд RIS технологийг бодит нөхцөлд туршсан судлаачдын дунд Y. Yuan болон хамтран зохиогчид, мөн H. Yang болон хамтран ажиллагчид онцгой байр суурь эзэлж байна. Тухайлбал, 2024 онд нийтлэгдсэн бодит орчны туршилтын өгүүлэлд статистикт суурилсан оновчлол ашигласан RIS нь 5G арилжааны сүлжээнд хүлээн авах дохионы түвшин, дохио-интерференц-шуугианы харьцаа, түүнчлэн MAC түвшний дамжуулах чадварыг сайжруулсан болохыг тайлагнасан байна. Үүний зэрэгцээ өөр нэг арилжааны орчны туршилтын судалгаа нь FR2 буюу миллиметрийн долгионы мужид хамрах хүрээний хязгаарлалтыг бууруулах боломжтойг харуулсан. Эдгээр судалгааны бүтээлүүд нь RIS технологи зөвхөн судалгааны туршилтын загварын түвшинд бус, харин бодит операторын сүлжээнд нэвтрэх шатандаа ойртож байгааг тодорхой нотолж байна.

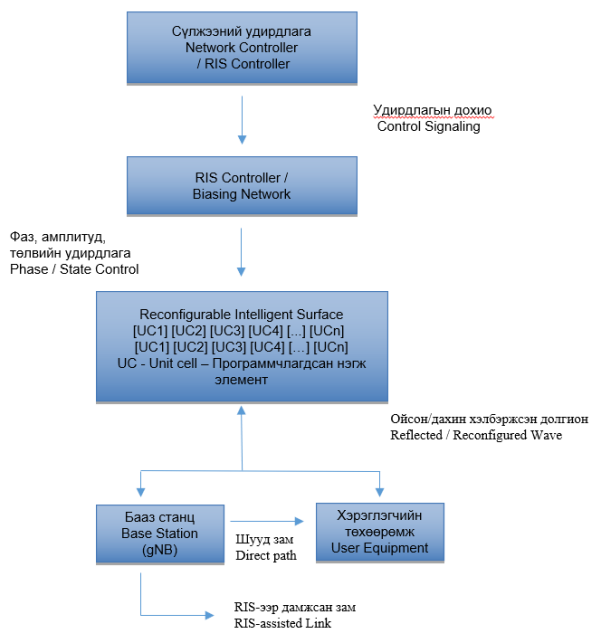
RIS-ийн дараагийн үеийн хөгжилд нэвтрүүлэлт ба ойлтыг нэгэн зэрэг удирдах RIS (STAR-RIS), идэвхтэй RIS (active RIS), диагональ бус бүтэцтэй RIS (beyond-diagonal RIS), мөн хиймэл оюун, машин сургалтад түшиглэсэн RIS удирдлага (AI/ML-assisted RIS control) зэрэг чиглэлүүд 2025 оноос хойш илүү эрчимтэй хөгжиж байна. Ялангуяа STAR-RIS болон beyond-diagonal RIS-ийн тойм болон сургалтын шинжтэй бүтээлүүдэд дохионы нэвтрүүлэлт (transmission) болон ойлт (reflection)-ыг зэрэг удирдах, диагональ бус холболтын бүтэц (coupling structure) ашиглах, мөн харилцаа холбоо ба мэдрэхүй (communication and sensing)-г хамтад нь оновчлох боломжийг онцлон авч үзсэн байна. Түүнчлэн идэвхтэй RIS-ийн талаархи өргөн хүрээний тойм өгүүлүүдэд өсгөлт хийх чадвартай RIS архитектур нь тодорхой нөхцөлд идэвхгүй RIS-ийн холбоосын тэнцвэрийн хязгаарлалт (link-budget limitation)-ыг даван туулах боломжтойг хэлэлцсэн нь энэ чиглэлийн инженерийн ач холбогдлыг улам нэмэгдүүлж байна.

Үүний зэрэгцээ машин сургалтад суурилсан RIS (machine learning-based RIS), бэхжүүлэн сургалтад суурилсан дасан зохицох удирдлага (reinforcement learning-based adaptive control), юмсын интернэтэд чиглэсэн RIS оновчлол (IoT-oriented RIS optimization)-ын чиглэлээр ажиллаж буй судлаачдын бүлэг хурдацтай өргөжиж байна.

## III. ТЕХНОЛОГИЙН ЕРӨНХИЙ АРХИТЕКТУР

RIS технологийн ерөнхий архитектур нь суурь станц, RIS гадаргуу, RIS controller, сүлжээний

удирдлагын хэсэг, хэрэглэгчийн төхөөрөмж гэсэн үндсэн бүрэлдэхүүнээс тогтоно. Энд RIS нь олон тооны программчлагдах нэгж элемент бүхий мета-гадаргуу хэлбэрээр ажиллаж, ирж буй долгионы фаз болон ойлтын төлөвийг удирдах замаар дохионы тархалтыг дахин хэлбэржүүлж, хамрах хүрээ сайжруулах, NLoS холбоос сэргээх, интерференц бууруулах боломжийг бүрдүүлдэг.



Зураг 1. RIS-ийн схем

Бааз станц:

Энэ нь 5G/6G сүлжээний Base Station (gNB) бөгөөд дохиог дамжуулах үндсэн үүрэгтэй. Хэрэглэгчтэй шууд холбоо тогтоохоос гадна RIS рүү дохио илгээж болно.

RIS буюу дахин тохируулдаг ухаалаг ойлгогч гадаргуу:

RIS нь олон тооны нэгж элемент (unit cell)-ээс бүрдсэн programmable metasurface юм. Эдгээр элементүүд нь ирж буй цахилгаан соронзон долгионы:

- фаз
- амплитуд
- зарим тохиолдолд туйлшрал

зэрэг үзүүлэлтийг өөрчилж, дохиог хүссэн чиглэл рүү ойлгоно эсвэл дахин хэлбэржүүлнэ.

RIS Controller:

RIS controller нь гадаргуугийн нэгж элемент бүрийн төлөвийг удирдана. Өөрөөр хэлбэл аль элемент ямар phase shift-тэй ажиллахыг тохируулна.

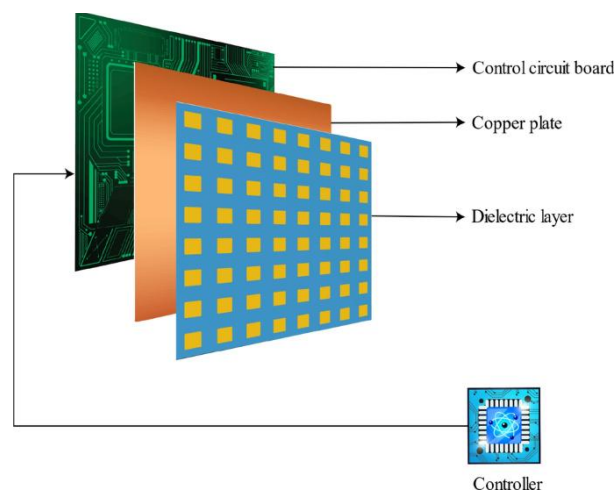
Сүлжээний удирдлагын хэсэг:

Энэ хэсэг нь RIS-ийн ажиллагааг сүлжээний зорилготой уялдуулж удирдана. Жишээлбэл:

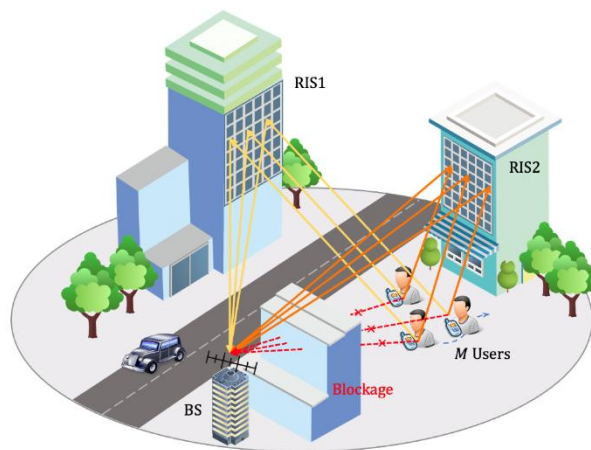
- Хамрах хүрээ нэмэх
- Харилцан нөлөөлөл бууруулах
- Цацрагийн чиглэл удирдлага
- Үүрийн захын хэрэглэгчийг дэмжих зэрэг зорилгоор RIS-д удирдлагын команд өгнө.

Хэрэглэгчийн төхөөрөмж:

Гар утас, модем, IoT төхөөрөмж зэрэг User Equipment (UE) нь RIS-ээр ойлгогдсон дохиог хүлээн авч, NLoS нөхцөлд ч холболт сайжрах боломжтой болдог.



Зураг 2. RIS-ийн бүтэц



Зураг 3. RIS ашиглах

#### IV. МОНГОЛ УЛСАД RIS-ИЙГ СУДЛАХ БОЛОМЖИЙН СУДАЛГАА

Монгол Улсын нөхцөлд RIS технологийн судалгааг эхний ээлжид хотын нягтаршил өндөр, барилга байгууламжийн халхлалт ихтэй орчинд хамрах хүрээний өргөтгөлийн хэрэглээний хувилбар байдлаар эхлүүлэх нь илүү оновчтой гэж үзэж болно.

Ялангуяа оффисын коридор, дотоод орчны сул хамрах хүрээтэй цэгүүд, мөн гаднаас дотор чиглэлийн нэвтрэлт муутай байршлуудад бага оврын бодит туршилт хийх нь инженерийн хувьд ач холбогдолтой бөгөөд шууд хэмжигдэхүйц үр дүн өгөх боломжтой. Судалгааны дараагийн шатанд 5G NR-ийн 6 ГГц-ээс доош давтамжийн мужид RIS-ийн нөлөөг хүлээн авсан лавлах дохионы чадал (RSRP), дохио-интерференц-шуугианы харьцаа (SINR), дамжуулах чадал (throughput), саатал (latency), пакет алдагдал (packet loss) зэрэг үндсэн үзүүлэлтээр харьцуулан үнэлэх туршилт хийх боломжтой. Харин миллиметрийн долгионы муж буюу FR2 орчинд турших нөхцөл бүрдвэл саадлалт их мэдрэмтгий орчин дахь хамрах хүрээг сэргээх үр нөлөөг илүү тодорхой, оновчтой байдлаар судлах боломж нээгдэнэ.

### ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны үр дүнгээс үзэхэд дахин тохируулгатай ухаалаг ойлгогч гадаргуу (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) технологи нь радио долгионы тархалтын орчныг программчлагдах байдлаар удирдах замаар утасгүй холбооны сүлжээний хамрах хүрээ, дохионы чанар, өгөгдөл дамжуулах чадвар, интерференцийн удирдлага, эрчим хүчний үр ашгийг сайжруулах өндөр чадамжтай болох нь тогтоогдож байна. Ялангуяа шууд харагдах шугамгүй орчин, саадтай тархалтын нөхцөл, хамрах хүрээний завсар, эсийн захын хэрэглэгчийн гүйцэтгэлийн бууралт зэрэг 5G, 5G-Advanced болон цаашдын 6G сүлжээнд түгээмэл тулгарч буй асуудлыг бууруулах инженерийн шинэ шийдэл болох боломжтой бөгөөд 2020 оноос хойш олон улсын эрдэм шинжилгээний хурлууд, тойм өгүүлэл, сургалтын шинжтэй бүтээл, диссертаци, туршилтын загвар, бодит сүлжээний туршилтын түвшинд эрчимтэй хөгжиж буй нь энэ чиглэл онолын судалгаанаас практик хэрэглээ рүү шилжиж байгааг харуулж байна. Иймээс цаашид RIS технологийг стандартчилалд нийцсэн хийц, байршуулалтын оновчтой төлөвлөлт, хиймэл оюунд суурилсан

удирдлага, хэмжилтэд тулгуурласан сувгийн загварчлал, мэдрэхүй ба холбооны нэгдсэн системийн хүрээнд гүнзгийрүүлэн судлах шаардлагатай байна.

### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] E. Björnson, Ö. Özdogan, and E. G. Larsson, "Reconfigurable Intelligent Surfaces: A Signal Processing Perspective With Wireless Applications," 2021.
- [2] M. A. ElMossallamy et al., "Reconfigurable Intelligent Surfaces for Wireless Communications: Principles, Challenges, and Opportunities," 2020.
- [3] S. Hassouna et al., "A Survey on Reconfigurable Intelligent Surfaces: Wireless Communication Perspective," 2023.
- [4] M. Dajer et al., "Reconfigurable Intelligent Surface: Design the Channel," 2020.
- [5] M. Jian et al., "Reconfigurable Intelligent Surfaces for Wireless Communications: Overview of Hardware Designs, Channel Models, and Estimation Techniques," 2022.
- [6] E. Basar and H. V. Poor, "Present and Future of Reconfigurable Intelligent Surface-Empowered Communications," 2021.
- [7] A. Araghi et al., "Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) in the Sub-6 GHz Band: Design, Implementation, and Real-World Demonstration," IEEE Access, 2022.
- [8] X. Pei et al., "RIS-Aided Wireless Communications: Prototyping, Adaptive Beamforming, and Indoor/Outdoor Field Trials," 2021/2022.
- [9] P. Zheng et al., "Field Trial Measurement and Channel Modeling for Reconfigurable Intelligent Surface," 2023.
- [10] Y. Yuan et al., "Field Trial of Reconfigurable Intelligent Surface with Statistics-Based Optimization for 5G Commercial Networks," 2024.

# МАШИН СУРГАЛТАД СУУРИЛСАН УТАСГҮЙ СҮЛЖЭЭНИЙ ХАЛДЛАГА ИЛРҮҮЛЭХ СИСТЕМ ИЙН СУДАЛГАА

Нэргүйн ШҮРЭНЦЭЦЭГ<sup>1</sup>, Ямхины ДАШДОРЖ<sup>2</sup> Чулууны ЭРДЭНЭБАТ<sup>2</sup>

<sup>1,2,3</sup> Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Кибер аюулгүй байдлын ТЭНХИМ

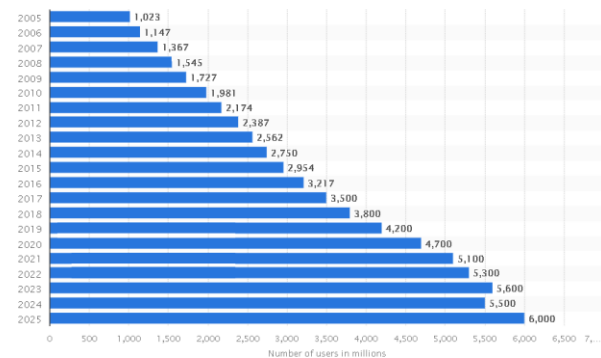
*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: shurshuree959@gmail.com<sup>1</sup>*

**Хураангуй:** Утасгүй сүлжээ нь нисгэгчгүй нисэх төхөөрөмж (UAV), IoT систем болон ухаалаг хотын дэд бүтцэд өргөн хэрэглэгдэж байгаа боловч нээлттэй дамжуулах орчин, хөдөлгөөнт топологи болон төвлөрсөн бус бүтэц зэргээс шалтгаалан кибер халдлагад өртөх эрсдэл өндөр байдаг. Ялангуяа Blackhole, Wormhole, Sybil болон Flooding зэрэг халдлагууд нь сүлжээний урсгалыг тасалдуулах, маршрутын мэдээллийг гажуудуулах, сүлжээний нөөцийг шавхах зэрэг сөрөг нөлөө үзүүлдэг. Энэхүү судалгаанд утасгүй сүлжээний халдлагыг илрүүлэх машин сургалтад суурилсан intrusion detection system (IDS)-ийн загварыг боловсруулж, UAVIDS-2025 өгөгдлийн сан дээр туршиж. Өгөгдөлд data preprocessing хийсний дараа Logistic Regression, K-Nearest Neighbor, Decision Tree, Random Forest болон Support Vector Machine алгоритмуудыг ашиглан ангиллын загваруудыг сургаж, accuracy, precision, recall, F1-score болон confusion matrix үзүүлэлтүүдээр үнэлэв. Туршилтын үр дүнгээс Random Forest алгоритм хамгийн өндөр гүйцэтгэл үзүүлж, олон ангилалт халдлагыг илрүүлэхэд илүү тогтвортой, үр ашигтай болох нь тогтоогдсон. Судалгааны үр дүн нь машин сургалтад суурилсан IDS систем нь утасгүй сүлжээний аюулгүй байдлыг сайжруулах боломжтойг харуулж байна.

**Түлхүүр үг:** утасгүй сүлжээний халдлага, өгөгдлийн сангийн шинэжилгээ, машин сургалтын алгоритм, сүлжээний аюулгүй байдал, халдлага илрүүлэлт

## I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд утасгүй сүлжээ (Wireless Networks) нь IoT систем, ухаалаг хот, аж үйлдвэрийн автоматжуулалт, нисгэгчгүй төхөөрөмжүүд (UAV), ухаалаг гэр зэрэг олон салбарт өргөн хэрэглэгдэх болсон. Утасгүй сүлжээ нь хөдөлгөөнт байдал, уян хатан холболт, хурдан суурилуулалт зэрэг давуу талтай боловч нээлттэй радио сувгаар мэдээлэл дамжуулдаг тул олон төрлийн аюулгүй байдлын эрсдэлтэй байдаг [7].



1-р зураг. Утасгүй сүлжээний хэрэглэгчдийн өсөлт [16]

Утасгүй сүлжээний орчинд зангилаанууд нь ихэвчлэн хязгаарлагдмал тооцоолох чадал болон энергийн нөөцтэй байдаг тул уламжлалт хамгаалалтын механизм бүрэн хэрэгжүүлэхэд хүндрэлтэй байдаг. Үүнээс шалтгаалан утасгүй мэдрэгчийн сүлжээ болон ad-hoc сүлжээ нь төрөл бүрийн кибер халдлагад өртөх магадлал өндөр бөгөөд эдгээр халдлагууд нь сүлжээний найдвартай ажиллагаа, мэдээллийн бүрэн бүтэн байдал, хүртээмжид сөргөөр нөлөөлдөг [1], [2].

a) Sybil attack : Утасгүй сүлжээнд түгээмэл тохиолддог халдлагуудын нэг нь Sybil attack бөгөөд нэг зангилаа олон хуурамч identity ашиглан сүлжээний итгэлцлийн механизмыг алдагдуулах боломжтой байдаг. Ийм халдлага нь сүлжээний routing болон decision-making процессыг буруу чиглүүлэхэд хүргэдэг [2].

b) Blackhole attack: Routing протоколын сул талыг ашиглан сүлжээний пакет урсгалыг өөр дээрээ төвлөрүүлж улмаар пакетүүдийг устгах эсвэл өөрчлөх боломжийг олгодог халдлагын төрөл юм. Энэ төрлийн халдлага нь сүлжээний гүйцэтгэлийг огцом бууруулж, мэдээллийн алдагдал үүсгэдэг [1].

c) Wormhole attack: Сүлжээний хоёр өөр цэгийн хооронд нууц суваг үүсгэн пакетүүдийг богино замаар дамжуулах замаар routing системийг хуурдаг бөгөөд илрүүлэхэд маш хүндрэлтэй халдлагын нэг гэж судлаачид үздэг [3].

d) Flooding attack: сүлжээний нөөцийг хэт их хүсэлт эсвэл пакет илгээх замаар ашиггүй болгох DoS төрлийн халдлагад хамаардаг бөгөөд энэ нь сүлжээний bandwidth болон процессорын нөөцийг хэт их ашиглахад хүргэдэг [2].

Эдгээр халдлагыг илрүүлэх, урьдчилан сэргийлэх зорилгоор Intrusion Detection System (IDS) өргөн ашиглагддаг. IDS нь сүлжээний урсгал болон системийн үйл ажиллагааг тасралтгүй хянаж, хэвийн бус үйлдлийг илрүүлэх хамгаалалтын механизм юм. IDS системийг ерөнхийд нь signature-based болон anomaly-based гэсэн үндсэн хоёр төрөлд ангилдаг бөгөөд эдгээр нь халдлагын хэв маягийг илрүүлэх өөр өөр аргачлал ашигладаг [4].

Сүүлийн жилүүдэд кибер халдлагын нарийн төвөгтэй байдал нэмэгдэж байгаа тул уламжлалт

rule-based IDS системүүд хангалтгүй болж байна. Үүний улмаас машин сургалт (Machine Learning) болон гүн сургалт (Deep Learning)-д суурилсан IDS системүүдийг хөгжүүлэх судалгаа эрчимтэй явагдаж байна [5]. Машин сургалтын алгоритмууд нь их хэмжээний сүлжээний өгөгдлийг шинжилж, халдлагын хэв маягийг автоматаар илрүүлэх боломжтой бөгөөд олон судалгаанд өндөр нарийвчлалтай үр дүн үзүүлж байгааг харуулсан [6].

Иймээс энэхүү судалгааны ажил нь утасгүй сүлжээний орчинд үүсэх кибер халдлагыг машин сургалтын аргууд ашиглан илрүүлэх боломжийг судлахад чиглэгдсэн болно. Судалгаанд утасгүй сүлжээний өгөгдлийн санг ашиглан халдлагын төрөл, IDS системийн архитектур, машин сургалтын алгоритмуудын онолын үндсийг авч үзэж, халдлага илрүүлэх системийн үндсэн аргачлалыг тодорхойлсон болно.

## II. ӨМНӨ СУДЛАГДСАН АЖИЛ

Сүүлийн жилүүдэд утасгүй сүлжээ (Wireless Networks), IoT болон утасгүй мэдрэгчийн сүлжээ (Wireless Sensor Networks – WSN)-ийн хэрэглээ эрчимтэй нэмэгдэж байгаа нь аюулгүй байдлын асуудлыг судалгааны чухал чиглэл болгож байна. Утасгүй сүлжээ нь нээлттэй дамжуулах орчин ашигладаг, зангилаануудын тооцоолох нөөц хязгаарлагдмал байдаг зэрэг шалтгаанаар төрөл бүрийн кибер халдлагад өртөх эрсдэл өндөр байдаг [8].

Ийм орчинд халдлагыг илрүүлэх, урьдчилан сэргийлэх зорилгоор intrusion detection system (IDS)-ийн судалгаа өргөн хийгдэж байна. IDS систем нь сүлжээний урсгал болон системийн үйл ажиллагааг шинжилж, хэвийн бус зан төлөвийг илрүүлэх боломжтой хамгаалалтын механизм юм [9].

Сүүлийн үеийн судалгаанд машин сургалт (Machine Learning)-д суурилсан IDS системүүдийг ашиглах нь уламжлалт signature-based системүүдээс илүү үр дүнтэй болохыг харуулж байна. Машин сургалтын алгоритмууд нь их хэмжээний сүлжээний өгөгдлийг шинжилж, халдлагын хэв маягийг автоматаар илрүүлэх боломжтой бөгөөд шинэ төрлийн халдлагыг илрүүлэхэд илүү үр дүнтэй гэж судлаачид үздэг [10].

Random Forest, Decision Tree, Support Vector Machine зэрэг алгоритмуудыг intrusion detection системд өргөн ашиглаж байгаа бөгөөд эдгээр алгоритмууд нь ангиллын асуудалд өндөр нарийвчлал үзүүлдэг. Pandey нарын судалгаанд Random Forest алгоритм дээр суурилсан IDS загварыг optimization техник ашиглан сайжруулж, утасгүй мэдрэгчийн сүлжээний халдлагыг илрүүлэх нарийвчлалыг нэмэгдүүлсэн байна [11].

Мөн Arabiat судалгаанд утасгүй мэдрэгчийн сүлжээнд үүсэх халдлагуудыг илрүүлэх зорилгоор машин сургалтын хэд хэдэн алгоритмыг харьцуулан судалсан бөгөөд Random Forest болон AdaBoost

алгоритмууд хамгийн өндөр гүйцэтгэл үзүүлсэн болохыг харуулсан байна [12].

Утасгүй сүлжээний орчинд wormhole халдлага нь routing системийн сул талыг ашиглан хоёр өөр зангилааны хооронд нууц суваг үүсгэж сүлжээний мэдээллийн урсгалыг буруу чиглүүлэх аюултай халдлагын нэг юм. Alshehri судалгаанд машин сургалтын алгоритм ашиглан wormhole халдлагыг илрүүлэх загвар боловсруулж, халдлагыг өндөр нарийвчлалтай илрүүлэх боломжтойг харуулсан байна [13].

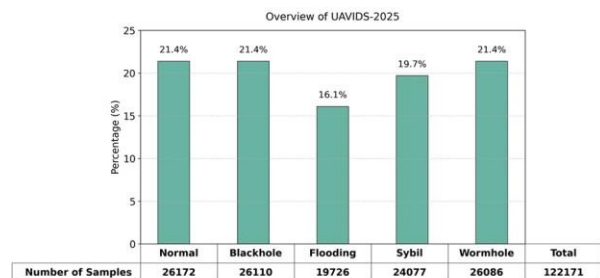
Сүүлийн үеийн судалгаанд intrusion detection системийн архитектурыг сайжруулах зорилгоор олон төрлийн машин сургалтын аргуудыг нэгтгэсэн hybrid IDS системүүдийг хөгжүүлж байна. Zhang нарын судалгаанд олон мэдрэгчийн өгөгдлийг нэгтгэн боловсруулдаг SC-MLIDS framework боловсруулж, утасгүй сүлжээний халдлагыг илрүүлэх үр дүнг сайжруулсан байна [14].

Мөн DoS болон flooding төрлийн халдлагыг илрүүлэх чиглэлээр машин сургалтын алгоритмуудыг ашиглах нь сүлжээний аюулгүй байдлыг сайжруулах үр дүнтэй арга болохыг Al-Sukkar нарын судалгаанд харуулсан байна [15].

Эдгээр судалгаанаас харахад машин сургалт болон хиймэл оюун ухаанд суурилсан intrusion detection системүүд нь утасгүй сүлжээний халдлагыг илрүүлэхэд өндөр үр дүнтэй болох нь батлагдсан байна. Гэсэн хэдий ч dataset-ийн тэнцвэргүй байдал, feature selection, бодит сүлжээний орчинд турших зэрэг асуудлууд бүрэн шийдэгдээгүй хэвээр байгаа бөгөөд илүү үр дүнтэй IDS загвар боловсруулах шаардлага байсаар байна.

## III. САНАЛ БОЛГОХ МЕХАНИЗМ

UAVIDS-2025 dataset нь утасгүй UAV болон ad-hoc сүлжээний орчинд бүртгэгдсэн network flow мэдээллийг агуулдаг. Dataset нь нийт 122,171 сүлжээний урсгал болон 23 багана (22 feature + label)-ийг агуулдаг. Энэхүү dataset нь Normal traffic, Blackhole attack, Wormhole attack, Sybil attack, Flooding attack гэсэн 5 төрлийн ангиллыг агуулдаг бөгөөд intrusion detection system судалгаанд тохиромжтой dataset юм. UAVIDS-2025 өгөгдлийн сан дахь халдлагын төрлүүд болон тэдгээрийн урсгалын тоог Зураг 2-д үзүүлэв



2-р зураг. UVIDS-2025 өгөгдлийн сан дахь урсгалын ангиллын тархалт

**А. Өгөгдөл цэвэрлэх ба урьдчилсан боловсруулалт**

Машин сургалтын алгоритмд өгөгдлийг ашиглахаас өмнө dataset-д урьдчилсан боловсруулалт хийж, өгөгдлийн чанарыг сайжруулах шаардлагатай. Энэ судалгаанд missing value шалгах, encoding хийх, normalization хийх зэрэг үндсэн preprocessing алхмуудыг гүйцэтгэсэн.

- *Missing value шалгах*

Dataset дахь дутуу утгуудыг шалгаж, шаардлагатай тохиолдолд устгах эсвэл тохирох утгаар нөхөх боловсруулалт хийсэн.

- *Encoding*

Текстэн хэлбэртэй feature-үүдийг машин сургалтын алгоритмд ашиглах боломжтой болгох зорилгоор label encoding болон categorical encoding аргаар тоон хэлбэрт хөрвүүлсэн.

- *Normalization*

Feature-үүдийн хэмжээсийн ялгааг багасгах зорилгоор өгөгдлийг normalization хийж нэг ижил хэмжээсийн хүрээнд стандартчилсан. Энэ нь алгоритмуудын гүйцэтгэлийг сайжруулахад чухал нөлөө үзүүлдэг.

- *Train/ Test*

Машин сургалтын загварыг сургах болон үнэлэх зорилгоор dataset-ийг сургалтын (training) болон туршилтын (testing) хэсэгт хуваасан. Нийт өгөгдлийн 80%-ийг сургалтын өгөгдөл, 20%-ийг туршилтын өгөгдөл болгон ашигласан. Үүний үр дүнд сургалтын өгөгдлийн хэмжээ 97,736 бичлэг, харин туршилтын өгөгдлийн хэмжээ 24,435 бичлэг болсон. Сургалтын өгөгдөл нь машин сургалтын алгоритмуудыг сургахад ашиглагдсан бол туршилтын өгөгдөл нь загварын гүйцэтгэлийг үнэлэхэд ашиглагдсан.

Мөн боловсруулсан өгөгдлийг дараагийн туршилт болон алгоритмын сургалтанд ашиглах зорилгоор train\_processed.csv болон test\_processed.csv файлууд болгон хадгалсан. Dataset-ийг сургалтын болон туршилтын хэсэгт хуваасан үр дүнг Хүснэгт 1-д үзүүлэв.

1-р хүснэгт TRAIN/TEST SPLIT ХИЙСНИЙ ДАРААХ ӨГӨГДЛИЙН ХУВААРИЛАЛТ

Dataset хэсэг	Бичлэгийн тоо	Хувь (%)
Training dataset	97,736	80%
Testing dataset	24,435	20%
Нийт	122,171	100%

**В. Feature сонголт ба шинж чанарын шинжилгээ**

Машин сургалтын загварын гүйцэтгэлийг сайжруулахын тулд dataset дахь шинж чанаруудын (features) нөлөөллийг шинжилж, хамгийн чухал feature-үүдийг сонгон ашиглах шаардлагатай. Feature selection нь илүүдэл болон хамаарал багатай шинж чанаруудыг бууруулж, алгоритмын сургалтын хурд болон ангиллын нарийвчлалыг нэмэгдүүлэхэд чухал ач холбогдолтой.

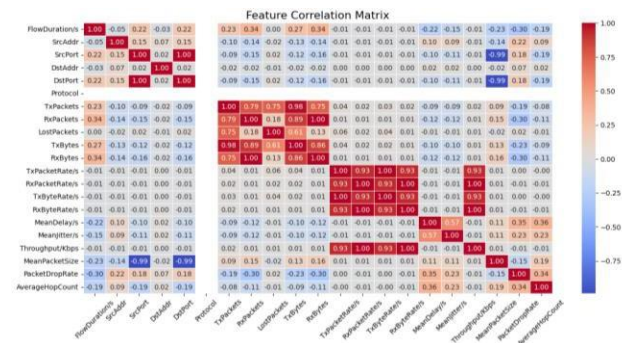
- *Feature Selection*

Dataset нь сүлжээний урсгалын статистик шинж чанаруудыг агуулдаг бөгөөд эдгээр feature-үүд нь халдлага илрүүлэхэд харилцан адилгүй нөлөө үзүүлдэг. Иймээс dataset дахь feature-үүдийн ач холбогдлыг тодорхойлох зорилгоор feature selection хийж, халдлага илрүүлэхэд илүү нөлөөтэй шинж чанаруудыг тодорхойлсон.

- *Correlation Analysis*

Feature-үүдийн хоорондын хамаарлыг тодорхойлох зорилгоор корреляцийн шинжилгээ (correlation analysis) хийсэн. Корреляцийн коэффициент нь feature-үүдийн хоорондын шугаман хамаарлын хүчийг илэрхийлдэг бөгөөд -1 болон 1-ийн хооронд утгатай байдаг. Хэрэв хоёр feature хоорондоо өндөр корреляцитай бол тэдгээр нь ижил төрлийн мэдээлэл илэрхийлж байгааг харуулдаг.

Dataset дахь feature-үүдийн корреляцийн хамаарлыг heatmap хэлбэрээр Зураг 3-т үзүүлэв.



3-р зураг. UVIDS-2025 dataset дахь feature-үүдийн корреляцийн матриц

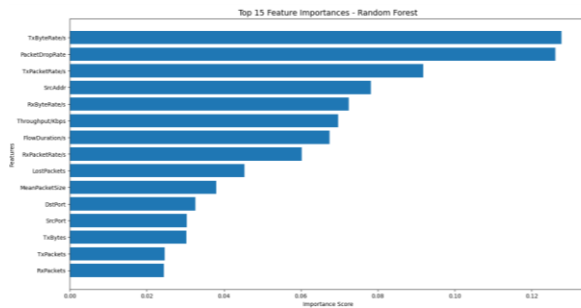
Зураг 3-аас харахад зарим feature-үүд хоорондоо өндөр хамааралтай байгааг ажиглаж болно. Ялангуяа TxPacketRate/s, RxPacketRate/s, TxByteRate/s, RxByteRate/s зэрэг сүлжээний урсгалын хурдтай холбоотой шинж чанарууд хоорондоо өндөр корреляцитай байна. Мөн TxPackets, RxPackets, TxBytes, RxBytes зэрэг packet transmission үзүүлэлтүүд харилцан хамааралтай байгаа нь сүлжээний урсгалын хэмжээг илэрхийлдэг шинж чанарууд хоорондоо уялдаа холбоотой болохыг харуулж байна. Ийм шинжилгээ нь илүүдэл feature-үүдийг тодорхойлох болон машин сургалтын

загварын гүйцэтгэлийг сайжруулахад чухал ач холбогдолтой.

• *Random Forest feature importance*

Энэхүү судалгаанд dataset дахь шинж чанаруудын халдлага илрүүлэхэд үзүүлэх нөлөөллийг тодорхойлох зорилгоор Random Forest алгоритм ашиглан feature importance шинжилгээ хийсэн. Random Forest нь олон decision tree-ийн нийлбэрээс бүрдэх ensemble learning арга бөгөөд decision tree бүр өгөгдлийг хуваахдаа impurity бууралтыг (ихэвчлэн Gini impurity) ашиглан хамгийн тохиромжтой feature-ийг сонгодог. Decision tree-ийн зангилаанд тухайн feature ашиглагдах бүрт impurity буурч байгаа хэмжээг тооцоолж, бүх модны үр дүнг нэгтгэснээр feature-ийн ач холбогдлын оноо (importance score) тодорхойлогддог.

Random Forest алгоритмаар тодорхойлсон feature importance-ийн үр дүнг Зураг 4-т үзүүлэв.



4-р зураг. Random Forest алгоритмаар тодорхойлсон хамгийн чухал feature-үүд

Зураг 4-т UVIDS-2025 dataset дахь feature-үүдийн халдлага илрүүлэхэд үзүүлэх нөлөөллийн хэмжээг харуулсан. Шинжилгээний үр дүнгээс харахад TxByteRate/s, PacketDropRate, TxPacketRate/s, SrcAddr, RxByteRate/s, Throughput/Kbps зэрэг feature-үүд нь халдлага илрүүлэхэд хамгийн өндөр importance оноотой байгааг ажиглаж болно. Эдгээр шинж чанарууд нь сүлжээний урсгалын хурд, packet дамжуулалтын хэмжээ, packet алдагдал зэрэг сүлжээний traffic-ийн динамик үзүүлэлтүүдийг илэрхийлдэг[17].

Энэ нь халдлагын үед сүлжээний урсгалын параметрууд мэдэгдэхүйц өөрчлөгдөж байгааг илтгэж байгаа бөгөөд дээрх feature-үүд нь intrusion detection системийн ангиллын загварт чухал үүрэг гүйцэтгэж байгааг харуулж байна[18]. Ийм төрлийн feature importance шинжилгээ нь илүүдэл feature-үүдийг тодорхойлох, загварын сургалтын үр ашгийг нэмэгдүүлэх, мөн intrusion detection системийн гүйцэтгэлийг сайжруулахад чухал ач холбогдолтой юм.

C. *Машин сургалтын алгоритмуудыг сургах*

Утасгүй сүлжээний халдлагыг илрүүлэх зорилгоор хэд хэдэн машин сургалтын алгоритмуудыг ашиглан ангиллын загваруудыг

сургаж туршсан. Энэхүү судалгаанд Logistic Regression, K-Nearest Neighbor (KNN), Decision Tree, Random Forest, Support Vector Machine (SVM) зэрэг өргөн хэрэглэгддэг supervised learning алгоритмуудыг ашигласан.

Эдгээр алгоритмууд нь dataset дахь feature-үүдийг ашиглан сүлжээний урсгалыг хэвийн (Normal traffic) болон халдлагын төрлүүд (Blackhole, Wormhole, Sybil, Flooding)-д ангилах зорилготой. Алгоритмуудыг сургалтын dataset дээр сургаж, дараа нь туршилтын dataset ашиглан загварын гүйцэтгэлийг үнэлсэн.

Logistic Regression

Logistic Regression нь ангиллын асуудлыг шийдэхэд өргөн ашиглагддаг supervised learning алгоритм юм. Энэ алгоритм нь өгөгдлийн feature-үүдийн шугаман хослол дээр үндэслэн тухайн бичлэг тодорхой ангилалд хамаарах магадлалыг тооцоолдог.

1) Logistic regression нь sigmoid функц ашиглан гаралтыг 0-1 хооронд шахаж, ангиллын магадлалыг тодорхойлдог.

$$P(y = 1/x) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)}}$$

2) K-Nearest Neighbor алгоритм нь instance-based learning арга бөгөөд шинэ өгөгдлийн ангиллыг тодорхойлохдоо сургалтын өгөгдлийн хамгийн ойр k хөршийг ашиглан шийдвэр гаргадаг. Шинэ өгөгдөл аль ангилалд хамаарахыг тодорхойлохдоо хамгийн ойр хөршүүдийн ихэнх ангиллыг сонгодог.

KNN алгоритмд өгөгдлүүдийн хоорондын зайг хэмжихэд Euclidean distance өргөн ашиглагддаг.

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

3) Decision Tree алгоритм нь өгөгдлийг шаталсан мод хэлбэрийн бүтэц ашиглан ангилдаг. Модны зангилаа бүр feature дээр үндэслэсэн decision rule агуулдаг бөгөөд өгөгдлийг дараагийн салбар руу хуваадаг. Decision Tree нь feature сонгохдоо Gini index эсвэл information gain ашигладаг.

$$Gini = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2$$

4) Random Forest нь олон decision tree загваруудыг нэгтгэсэн ensemble learning алгоритм юм. Энэ алгоритм нь bootstrap sampling болон random feature selection ашиглан олон decision tree үүсгэж, тэдгээрийн үр дүнг нэгтгэн эцсийн шийдвэр гаргадаг. Random Forest-ийн эцсийн ангилал дараах байдлаар тодорхойлогдоно.

$$\hat{y} = mode\{T_1(x), T_2(x), \dots, T_m(x)\}$$

5) Support Vector Machine нь өгөгдлийг ангилах хамгийн сайн **hyperplane**-ийг тодорхойлох зарчим дээр ажилладаг алгоритм юм. SVM алгоритм нь хоёр ангиллыг хамгийн их margin-тайгаар салгах hyperplane-ийг тодорхойлдог. SVM-ийн hyperplane дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ.

$$w * x + b = 0$$

#### IV. ТУРШИЛТЫН ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

##### A. Туршилтын орчин

Энэхүү судалгаанд утасгүй сүлжээний орчин дахь халдлагыг илрүүлэх машин сургалтын загваруудын гүйцэтгэлийг үнэлэх зорилгоор UVIDS-2025 өгөгдлийн санг ашигласан. Тус өгөгдлийн сан нь UAV (Unmanned Aerial Vehicle) сүлжээний орчинд бүртгэгдсэн хэвийн болон халдлагат сүлжээний урсгалуудыг агуулдаг бөгөөд Blackhole attack, Flooding attack, Sybil attack, Wormhole attack болон Normal traffic гэсэн нийт таван ангиллаас бүрдэнэ. Эдгээр ангиллууд нь UAV сүлжээний аюулгүй байдалд түгээмэл тохиолддог төлөөлөх халдлагуудыг хамарч байгаа тул intrusion detection system (IDS)-ийн судалгаа, туршилтад тохиромжтой өгөгдлийн сан гэж үзэж болно.

Туршилтын өмнө өгөгдөлд урьдчилсан боловсруулалт хийж, шаардлагатай шинж чанаруудыг ялган авч, ангиллын загвар сургахад тохиромжтой хэлбэрт оруулсан. Үүний дараа өгөгдлийг сургалтын багц болон туршилтын багц болгон хувааж, сонгосон алгоритмуудыг сургасан. Сургалтын өгөгдлийг загварын параметруудийг суралцахад ашигласан бол туршилтын өгөгдлийг загварын ерөнхийшүүлэх чадвар, бодит нөхцөл дэх ангиллын үр ашгийг үнэлэхэд ашигласан.

Энэхүү судалгаанд Logistic Regression, K-Nearest Neighbors (KNN), Decision Tree, Random Forest болон Support Vector Machine (SVM) зэрэг өргөн хэрэглэгддэг машин сургалтын алгоритмуудыг ашигласан. Эдгээр алгоритмуудыг сонгосон нь шугаман, зайд суурилсан, модонд суурилсан болон хэт хавтгайд суурилсан аргуудын ялгааг харьцуулан судлах боломж олгож байгаа юм. Туршилтыг Python програмчлалын хэл дээр хэрэгжүүлж, өгөгдөл боловсруулахад Pandas болон NumPy, загвар сургах болон үнэлэхэд Scikit-learn, үр дүнг дүрслэн харуулахад Matplotlib болон Seaborn сангуудыг ашигласан.

Загваруудын гүйцэтгэлийг үнэлэхдээ Accuracy, Precision, Recall, F1-score зэрэг стандарт хэмжүүрүүдийг ашигласан бөгөөд эдгээрийг олон ангилалт халдлага илрүүлэх асуудалд one-vs-rest зарчмаар тооцоолсон.

##### B. Үнэлгээний үзүүлэлтүүд

Машин сургалтын загваруудын халдлага илрүүлэх гүйцэтгэлийг иж бүрэн үнэлэх зорилгоор ангиллын загварын үр ашгийг тодорхойлох түгээмэл хэрэглэгддэг хэд хэдэн үнэлгээний үзүүлэлтүүдийг ашигласан. Эдгээр үзүүлэлтүүд нь загварын гүйцэтгэлийг олон талаас нь үнэлэх боломж олгодог бөгөөд ялангуяа кибер аюулгүй байдлын орчинд буруу ангилалтын нөлөөллийг тодорхойлоход онцгой ач холбогдолтой байдаг. Тухайлбал, хуурамч эерэг (False Positive) болон хуурамч сөрөг (False Negative) ангиллууд нь халдлага илрүүлэх системийн найдвартай байдалд шууд нөлөөлдөг. False Positive өндөр байх нь хэвийн урсгалыг халдлага гэж буруу ангилах эрсдэлийг нэмэгдүүлдэг бол False Negative өндөр байх нь бодит халдлагыг илрүүлж чадахгүй байх аюултай нөхцөлийг үүсгэнэ.

Судалгаанд ашигласан үнэлгээний хэмжүүрүүдийн үндэс нь андууралтын матриц (confusion matrix) юм. Андууралтын матриц нь ангиллын загварын таамагласан үр дүн болон бодит ангиллын хоорондын хамаарлыг харуулдаг бөгөөд дараах дөрвөн үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгээс тогтоно.

- True Positive (TP) – халдлага бодитоор байсан бөгөөд систем зөв илрүүлсэн тохиолдол.
- True Negative (TN) – халдлага байгаагүй бөгөөд систем хэвийн урсгал гэж зөв ангилсан тохиолдол.
- False Positive (FP) – халдлага байгаагүй боловч систем халдлага гэж буруу ангилсан тохиолдол.
- False Negative (FN) – халдлага бодитоор байсан боловч систем илрүүлж чадаагүй тохиолдол.

Уг судалгаа нь олон ангилалт (multi-class classification) хэлбэрийн асуудлыг авч үзэж байгаа тул дээрх хэмжигдэхүүнүүдийг ангилал бүрийн хувьд one-vs-rest зарчмыг ашиглан тооцоолсон. Загварын гүйцэтгэлийг үнэлэхэд дараах үндсэн хэмжүүрүүдийг ашигласан.

- True Positive (TP): халдлага бодитоор байсан бөгөөд систем зөв илрүүлсэн тохиолдол
- True Negative (TN): халдлага байгаагүй бөгөөд систем зөв ангилсан тохиолдол
- False Positive (FP): халдлага байгаагүй боловч систем халдлага гэж буруу ангилсан тохиолдол
- False Negative (FN): халдлага бодитоор байсан боловч систем илрүүлж чадаагүй тохиолдол

Энэхүү судалгаа нь олон ангилалт (multi-class classification) хэлбэрийн асуудлыг авч үзэж байгаа тул дээрх хэмжигдэхүүнүүдийг ангилал бүрийн хувьд one-vs-rest зарчмаар тооцоолсон.

Accuracy нь нийт өгөгдлийн дундаас зөв ангилсан тохиолдлын эзлэх хувийг илэрхийлдэг.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

Precision нь загварын халдлага гэж ангилсан тохиолдлуудын дундаас үнэхээр халдлага байсан тохиолдлын хувийг илэрхийлдэг бөгөөд хуурамч зэрэг ангиллыг бууруулах чадварыг үнэлэхэд чухал ач холбогдолтой.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

Recall буюу Sensitivity нь бодит халдлагуудын дундаас хэдэн хувийг систем зөв илрүүлж чадсаныг хэмждэг. Энэ нь халдлагыг алдалгүй илрүүлэх чадварыг үнэлэхэд ашиглагдана.

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

Recall өндөр байх нь бодит халдлагыг илрүүлэх чадвар сайн байгааг илтгэнэ. Кибер аюулгүй байдлын нөхцөлд энэ үзүүлэлт онцгой ач холбогдолтой, учир нь false negative буюу илрүүлж чадаагүй халдлага нь бодит системд ноцтой эрсдэл дагуулж болзошгүй.

F1-score нь Precision болон Recall хэмжүүрүүдийн гармоник дундаж бөгөөд ангиллын загварын ерөнхий гүйцэтгэлийг нэгтгэн үнэлэхэд өргөн хэрэглэгддэг.

$$F1 - Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}$$

F1-score өндөр байх нь загвар халдлагыг зөв илрүүлэхийн зэрэгцээ буруу ангилалтын түвшинг харьцангуй бага байлгаж чадсаныг илтгэнэ.

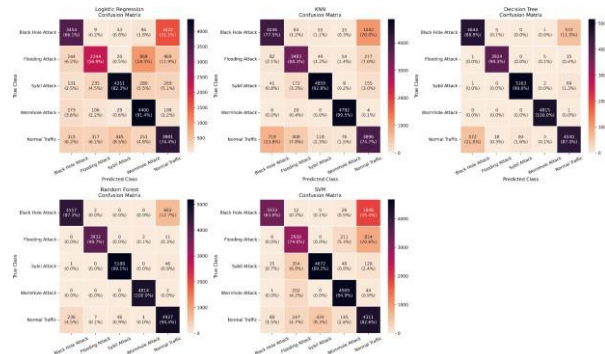
### C. Confusion Matrix

Confusion Matrix (андууралтын матриц) нь ангиллын (classification) загварын гүйцэтгэлийг үнэлэхэд өргөн хэрэглэгддэг хүснэгтэн хэлбэрийн үнэлгээний арга юм. Энэ матриц нь машин сургалтын загварын таамагласан ангилал болон бодит ангилал хоорондын хамаарлыг харуулж, загвар зөв болон буруу ангилсан тохиолдлуудыг нарийвчлан шинжлэх боломжийг олгодог. Өөрөөр хэлбэл, ангиллын алгоритм өгөгдлийг хэр зөв ангилж байгаа болон ямар төрлийн алдаа гаргаж байгааг тодорхойлох үндсэн хэрэгсэл болдог.

Confusion matrix нь ихэвчлэн мөр болон багана бүтэцтэй хүснэгт байдлаар дүрслэгддэг бөгөөд мөр нь бодит ангиллыг, багана нь загварын таамагласан ангиллыг илэрхийлдэг. Ийм байдлаар бодит болон таамагласан үр дүнг хооронд нь харьцуулснаар

ангиллын загварын алдааны бүтэц, зөв ангилалтын түвшинг илүү тодорхой харж болно

5-р зурагт машин сургалтын алгоритмуудын ангиллын үр дүнг confusion matrix хэлбэрээр харуулав.



5-р зураг. Машин сургалтын алгоритмуудын ангиллын үр дүнгийн confusion matrix

Зурагт харагдаж байгаагаар ихэнх халдлагын төрлүүдийг загварууд зөв ангилж байгааг ажиглаж болно. Ялангуяа Normal traffic, Blackhole болон Wormhole төрлийн урсгалуудыг илрүүлэхэд өндөр нарийвчлалтай үр дүн гарсан байна. Харин зарим тохиолдолд Sybil болон Flooding халдлагын ангиллууд хоорондоо бага зэрэг андуурагдсан тохиолдол ажиглагдсан.

Энэ нь эдгээр халдлагын үед сүлжээний урсгалын статистик шинж чанарууд хоорондоо төстэй байж болохыг илтгэнэ. Гэсэн хэдий ч нийт үр дүнгээс харахад машин сургалтын алгоритмууд нь утасгүй сүлжээний халдлагыг илрүүлэхэд үр дүнтэй ажиллаж байгааг харуулж байна.

UAVIDS-2025 өгөгдлийн санг ашиглан Logistic Regression, K-Nearest Neighbors (KNN), Decision Tree, Random Forest болон Support Vector Machine (SVM) алгоритмуудын гүйцэтгэлийг харьцуулан үзүүлэв. Үнэлгээг Precision, Recall болон F1-score гэсэн гурван үндсэн хэмжүүрээр тооцож, Blackhole, Flooding, Sybil, Wormhole халдлагууд болон Normal traffic гэсэн таван ангиллын хувьд тус тус 6-р зурагт харуулав.

Сургалтын үр дүнгээс харахад Random Forest алгоритм хамгийн өндөр гүйцэтгэлтэй ажилласан бөгөөд ихэнх ангиллын хувьд Precision, Recall болон F1-score үзүүлэлтүүд өндөр түвшинд хадгалагдсан байна. Ялангуяа Sybil attack болон Wormhole attack ангиллуудын хувьд бараг төгс ангилалд ойр үзүүлэлт гарсан нь энэ алгоритм нь олон шинж чанарын нийлмэл хамаарлыг үр дүнтэй суралцаж чадсаныг илтгэнэ

Decision Tree алгоритм мөн өндөр гүйцэтгэл үзүүлсэн бөгөөд ихэнх ангиллын хувьд Random Forest-той ойролцоо үр дүн гаргасан. Энэ нь модонд суурилсан аргууд нь өгөгдлийн шугаман бус хамаарал, шийдвэрийн хилийг үр дүнтэй ялгаж чаддаг болохыг харуулж байна. Гэсэн хэдий ч ганц мод ашигладаг тул Random Forest-той харьцуулахад

ерөнхийшүүлэх чадварын хувьд бага зэрэг сул талтай.

KNN алгоритм нь дундаас өндөр түвшний гүйцэтгэл үзүүлсэн бөгөөд зарим ангилал, ялангуяа Flooding, Sybil болон Wormhole халдлагын үед боломжийн сайн үр дүн гаргасан. Гэсэн хэдий ч Normal traffic ангиллын үед харьцангуй бага үзүүлэлттэй байгаа нь хөршид суурилсан ангиллын арга нь онцлог шинжүүдийн тархалт давхцсан нөхцөлд мэдрэг байж болохыг харуулж байна.

SVM болон Logistic Regression алгоритмууд нь бусад алгоритмуудтай харьцуулахад харьцангуй бага гүйцэтгэл үзүүлсэн. Энэ нь тухайн өгөгдлийн олон хэмжээст, төвөгтэй, шугаман бус бүтэцтэй холбоотой байж болох бөгөөд модонд суурилсан алгоритмуудтай харьцуулахад шугаман болон хил дээр суурилсан аргуудын ялган ангилах чадвар хязгаарлагдмал байгааг илтгэнэ.

*D. Алгоритмуудын гүйцэтгэлийн харьцуулалт*

Зураг 6 болон Хүснэгт 2-т UAVIDS-2025 өгөгдлийн сан дээр туршсан машин сургалтын алгоритмуудын гүйцэтгэлийг харьцуулан үзүүлэв. Загваруудын гүйцэтгэлийг Accuracy, Precision, Recall болон F1-score зэрэг стандарт үнэлгээний хэмжүүрүүдээр тооцоолсон бөгөөд эдгээр нь халдлага илрүүлэх системийн ангиллын нарийвчлал, тогтвортой байдал болон ерөнхийшүүлэх чадварыг үнэлэхэд өргөн хэрэглэгддэг.

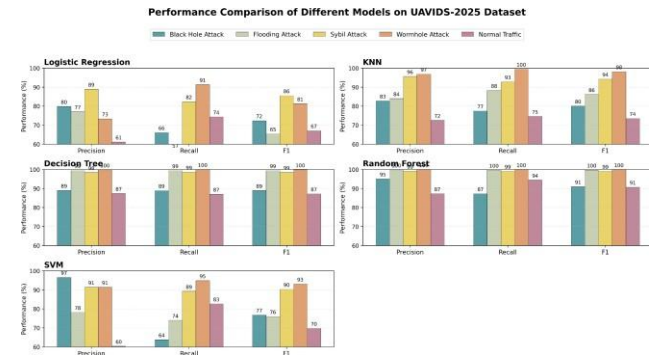
2-р хүснэгт. Алгоритмуудын гүйцэтгэлийн нэгтгэлт

Алгоритм	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Logistic Regression	0.7485	0.7606	0.7423	0.7436
KNN	0.8625	0.8636	0.8655	0.8642
Decision Tree	0.9448	0.9479	0.9481	0.9480
Random Forest	0.9584	0.9622	0.9609	0.9609
SVM	0.8105	0.8360	0.8092	0.8122

Туршилтын үр дүнгээс Random Forest алгоритм хамгийн өндөр гүйцэтгэл үзүүлж, Accuracy 0.9584, Precision 0.9622, Recall 0.9609, F1-score 0.9609 гэсэн үзүүлэлттэй гарсан. Энэ нь Random Forest алгоритм нь олон decision tree-ийн нийлбэрт суурилсан ensemble learning арга учраас өгөгдлийн олон хэмжээст, шугаман бус хамаарлыг илүү үр дүнтэй суралцаж чаддагтай холбоотой юм. Мөн bootstrap sampling болон random feature selection ашигладаг нь загварын overfitting-ийг бууруулж, ерөнхийшүүлэх чадварыг нэмэгдүүлдэг давуу талтай.

Decision Tree алгоритм мөн өндөр гүйцэтгэл үзүүлсэн бөгөөд Accuracy 0.9448, F1-score 0.9480

болсон нь модонд суурилсан аргууд нь сүлжээний урсгалын шинж чанаруудын логик хамаарлыг үр дүнтэй ялган ангилж чаддаг болохыг харуулж байна. Харин KNN алгоритм дундаас өндөр түвшний үр дүн үзүүлсэн боловч өгөгдлийн тархалт давхцсан нөхцөлд гүйцэтгэл буурах хандлагатай байв. SVM болон Logistic Regression алгоритмуудын гүйцэтгэл харьцангуй бага байсан нь тухайн өгөгдлийн олон хэмжээст, төвөгтэй, шугаман бус бүтэцтэй холбоотой байж болох юм.



6-р зураг. UAVIDS-2025 өгөгдлийн сан дээрх машин сургалтын алгоритмуудын гүйцэтгэлийн харьцуулалт

**ДҮГНЭЛТ**

Энэхүү судалгаанд утасгүй сүлжээний халдлагыг машин сургалтын аргаар илрүүлэх боломжийг судалж, UAVIDS-2025 өгөгдлийн санд тулгуурласан intrusion detection system (IDS)-ийн загварыг боловсруулан туршив. Судалгаанд Blackhole, Wormhole, Sybil, Flooding болон Normal traffic гэсэн таван ангиллын өгөгдлийг ашиглаж, урьдчилсан боловсруулалт хийсний дараа Logistic Regression, KNN, Decision Tree, Random Forest болон SVM алгоритмуудаар ангиллын загваруудыг сургаж, Accuracy, Precision, Recall, F1-score зэрэг үзүүлэлтүүдээр үнэлсэн.

Туршилтын үр дүнгээс Random Forest алгоритм хамгийн өндөр гүйцэтгэл үзүүлж, Accuracy 0.9584, F1-score 0.9609 болсон бол Decision Tree алгоритм мөн өндөр үр дүн үзүүлсэн. Feature importance шинжилгээгээр TxByteRate/s, PacketDropRate, TxPacketRate/s зэрэг шинж чанарууд халдлага илрүүлэхэд хамгийн их нөлөөтэй болох нь тогтоогдсон.

Ерөнхийд нь дүгнэхэд, машин сургалтад суурилсан IDS арга нь утасгүй сүлжээний халдлагыг илрүүлэхэд үр дүнтэй болох нь батлагдсан бөгөөд ялангуяа Random Forest болон Decision Tree алгоритмууд илүү өндөр гүйцэтгэл үзүүлсэн. Цаашид бодит цагийн өгөгдөл ашигласан илрүүлэлтийн систем болон гүн сургалтын аргуудыг ашиглан судалгааг өргөжүүлэх боломжтой.

## АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] R. Sudha and M. Premkumar, "Securing wireless sensor networks: A survey of challenges and innovations," *Franklin Open*, vol. 2025, 2025.
- [2] E. Alotaibi, "Wireless Sensor Networks Under Cyber Attacks," *Journal of Cyber Security and Risk Auditing*, vol. 2025, no.1, pp. 1–12, 2024.
- [3] U. Ghugar and J. Pradhan, "Survey of Wormhole Attack in Wireless Sensor Networks," *Computer Science and Information Technologies*, vol. 2, no.1, pp. 33-42, 2021.
- [4] B. Devanathan, "A Comparison Study of Various Wireless Intrusion Detection Systems," *International Journal of Scientific and Applied Technology*, 2025.
- [5] A. M. Arabiat et al., "Intrusion Detection in Wireless Sensor Networks Using Machine Learning Techniques," *Journal of Communications*, vol.20, no.4, 2025.
- [6] N. R. Saadallah et al., "Enhancing Wireless Security Through Deep Learning: Network Attack Detection and Advanced Classification," *Journal of Modern Technology and Engineering*, vol.10, no.1, 2025.
- [7] "Wireless Security," *Wikipedia*, 2024.
- [8] H. Mliki, A. Kaceam, and L. Chaari, "A Comprehensive Survey on Intrusion Detection based Machine Learning for IoT Networks," *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, 2021.
- [9] T. M. Nguyen et al., "Enhancing Intrusion Detection in Wireless Sensor Networks Using Machine Learning Techniques," *Sensors*, vol. 24, 2024.
- [10] M. A. Talukder et al., "Machine Learning-based Intrusion Detection for Wireless Sensor Networks using SMOTE-Tomek," *International Journal of Information Security*, 2024
- [11] V. K. Pandey et al., "Enhancing Intrusion Detection in Wireless Sensor Networks Using Random Forest and Optimization Techniques," *Scientific Reports*, 2025.
- [12] A. M. Arabiat et al., "Intrusion Detection in Wireless Sensor Networks Using Machine Learning Techniques," *Journal of Communications*, vol. 20, no.4, 2025.
- [13] A. H. Alshehri et al., "Wormhole Attack Detection and Mitigation Model for IoT and Wireless Sensor Networks Using Machine Learning," *PeerJ Computer Science*, 2024.
- [14] H. Zhang et al., "SC-MLIDS: Fusion-based Machine Learning Framework for Intrusion Detection in Wireless Sensor Networks," *Ad Hoc Networks*, 2025.
- [15] G. Al-Sukkar et al., "Machine Learning-based DoS Attack Detection in Wireless Sensor Networks," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2025.
- [16] Statista Research Department, "Number of internet users worldwide from 2000 to 2025," *Statista*, 2025. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/273018/number-of-internet-users-worldwide/>. Accessed: Mar. 16, 2026.
- [17] H. Zhang et al., "SC-MLIDS: Fusion-based Machine Learning Framework for Intrusion Detection in Wireless Sensor Networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 157, 2025.
- [18] T. M. Nguyen et al., "Enhancing Intrusion Detection in Wireless Sensor Networks Using Machine Learning Techniques," *Sensors*, vol. 24, 2024.

# ЦЭЭЖНИЙ РЕНТГЕН ЗУРГААС ОНОШИЛГООНЫ ТАЙЛАН ҮҮСГЭХ AI ЗАГВАРЫН СУДАЛГАА

Мэндбаярын ЭНХБОЛОР<sup>1</sup>, Бямбадоржийн ЗОЛЗАЯА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Мэдээллийн технологийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [B221890016@must.edu.mn](mailto:B221890016@must.edu.mn)

**Хураангуй:** Цээжний рентген зураг нь уушги, зүрх судасны өвчнийг оношлоход өргөн хэрэглэгддэг дүрс оношилгооны нэг бөгөөд эмч мэргэжилтнүүд цээжний рентген зургийг үзэн шалгаж, ажиглалтын дагуу тайлан бичих үйл явц нь цаг их шаарддаг, нарийн ажил юм. Энэхүү судалгааны зорилго нь хиймэл оюун ухаанд суурилсан цээжний рентген зургаас оношилгооны тайлан үүсгэх систем боловсруулан эмчийн ажлыг хөнгөвчлөх, эмч нарын нөөц бага, ачаалал ихтэй эмнэлгүүдэд дэмжлэг үзүүлэх юм. Судалгааны ажлыг дараах 3 үе шаттайгаар гүйцэтгэсэн. (1) Indiana University (IU) Chest X-ray өгөгдлийн багц дээр дөрвөн харааны энкодер загвар (Swin, ViT, DEiT, BEiT) болон хоёр хэлний декодер загвар (DistilGPT, BioGPT)-ийн нийт найман хослолыг сурган гүйцэтгэлийг үгийн түвшний хэмжүүр (BLEU, ROUGE, METEOR), эмнэлзүйн хэмжүүр (CheXbert F1, RadGraph F1)-ээр үнэлсэн. Туршилтын үр дүнд Swin+BioGPT болон DEiT+BioGPT хослолууд хамгийн сайн гүйцэтгэл үзүүлсэн. (2) Indiana University (IU) Chest X-ray өгөгдөл дээр MIMIC-CXR өгөгдлийг алхамчилсан байдлаар (+2000 хүртэлх зураг, +4000 хүртэлх зураг) нэмж Swin+BioGPT болон DEiT+BioGPT загваруудыг сурган, гүйцэтгэлийг үнэлэхэд үгийн түвшний хэмжүүрүүдэд мэдэгдэхүйц өөрчлөлт гараагүй ч эмнэлзүйн хэмжүүр 74%-аас 80% болж өссөн. Мөн MIMIC-CXR өгөгдлийг цэвэрлэн рентген зурагт ажиглагдаж буй олдворуудтай хамааралгүй өгүүлбэрүүдийг устгахад эмнэлзүйн хэмжүүр 82% болж сайжирсан. (3) Indiana University (IU) Chest X-ray + MIMIC CXR нийлмэл өгөгдөл дээр on-the-fly data augmentation хийж загваруудыг сурган гүйцэтгэлийг үнэлэхэд үгийн түвшний хэмжүүр бага хэмжээгээр сайжирсан бөгөөд эмнэлзүйн хэмжүүр тогтвортой хадгалагдсан. Үүний үр дүнд үгийн түвшний болон эмнэлзүйн хэмжүүр хоёулаа сайжирснаар загвар нь найруулгын хувьд чанартай бөгөөд эмнэлзүйн хувьд илүү үнэн зөв тайлан үүсгэх чадвартай болсон.

**Түлхүүр үг:** Vision Encoder, Language Decoder, Swin, ViT, DEiT, BEiT, DistilGPT, BioGPT

## I. УДИРТГАЛ

Цээжний рентген зураг нь уушгины үрэвсэл, сүрьеэ, зүрхний томрол, уушгины хавдар зэрэг олон төрлийн эмгэгийг илрүүлэхэд өргөн хэрэглэгддэг дүрс оношилгооны арга юм. Дэлхий даяар жилд ойролцоогоор 830 сая гаруй удаа цээжний рентген зургийн оношилгоо хийгддэг гэж Хойд Америкийн Радиологийн Нийгэмлэг (RSNA) мэдээлсэн [1].

Монгол Улсын хувьд сүрьеэгийн өндөр өвчлөлтэй орны нэг хэвээр байгаа бөгөөд 2024 оны судалгаагаар 100,000 хүн тутамд 446 шинэ сүрьеэгийн тохиолдол бүртгэгдсэн [2]. Энэ нь цээжний рентген зургийн оношилгооны хэрэгцээ шаардлага их байх нөхцөлийг бүрдүүлж байна. Түүнчлэн цээжний рентген зургийг үнэлж, оношилгооны тайлан бичих нь нарийвчилсан ажиглалт болон цаг хугацаа их шаарддаг үйл явц бөгөөд эмч нарын ачаалал нэмэгдэх үед тайлан гаргах хугацаа улам удаашрах асуудал тулгарч байна.

Нөгөө талаас дүрс оношилгооны эмч нарын хүний нөөцийн хомсдол нь бодит сорилт хэвээр байсаар байна. 2025 оны судалгаагаар Монгол улсад нийт 670 дүрс оношилгооны эмч ажиллаж байгаа бөгөөд 100,000 хүн тутамд 19.1 дүрс оношилгооны эмч ногдож байгаа нь эмч нарын ажлын ачаалал ихсэх, улмаар оношилгооны тайлан гаргах хугацаа удаашрах шалтгаан болж байна [3].

Иймд оношилгооны тайлан гаргах процессыг автоматжуулах, эмч нарт туслах систем боловсруулах шаардлага тулгарч байна.

Сүүлийн жилүүдэд гүн сургалтын арга, ялангуяа харааны трансформер (Vision Transformer) болон том хэлний загварууд (Large Language Model) хөгжсөнөөр зурган өгөгдлөөс нарийн орон зайн хэв шинжийг илрүүлэх болон түүнээс уялдаа холбоотой, контекстэд тохирсон текст үүсгэх өндөр чадамжтай болсон. Энэ технологи нь эмнэлгийн дүрсээс автоматаар оношилгооны тайлан үүсгэх боломжийг нээж байна.

Гэсэн хэдий ч зургаас текст үүсгэх технологийг цээжний рентген зурган өгөгдлөөс тайлан үүсгэх чиглэлд ашигласан судалгаанууд нь харьцангуй сүүлд эхэлсэн. Харин түүнээс өмнө нь хийгдсэн ихэнх судалгаанууд нь рентген зургаас “өвчтэй/өвчингүй” гэдгийг ангилах ангиллын түвшинд төвлөрсөн байдаг бол бодит практикт илүү их цаг шаарддаг хэсэг болох оношилгооны тайлан бичих процессыг шийдэж чаддаггүй.

Энэхүү судалгааны зорилго нь цээжний рентген зургаас эмнэлзүйн хувьд үнэн зөв, найруулгын хувьд чанартай оношилгооны тайлан үүсгэх хиймэл оюун ухаанд суурилсан систем боловсруулж, эмч нарын ажлыг хөнгөвчилж тэдэнд туслах, эмчийн нөөц бага эмнэлгүүдэд дэмжлэг үзүүлэхэд оршино.

## II. ИЖИЛ ТӨСТЭЙ АЖЛУУДЫН СУДАЛГАА

Сүүлийн жилүүдэд цээжний рентген зургаас автомат оношилгоо болон тайлан үүсгэх чиглэлээр олон судалгаа хийгдэж, үүнд гүн сургалтын аргууд өргөн хэрэглэгдэх болсон. Оношилгооны тайлан

үүсгэхэд хамгийн өргөн ашиглагддаг гүн сургалтад суурилсан арга нь энкодер-декодер фреймворк юм.

Цээжний рентген зургаас тайлан үүсгэх эхэн үеийн судалгаануудад ашиглагдсан арга нь Convolutional Neural Network (CNN) загварыг дүрсний онцлог шинж чанарыг гаргагч буюу энкодерт, Recurrent Neural Network (RNN) болон Long Short-Term Memory (LSTM) загваруудыг текст үүсгэгчид буюу декодерт ашиглах нь элбэг байсан. Жишээлбэл, Хие нар [4] нь цээжний рентген зургаас тайлан үүсгэх даалгаварт CNN-ийг дүрсний онцлог гаргагч болгон ашиглаж, RNN-д суурилсан текст үүсгэгчтэй attention механизм хослуулсан загвар санал болгосон. Attention модуль нь тайлан үүсгэх явцад зураг дахь чухал бүсүүдэд анхаарал хандуулах боломж олгосноор өмнөх энгийн энкодер-декодер бүтэцтэй загваруудаас илүү уялдаа сайтай тайлан үүсгэх боломжтой болсон.

Сүүлийн үеийн судалгаанд Transformer архитектурт суурилсан загваруудыг оношилгооны тайлан автоматаар үүсгэх чиглэлд өргөн хэрэглэх болсон. Тухайлбал, Raminedi нар [5] харааны болон хэлний трансформеруудыг нэгтгэсэн энкодер-декодер архитектур санал болгосон. Уг судалгаанд ViT болон түүний хувилбарууд болох BEiT, DEiT загваруудыг энкодерт, GPT2 загварыг декодерт ашиглан тэдгээрийн хослол архитектуруудын гүйцэтгэлийг харьцуулсан. Гүйцэтгэлийг BLEU, ROUGE зэрэг үгийн түвшний хэмжүүрээр үнэлж, өмнөх CNN-RNN суурь аргуудаас илүү гүйцэтгэл үзүүлснийг харуулсан.

Prateek нар [6] Swin Transformer-ийг харааны онцлог гаргагч болгон, DistilGPT-ийг текст үүсгэгч болгон хослуулсан sequence-to-sequence multimodal архитектур санал болгосон. Загварын гүйцэтгэл нь үгийн түвшний хэмжүүрүүдээр CNN-RNN аргуудаас илүү үзүүлэлттэй байсан. Гэсэн хэдий ч уг судалгаа нь нэг эх үүсвэрээс бүрдсэн IU Chest X-ray өгөгдлийн багцад тулгуурласан нь загварын ерөнхийлөх чадварт тодорхой хязгаарлалт үүсгэх боломжтой буюу зарим өвчлөлийн хэлбэрүүдийг дутуу төлөөлөх магадлалтай гэдгийг дурдсан.

Дээрх 3 судалгаа нь загварын гүйцэтгэлийг үгийн түвшний хэмжүүрүүдээр үнэлсэн бөгөөд эмнэлзүйн үнэн зөв байдлыг илэрхийлэх CheXbert F1, RadGraph F1 зэрэг хэмжүүрүүдийг онцолж авч үзээгүй буюу эмнэлзүйн хувьд хэр бодитой, үнэн зөв тайлан гэдгийг хэмжээгүй. Мөн зөвхөн нэг төрлийн өгөгдлийн багц дээр загваруудыг сургасан тул ерөнхийлөх чадвар сул байж болзошгүй байна.

Эдгээр судалгааны ажлуудыг үндэслэн, бид цээжний рентген зургийн тайлан үүсгэх олон энкодер-декодер хослолыг IU Chest X-ray болон MIMIC-CXR өгөгдлийн багцуудын нийлмэл өгөгдлөөр сурган харьцуулан судалж, гүйцэтгэлийг үгийн түвшний болон эмнэлзүйн хэмжүүрүүдээр цогцоор нь үнэлнэ.

### III. АШИГЛАСАН АРГА

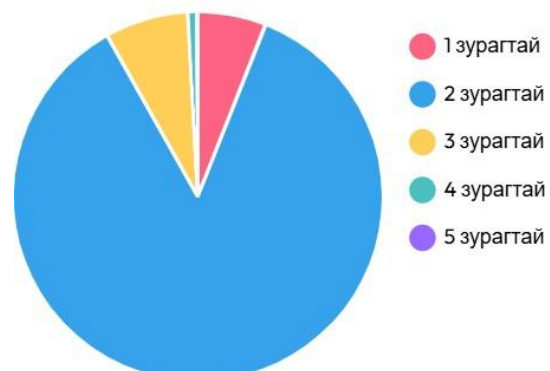
#### 3.1. Өгөгдлийн багц

Бид судалгааны ажилдаа дараах өгөгдлийн багцуудыг ашигласан болно. Үүнд:

##### 3.1.1. IU Chest X-ray өгөгдлийн багц

Индиана Их Сургуулийн эмнэлгийн сүлжээний Open-I цуглуулгад хамаарах IU Chest X-ray нь оношилгооны тайлан үүсгэх судалгаанд хамгийн өргөн ашиглагддаг өгөгдлийн багц юм [7]. Энэхүү өгөгдлийн багц нь 7466 цээжний рентген зураг болон түүнд харгалзах 3826 дүрс оношилгооны тайланг агуулдаг. Өгөгдлийн багц дахь тайлан бүр нь урдаас болон хажуугаас (PA, lateral view) буюу 2 өнцгөөс авсан зурагтай. Нэг тайланд харгалзах рентген зургуудын тоо 1-ээс 5 хүртэл хэлбэлздэг. Нийт 3826 тайлангийн 83.3% нь хоёр зурагтай бөгөөд ихэнх тохиолдолд урдаас (PA байрлал) болон хажуугаас (lateral байрлал) дарсан хос зургаас бүрддэг. Нэг зурагтай тайлан 11.6%, хоёр зурагтай тайлан 83.3%, гурван зурагтай 4.7%, дөрвөн зурагтай 0.39%, таван зурагтай тайлан 0.03%-ийг тус тус эзэлж байна. IU Chest X-ray өгөгдлийн нэг тайланд харгалзах зургийн тооны тархалтын графикайг 1-р зурагт үзүүлээ.

**IU Chest X-Ray**



1-р зураг. IU Chest X-ray өгөгдлийн нэг тайланд харгалзах зургийн тооны тархалт

Өгөгдлийн текст буюу оношилгооны тайлан нь дараах багануудаас бүрдэнэ. Үүнд:

1. Title: Аль өнцгөөс цээжний рентген зургийг авсан тухай мэдээлэл
2. Indication: Шинжилгээ хийх болсон эмнэлзүйн шалтгаан, өвчтөний шинж тэмдэг
3. Findings: Рентген зургийн ажиглалт, анатомийн бүтэц болон эмгэг өөрчлөлтийн дэлгэрэнгүй тайлбар
4. Impression: Оношилгооны дүгнэлт
5. Comparison: Өмнөх оношилгоотой харьцуулж одоогийн тайланг бичсэн эсэх

##### 3.1.2. MIMIC-CXR өгөгдлийн багц

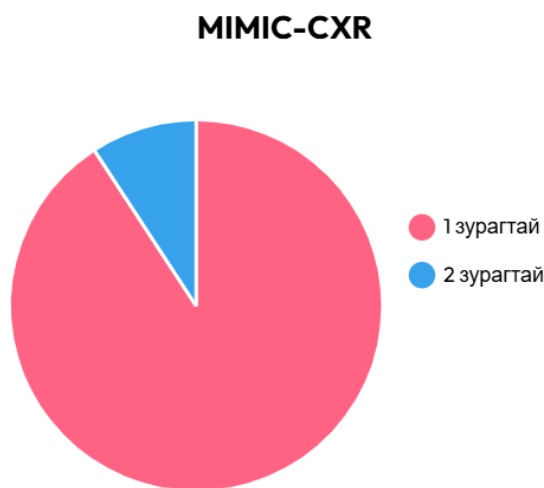
Medical Information Mart for Intensive Care-Chest X-ray (MIMIC-CXR) [8] өгөгдөл нь нийт 200 мянга

гаруй тайлан, 370 мянга гаруй зурагтай Beth Israel Deaconess Medical Center эмнэлгийн өгөгдөл юм.

Өгөгдлийн багцын оношилгооны тайлан хэсэг нь дараах багануудтай. Үүнд:

1. Indication: Шинжилгээ хийх болсон эмнэлзүйн шалтгаан, өвчтөний шинж тэмдэг
2. Technique: Зургийг аль өнцгөөс авсан тухай мэдээлэл
3. Comparison: Өмнөх оношилгоотой харьцуулж одоогийн тайланг бичсэн эсэх
4. Findings: Рентген зургийн ажиглалт, анатомийн бүтэц болон эмгэг өөрчлөлтийн дэлгэрэнгүй тайлбар
5. Impression: Оношилгооны дүгнэлт

Бид судалгаандаа MIMIC-CXR өгөгдлийн 3636 тайлан, түүнд харгалзах 3971 зургийг ашигласан. PhysioNet сайтаас өгөгдлийн багцийг татахдаа 1 зурагтай тайлан 90%, 2 зурагтай тайлан 10% байхаар шүүн сонгосон. Яагаад гэвэл тооцооллын нөөцийн хязгаарлалт (GPU санах ой, сургалтын хугацаа)-аас үүдэн олон зураг, цөөн тайлантай өгөгдлийг ашиглахаас илүүтэйгээр өвчний олон тохиолдлуудыг багтаасан олон тайлан, цөөн зураг бүхий өгөгдөл ашиглахыг зорьсон. Энэ нь тооцооллын нөөцийг хэмнэхээс гадна, загварт илүү олон эмнэлзүйн хэллэг, өвчний тохиолдлуудыг суралцах боломж олгож, сургалтын үр ашгийг нэмэгдүүлнэ гэж үзсэн. Татаж авсан MIMIC-CXR өгөгдлийн нэг тайланд харгалзах зургийн тархалтын графикийг 2-р зурагт үзүүлнэ.



2-р зураг. Татаж авсан MIMIC-CXR өгөгдлийн нэг тайланд харгалзах зургийн тооны тархалт

### 3.2. Өгөгдлийн урьдчилсан боловсруулалт

Загварын сургалтад бэлтгэхийн өмнө зураг болон текст өгөгдөлд урьдчилсан боловсруулалт хийсэн.

#### 3.2.1. Зурган өгөгдлийн урьдчилсан боловсруулалт

Зургуудыг харааны трансформер архитектурт тохируулах зорилгоор дараах урьдчилсан боловсруулалтыг хийсэн.

- Бүх зургуудыг ижил хэмжээтэй (224×224) болгосон.
- Зургийн pixel утгууд 0-255 ын хооронд байсныг ToTensor() функц ашиглан 0-1 хооронд болгосон. Энэ төрлийн масштабчлал нь мэдрэлийн сүлжээний сургалтын тогтвортой байдлыг сайжруулдаг стандарт урьдчилсан боловсруулалтын арга юм [9].
- ImageNet стандартчиллын дагуу normalize хийсэн. ImageNet стандартчилал гэдэг нь зургийн RGB сувгийн пикселийн утгуудыг ImageNet өгөгдлийн багц дээр ашиглагдсан дундаж болон стандарт хазайлтын утгаар стандартчилахыг хэлнэ.

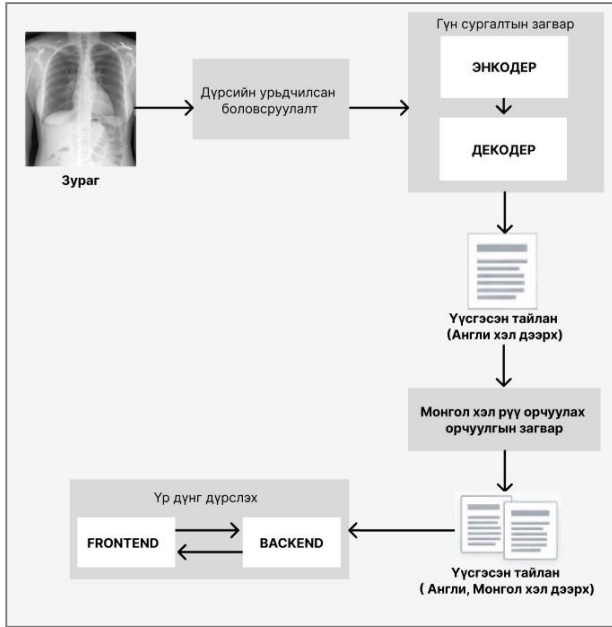
#### 3.2.2. Текст өгөгдлийн урьдчилсан боловсруулалт

- Бүх цифр болон тусгай тэмдэгтүүдийг устгасан.
- Жижиг үсэг болгосон.
- “өмнөх тайлантай харьцуулахад”, “сайжирсан/муудсан байна” гэх мэт зурагт шууд харагдахгүй мэдээлэл байсан тул “comparison, compared, prior, previous, earlier” гэх түлхүүр үгсийг агуулсан өгүүлбэрүүдийг хассан.
- Мөн өвчтөнд санал болгосон эмчилгээ, “СТ авхуулах хэрэгтэй” гэх мэт зөвлөмж агуулсан өгүүлбэрүүдийг хассан.
- Зурагтай огт холбоогүй “email, contact, call, telephone” гэх мэт үгийг агуулсан өгүүлбэрүүдийг устгасан.
- Эмнэлзүйн ач холбогдол хамгийн өндөр “Findings” болон “Impression” багануудыг нэгтгэн “Summary” нэртэй шинэ багана үүсгэж, загварын зорилтот багана болгон ашигласан.

### 3.3 Загварын архитектур

Энэхүү цээжний рентген зургаас оношилгооны тайлан үүсгэх систем нь энкодер-декодер архитектурт суурилсан бөгөөд дүрсний онцлог гаргах энкодер модуль болон текст үүсгэх декодер модулиас бүрдэнэ. Мөн энкодер-декодер загвараас гарсан англи текстийг монгол хэл рүү орчуулах модулийг нэмж өгснөөр загварын үүсгэсэн тайланг хоёр хэл дээр харах боломжийг бүрдүүлж, эмнэлзүйн практикт хэрэглэх цар хүрээг өргөжүүлсэн.

3-р зурагт системийн үйл ажиллагааны диаграммыг дүрслэн харуулав.



3-р зураг. Системийн үйл ажиллагааны диаграмм

3.3.1 Энкодер

Бид судалгаандаа цээжний рентген зургаас онцлог шинжийг илүү үр дүнтэй ялган авах энкодерийг тодорхойлох зорилгоор дөрвөн өөр харааны архитектурыг туршсан. Үүнд:

1. Vision Transformer (ViT)

ViT нь дүрсний шинжилгээнд зориулсан шинэ төрлийн трансформер загвар бөгөөд зургуудыг self-attention механизм ашиглан боловсруулдаг [10]. Оролтын зургийг тогтмол хэмжээтэй жижиг хэсгүүд болгон хуваадаг. Ингэснээр загвар нь зургийн жижиг локал хэсгүүдийг бие даан боловсруулах боломжтой болдог. Дараа нь зургийн жижиг хэсэг бүрийг шугаман проекцын (linear projection) давхаргаар дамжуулж, бага хэмжээст вектор төлөөлөл болгон хувиргана. Энэхүү embedding процесс нь зургийн жижиг хэсэг бүрийн чухал мэдээллийг хадгалж авдаг.

Embedding хийгдсэн жижиг хэсгүүдийг (patch) трансформер энкодерийн давхаргууд руу оруулна. Эдгээр давхаргууд нь self-attention механизм ашиглан жижиг хэсгүүдийн хоорондын хамаарлыг тодорхойлж, зургийн глобал контекстийг барьж авдаг.

Бид судалгаандаа ViT загварын “vit\_base\_patch16\_224” хувилбарыг ашигласан.

2. Bidirectional Encoder Representations from Image Transformers (BEiT)

BEiT нь BERT загвартай адил урьдчилсан сургалтыг дүрсний трансформерт хэрэгжүүлсэн аргачлал юм. BERT өгүүлбэр доторх үгийг mask хийдэгтэй адил BEiT нь зураг доторх patch-уудыг mask хийдэг [11]. Дараа нь загвар нь mask хийгдсэн хэсгийг үлдсэн харагдаж буй patch-ууд дээр тулгуурлан таамагладаг. Энэ процесс нь зургийн хэсгүүдийн хоорондын хамаарлыг ойлгож, контекстийн гүнзгий ойлголт үүсгэхэд тусалдаг. Стандарт ViT нь нэг чиглэлт энкодер ашигладаг бол

BEiT нь хоёр чиглэлт (bidirectional) трансформер энкодер ашигладаг бөгөөд энэ нь контекстийг илүү бүрэн ойлгох боломж олгодог.

Бид судалгаандаа “beit\_base\_patch16\_224” хувилбарыг ашигласан.

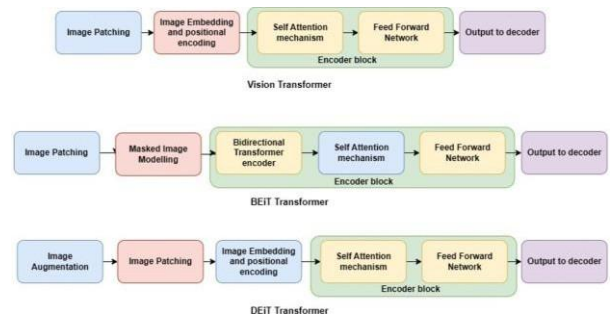
3. Data Efficient Image Transformer (DEiT)

DEiT нь зураг ангилал болон бусад компьютер харааны даалгаварт зориулагдсан Vision Transformer (ViT)-ийн сайжруулсан хувилбар бөгөөд шошготой өгөгдөл бага үед ч үр дүнтэй суралцах зорилготой архитектур юм. Стандарт ViT-тэй адил трансформер энкодерийг feature extractor болгон ашигладаг [5]. Зургийг patch-ууд болгон хувааж, бага хэмжээст embedding орон зайд хувиргана.

DEiT нь Transformer encoder-ийн бага зэрэг өөрчлөгдсөн feed-forward давхаргуудыг ашигласнаар тооцооллын үр ашгийг сайжруулсан [5]. DEiT загвар нь зарим CNN архитектуртай харьцуулахад сургалтын хувьд илүү тооцооллын зардалтай байж болох ч өгөгдлийн үр ашиг өндөр тул бага хэмжээний сургалтын өгөгдлөөр сайн гүйцэтгэл үзүүлэх боломжтой.

Бид судалгаандаа “deit\_base\_patch16\_224” хувилбарыг ашигласан.

4-р зурагт эдгээр гурван энкодерийн архитектурыг харьцуулсан диаграммыг харуулав.

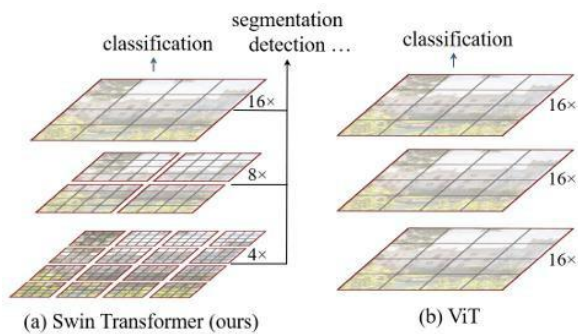


4-р зураг. ViT, BEiT, DEiT

4. Swin трансформер

Swin Transformer нь шаталсан бүтэцтэй энкодер архитектур бөгөөд shifted window self-attention механизмыг ашиглан локал болон глобал орон зайн хамаарлыг үр дүнтэй загварчилдаг. Энэ нь уламжлалт Vision Transformer (ViT)-тэй харьцуулахад илүү тооцооллын үр ашигтай бөгөөд өндөр нягтаршилтай дүрсний онцлогийг шаталсан бүтэцтэйгээр гарган авах чадвартай. [12]

5-р зурагт Swin болон ViT трансформеруудын архитектурын ялгааг харуулав.



5-р зураг. Swin, ViT ялгаа

Swin трансформерийн ажиллах зарчим :

1. Patch Partitioning болон Linear Embedding

Оролтын зураг  $I$ -г давхцахгүй (non-overlapping)  $M \times M$  хэмжээтэй хэсгүүдэд хуваана. Дараа нь эдгээр patch-уудыг тэгшлэн (flatten) шугаман embedding давхаргад оруулна.

Шугаман embedding давхарга нь тэгшлэгдсэн patch бүрийг  $C$  хэмжээт feature орон зай руу проекцлон хувиргана. Ингэснээр patch бүр нь онцлог вектор бүхий token болж хувирна.

1-р тэгшитгэл нь токenuудын тоо  $N$ -ыг тооцоолно.

$$N = \frac{H \times W}{M^2} \quad (1)$$

Энд:

- $H, W$  - feature map-ийн өндөр ба өргөн
- $M$  - patch-ийн хэмжээ

2. Window-based Multi-head Self-Attention (W-MSA)

Swin Transformer нь window-based multi-head self-attention механизмыг ашигладаг бөгөөд self-attention нь давхцахгүй жижиг цонхнууд дотор тооцогдоно.

Глобал multi-head self-attention (MSA) болон window-based self-attention (W-MSA)-ийн тооцооллын нарийвчлал (complexity) дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ. 2-р тэгшитгэлд глобал MSA-ийн нарийвчлалын томъёог, 3-р тэгшитгэлд W-MSA-ийн тооцооллын нарийвчлалын томъёог бичив.

$$V(MSA) = 4hwC^2 + 2(hw)^2C \quad (2)$$

$$(V - MSA) = 4hwC^2 + 2M^2hwC \quad (3)$$

Энд:

- $h, w$  - feature map-ийн өндөр ба өргөн
- $M$  - Цонхны хэмжээ

Эдгээр тэгшитгэлийн эхний гишүүн нь query, key, value тооцоолох зардлыг илэрхийлнэ. Харин хоёр дахь гишүүн нь attention тооцооллын зардлыг илэрхийлдэг.

Window-based attention ашигласнаар тооцооллын зардал мэдэгдэхүйц буурдаг.

3. Shifted Window-based Multi-head Self-Attention (SW-MSA)

SW-MSA нь Swin Transformer-ийн онцлог механизм бөгөөд цонхнуудын хооронд мэдээлэл

солилцох боломжийг бүрдүүлдэг. Дараалсан давхаргуудын хооронд цонхнуудыг  $M/2$  пикселээр шилжүүлдэг. Ингэснээр өмнө нь тусгаарлагдсан байсан цонхнуудын токenuуд хоорондоо харилцан үйлчлэх боломжтой болдог.

4. Patch Merging

Шат бүрийн дараа patch merging ашиглан feature map-ийн нягтралыг багасгаж (downsample), харин feature хэмжээсийг нэмэгдүүлдэг. Ингэснээр Swin Transformer нь шаталсан бүтэцтэй болж, уламжлалт CNN архитектуртай төстэй олон түвшний дүрсний төлөөллийг үүсгэдэг.

3.3.2. Декодер

Энкодeроос гарсан дүрсний төлөөлөл нь projection буюу conditioning механизмаар декодерийн token embedding орон зайтай уялдуулан холбогдож, декодер нь дараалсан байдлаар оношилгооны тайланг үүсгэнэ. Бид нөөцийн хязгаарлалтын асуудлыг харгалзан үзэн GPT2 архитектурын хөнгөн хувилбар болох DistilGPT загварыг декодер болгон ашигласан. Мөн анагаах ухааны домэйн текст өгөгдөл дээр урьдчилан сургагдсан трансформер хэлний загвар болох BioGPT загварыг декодерт туршсан.

1. DistilGPT

DistilGPT нь GPT-2-ийн хэлний загварын чадварыг хадгалсан боловч:

- Параметрийн тоо багассан
- Сургалтын хурд нэмэгдсэн
- GPU санах ой бага ашигладаг загвар юм.

Distillation гэдэг нь том загварын мэдлэгийг жижиг загварт шилжүүлэн, гүйцэтгэлийг хадгалж, хэмжээг багасгах арга юм [13]. DistilGPT2 загвар нь текстийг боловсруулахдаа Byte Pair Encoding (BPE) хэмээх токenuуулалтын алгоритмыг ашигладаг бөгөөд 50,257 токеноос бүрдэх үгийн сангай.

DistilGPT нь авторегрессив буюу дараагийн токенийг таамаглах 6 трансформер блок, 82 сая гаруй параметртэй загвар юм.

2. BioGPT

BioGPT нь био-анагаах ухааны салбарт зориулсан генератив трансформер хэлний загвар бөгөөд PubMed онлайн мэдээллийн сангийн анагаахын шинжлэх ухааны 15 сая орчим өгүүлэлд дээр урьдчилан сургагдсан.

Энэхүү загвар нь үгийн сангаа үүсгэхдээ byte pair encoding (BPE) аргыг ашигласан бөгөөд нийт үгийн хэмжээ 42,384 байна.

BioGPT нь GPT-2 архитектур дээр суурилсан трансформер загвар бөгөөд оролтын дарааллыг Query(Q), Key(K), Value(V) вектор болгон хувиргаж, attention тооцоолол хийдэг [14]. Multi-head attention механизм нь хэд хэдэн attention head-үүдийг зэрэг ажиллуулж, тэдгээрийн үр дүнг нэгтгэн гаргадаг. Үүнийг 4-р тэгшитгэлд үзүүлсэн бөгөөд тус бүрийн head-ийн attention тооцооллыг 5-р тэгшитгэлээр илэрхийлнэ.

$$MultiHead(Q, K, V) = Concat(head_1, head_2, \dots, head_h)W \tag{4}$$

$$head_i = softmax\left(\frac{Q_i K_i^T}{\sqrt{d}}\right) V_i \tag{5}$$

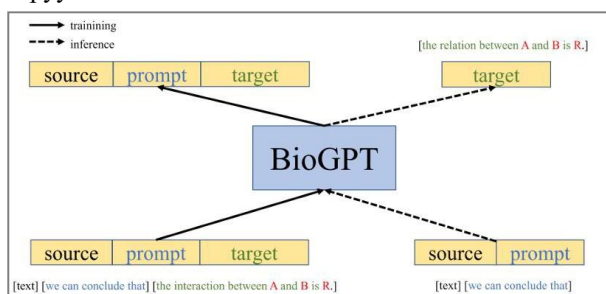
Энд:

- $h$  — attention head-ийн тоо
- $d$  — feature хэмжээ
- $W$  — шугаман хувиргалтын параметр

Мөн BioGPT нь стандарт хэлний загварчлалын зорилгоор сургагдсан. Сургалтын зорилго нь дараагийн токены магадлалыг хамгийн их байхаар negative log-likelihood-ийг минимумчлах бөгөөд үүнийг 6-р тэгшитгэлд үзүүлэв.

$$\min - \sum \log P(s_j | s_{j-1}, \dots, s_1) \tag{6}$$

6-р зурагт BioGPT загварын ажиллах зарчмыг харууллаа.



6-р зураг. BioGPT архитектур

### 3.3.3. Орчуулгын загвар

Энэхүү системд encoder–decoder архитектураар үүсгэсэн англи хэл дээрх оношилгооны тайланг монгол хэл рүү орчуулах зорилгоор Gemini API-д суурилсан орчуулгын модулийг багтаасан.

Орчуулгын модулийг Google-ийн Gemini 2.5 Pro загварыг API хэлбэрээр ашиглан хэрэгжүүлсэн. Gemini нь Google DeepMind-ийн боловсруулсан том хэмжээний multimodal генератив хэлний загвар бөгөөд текст, зураг болон бусад төрлийн мэдээллийг ойлгож боловсруулах чадвартай. Мөн олон хэлний дэмжлэгтэй тул мэргэжлийн болон эмнэлзүйн нэр томъёог контекстийн дагуу орчуулах боломжтой [15].

Орчуулгын урсгал нь дараах бүтэцтэй. Үүнд:

1. Декодироос англи хэл дээрх тайлан үүснэ.
2. Үүсгэсэн тайланг Gemini API-д илгээж, prompt ашиглан орчуулна.
3. Орчуулсан монгол тайланг системийн frontend талд харуулна.

### 3.4. On-the-fly Data augmentation

On-the-fly data augmentation нь сургалтын өгөгдлийг санамсаргүй хувиргалтууд хийж, шинэ хувилбарууд үүсгэн өгөгдлийн олон янз байдлыг нэмэгдүүлэх арга юм. Энэ нь бодит өгөгдлийн хэмжээг физикээр нэмэхгүй боловч сургалтын явцад өгөгдлийн өөр өөр хувилбаруудыг үүсгэснээр загварын ерөнхийлөх чадварыг сайжруулж, overfitting-ээс сэргийлэхэд чиглэнэ [16].

Энэхүү судалгаанд сургалтын өгөгдлийн олон янз байдлыг нэмэгдүүлж, загварын ерөнхийлөх чадварыг сайжруулах зорилгоор on-the-fly data augmentation аргыг хэрэглэсэн.

Data augmentation-ийг цээжний рентген зургаас тайлбар үүсгэх даалгаварт дараах 2 янзаар хийж болно. Үүнд:

1. Текст буюу рентген зургийн тайланд augmentation хийх нь үгсийг ижил утгатай үгээр солих, тухайн өгүүлбэрт холбогдох үг нэмэх, зарим ач холбогдол багатай үгийг хасах зэргээр нэг өгүүлбэрийг өөр өөр болгон хувиргадаг.
2. Цээжний рентген зурагт augmentation хийх нь тухайн зургийн өнцгийг эргүүлэх, гэрэл сүүдрийг өөрчлөх, жижгэрүүлж томруулах замаар зургийн өөр хувилбарыг үүсгэнэ.

Энэхүү судалгаанд зурган өгөгдөлд augmentation хийхийг сонгосон. Учир нь оношилгооны тайлан нь нарийн эмнэлзүйн утгатай бөгөөд нэг үгийг л өөрчлөхөд өгүүлбэрийн утга алдагдах улмаар оношны утга өөрчлөгдөх эрсдэлтэй. Харин зурган өгөгдөлд жижиг өөрчлөлт орсон ч объектын семантик утга өөрчлөгдөхгүй [16]. Өөрөөр хэлбэл, цээжний рентген зураг нь бага зэрэг хазайсан, гэрэлтүүлэг нь их эсвэл бага байж болох бөгөөд эдгээр өөрчлөлтүүд нь оношны үндсэн агуулгыг өөрчлөхгүй. Иймээс цээжний рентген зургаас оношилгооны тайлан үүсгэх энэхүү даалгаварт зурган өгөгдөлд augmentation хийх нь эрсдэл багатай.

On-the-fly data augmentation-ийг сургалтын явцад геометр болон гэрэлтүүлгийн санамсаргүй өөрчлөлтүүдийг дараах параметруудийн тохиргоотойгоор хэрэгжүүлсэн.

Геометрийн өөрчлөлт:

- $\pm 5^\circ$  эргүүлэх → зураг бага зэрэг хазайж орно
- $\pm 2\%$  шилжүүлэх → зургийг бага зэрэг дээш/доош/зүүн/баруун хөдөлгөнө
- 0.95–1.05 масштаблах → 5% орчим томруулах/жижигсүүлэх

Гэрэлтүүлгийн өөрчлөлт:

- Гэрэлтүүлэг  $\pm 8\%$  → зураг бага зэрэг бүдэг эсвэл тод болно
- Контраст  $\pm 12\%$  → уушгины нягтрал илүү тод/зөөлөн харагдана

Геометр болон гэрэлтүүлгийн өөрчлөлтийн магадлалуудыг (p) өөр өөр утгуудаар туршиж, баталгаажуулалтын багц дээр гүйцэтгэлийг харьцуулан үнэлсэн.

Эдгээр хувиргалтууд нь зөвхөн сургалтын багцад хийгдэж, баталгаажуулалт болон тестийн багц дахь зургуудыг өөрчлөлгүйгээр хадгалсан.

### 3.5. Туршилтын тохиргоо

#### 3.5.1. Өгөгдлийн хуваалт

Энэхүү судалгааны эхний туршилтыг зөвхөн IU Chest X-ray өгөгдөл дээр хийж, дараа нь MIMIC-CXR

өгөгдлийг алхамчилсан байдлаар нэмэх замаар загварын гүйцэтгэлийн өөрчлөлтийг судалсан.

Туршилтыг дараах дарааллаар гүйцэтгэсэн.

1. **Туршилт 1** – зөвхөн IU Chest X-ray өгөгдөл дээр загварыг сургаж туршсан.
2. **Туршилт 2** – IU Chest X-ray өгөгдөл дээр MIMIC-CXR өгөгдлөөс 2000 зураг нэмэн загварыг дахин сургаж туршсан. Ингэхдээ текст өгөгдөлд ямар нэгэн цэвэрлэгээ хийгээгүй.
3. **Туршилт 3** – MIMIC-CXR өгөгдлөөс 2000 зурагт харгалзах тайлан буюу текст өгөгдөлд цэвэрлэгээ хийж, рентген зурагтай холбоогүй үг болон өгүүлбэрүүдийг хасахад 1938 зурагтай өгөгдлийн багц болсон. Үүнийг IU Chest X-ray өгөгдөл дээр нэмж загварыг дахин сургасан.
4. **Туршилт 4** – IU Chest X-ray өгөгдөл дээр MIMIC-CXR өгөгдлөөс дахин 2033 зураг, түүнд харгалзах тайлангуудыг нэмэн загварыг сургаж туршсан.

Эдгээр туршилтуудыг хийснээр сургалтын өгөгдлийн хэмжээ нэмэгдэхэд загварын гүйцэтгэл хэрхэн өөрчлөгдөж байгааг харьцуулан судлах боломж бүрдсэн.

1-р хүснэгтэд туршилт бүрд хэрэгжүүлсэн өгөгдлийн хуваалтыг харуулав.

1-Р ХҮСНЭГТ. ӨГӨГДЛИЙН ХУВААЛТ

ТУРШИЛТ	Өгөгдөл	Нийт	Сургалт (80%)	Баталгаа жуулалт (10%)	Тест (10%)
1	IU	3826 тайлан, 7466 зураг	3062 тайлан, 5954 зураг	382 тайлан, 758 зураг	382 тайлан, 754 зураг
2	IU + MIMIC (цэвэрлэ эгүй)	5639 тайлан, 9466 зураг	4523 тайлан, 7555 зураг		
3	IU + MIMIC (цэвэрлэсэн)	5589 тайлан, 9404 зураг	4505 тайлан, 7514 зураг		
4	IU + MIMIC (цэвэрлэсэн)	7462 тайлан, 11437 зураг	6698 тайлан, 9925 зураг		

### 3.5.2. Загварын параметруудийн тохиргоо

2-р хүснэгтэд загварын параметруудийн тохиргоог харуулав.

2-Р ХҮСНЭГТ. ЗАГВАРЫН ПАРАМЕТРУУДИЙН ТОХИРГОО

Бүлэг	Параметрийн тохиргоо	
Vision Encoder	Оролтын зургийн хэмжээ	224×224

Бүлэг	Параметрийн тохиргоо	
	Patch size	16x16
	Hidden dimension	768
Language Decoder	Max token length	128
	Hidden size	768 (DistilGPT), 1024 (BioGPT)
Training	Batch size	4
	Learning rate	5e-5
	Optimizer	AdamW
	Epoch	4
	Loss function	Cross-entropy

### 3.6. Үнэлгээний хэмжүүрүүд

#### 3.6.1. Үгийн түвшний үнэлгээний хэмжүүр

Цээжний рентген зургаас тайлан үүсгэх загварын гаргасан текстийг үнэлэхдээ бодит тайлан болон загварын үүсгэсэн тайлан хоорондын төстэй байдлыг хэмжих үгийн түвшний дараах хэмжүүрүүдийг ашигласан.

1. BLEU (Bilingual Evaluation Understudy)

BLEU нь машин орчуулгын системийг үнэлэх зорилгоор Papineni [17] нарын санал болгосон автомат үнэлгээний арга бөгөөд загварын үүсгэсэн текст болон reference текстийн n-gram давхцалыг хэмжих зарчимд тулгуурладаг.

Энэ судалгаанд дараах BLEU хувилбаруудыг ашигласан:

- BLEU-1 – unigram (1 үг) давхцалыг хэмжинэ
  - BLEU-2 – bigram (2 үг) давхцалыг хэмжинэ
  - BLEU-3 – trigram (3 үг) давхцалыг хэмжинэ
  - BLEU-4 – 4-gram (4 үг) дарааллын давхцалыг хэмжинэ
2. METEOR (Metric for Evaluation of Translation with Explicit ORdering)

METEOR хэмжүүрийг Banerjee болон Lavie нар [18] BLEU-ийн сул талуудыг сайжруулах зорилгоор санал болгосон. Энэ хэмжүүр нь precision болон recall хоёрыг хамтад нь авч үздэг бөгөөд үгийн дараалал, утгын ойролцоо байдал зэргийг харгалзан үздэг.

METEOR нь дараах шинж чанартай:

- unigram тохирлыг хэмждэг
- precision болон recall-ийг хослуулдаг
- stemming болон synonym matching-ийг дэмждэг

Иймээс BLEU-тэй харьцуулахад хүний үнэлгээтэй илүү сайн уялддаг гэж үздэг.

3. ROUGE (Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluation)

ROUGE хэмжүүрийг Lin [19] текстийн автомат хураангуйллын системийг үнэлэх

зорилгоор санал болгосон бөгөөд reference болон үүсгэсэн текстийн n-gram recall-ийг хэмждэг.

Дараах ROUGE хэмжүүрүүдийг ашигласан.

- ROUGE-1 – unigram давхцалыг хэмжинэ
- ROUGE-2 – bigram давхцалыг хэмжинэ
- ROUGE-L – хамгийн урт нийтлэг дараалал (Longest Common Subsequence)-ийг хэмжинэ

ROUGE-L нь үгийн дарааллын бүтцийг илүү сайн тусгадаг тул текстийн семантик бүтцийн төстэй байдлыг үнэлэхэд ашиглагддаг.

**3.6.2. Эмнэлзүйн үнэлгээний хэмжүүр**

Цээжний рентген зургаас оношилгооны тайлан үүсгэх даалгаварт зөвхөн үгийн түвшний төстэй байдлыг хэмжих нь хангалтгүй байдаг. Учир нь үгсийн төстэй байдал өндөр байсан ч эмнэлзүйн мэдээлэл буруу байх боломжтой. Иймээс судалгаанд үүсгэсэн тайлангийн эмнэлзүйн зөв байдлыг үнэлэх зорилгоор CheXbert болон RadGraph-д суурилсан хэмжүүрүүдийг ашигласан.

**1. CheXbert F1**

CheXbert нь цээжний рентген зургийн тайлангаас эмнэлзүйн шинж тэмдгүүдийг автоматаар тодорхойлох зорилготой нейрон сүлжээнд суурилсан ангилагч юм. Энэ арга нь үүсгэсэн тайлан болон бодит тайлангаас 14 төрлийн ажиглалтыг илрүүлэн харьцуулж F1-score хэлбэрээр үнэлгээ өгдөг [20]. 3-р хүснэгтэд тэдгээр 14 төрлийн ажиглалтыг харуулав.

3-р хүснэгт. CHEXBERT АЖИГЛАЛТУУД

Ажиглалтууд	
Pneumonia	Уушгины хатгалгаа
Fracture	Ясны хугарал
Consolidation	Уушгины нягтаршил
Enlarged Cardiom	Зүрх болон медиастины томрол
No finding	Эмгэг өөрчлөлт илрээгүй
Pleural Other	Гялтангийн бусад эмгэг
Cardiomegaly	Зүрх томрол
Pneumothorax	Уушгины хийн хуралдалт
Atelectasis	Уушги агшилт
Support Devices	Эмнэлгийн төхөөрөмж
Edema	Хаван
Pleural Effusion	Гялтангийн шингэн
Lung Lesion	Уушгины гэмтэл
Lung Opacity	Уушгины сүүдэр

**2. RedGraph F1**

RadGraph нь тайлан дахь эмнэлзүйн энтити болон тэдгээрийн хоорондын харилцааг тодорхойлох зорилготой мэдлэгийн граф дээр суурилсан арга юм [21]. Энэ арга нь тайлангийн

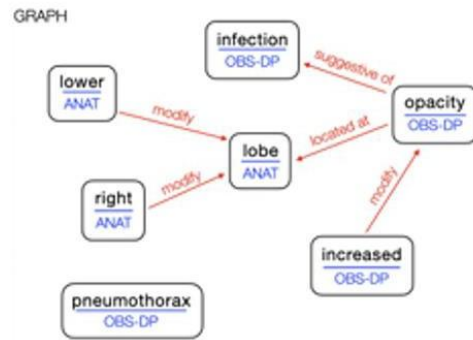
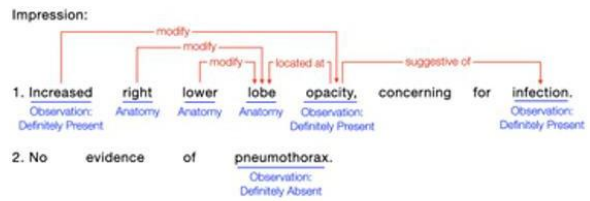
доторх эмнэлзүйн ойлголтуудыг граф бүтэц болгон илэрхийлж, бодит болон үүсгэсэн тайлангийн хоорондын семантик төстэй байдлыг хэмждэг.

RadGraph арга нь тайлан дахь эмнэлзүйн ойлголтууд (жишээ нь: эмгэг, анатомийн бүтэц, ажиглалт) болон тэдгээрийн хоорондын холбоог entity–relation граф хэлбэрээр илэрхийлдэг.

Энд:

- entity → эмнэлзүйн ойлголт (opacity, effusion гэх мэт)
- relation → ойлголтуудын хоорондын холбоо (located\_at)

7-р зурагт RedGraph аргын жишээг харуулав.



7-р зураг. RedGraph жишээ

Уламжлалт текстийн хэмжүүрүүд (BLEU, ROUGE) нь зөвхөн үгсийн давхцалыг хэмждэг. Харин RadGraph F1 нь:

- эмнэлзүйн ойлголтууд
- анатомийн бүтэц
- эмгэгүүдийн холбоо зэрэг утгыг харгалзан үздэг.

**IV. ҮР ДҮН**

**4.1. Энкодер-Декодер хослолын харьцуулалт**

Эхний туршилтад IU Chest X-ray өгөгдлийн багц дээр 4 харааны энкодер болох Swin, ViT, DEiT, BeiT болон 2 хэлний декодер болох DistilGPT, BioGPT-ийн нийт 8 хослолыг сурган гүйцэтгэлийг үнэлэв. Үгийн түвшний хэмжүүрүүдийн үнэлгээг 4-р хүснэгтэд эмнэлзүйн хэмжүүрүүдийн үнэлгээг 5-р хүснэгтэд харуулав.

4-р хүснэгтэд үзүүлсэн үгийн түвшний хэмжүүрүүдийн үр дүнг харьцуулахад энкодер-декодер архитектурын сонголт нь тайлан үүсгэх загварын гүйцэтгэлд тодорхой нөлөө үзүүлж байгааг харж болно.

1. Эдгээр энкодер-декодер хослолоос Swin + BioGPT загвар хамгийн сайн үр дүн үзүүлсэн

байна. Энэхүү загвар нь BLEU-1 (0.7266), BLEU-4 (0.5028), METEOR (0.404), ROUGE-1 (0.7416) зэрэг бүх үгийн түвшний хэмжүүрүүд дээр хамгийн өндөр оноог үзүүлсэн. Энэ нь Swin Transformer-ийн шаталсан бүтэц нь зургийн орон зайн нарийн мэдээллийг илүү сайн хадгалж, BioGPT decoder нь эмнэлзүйн текстийн хэлбэрийг илүү сайн үүсгэж байгааг харуулж байна.

2. Дараагийн хамгийн сайн гүйцэтгэлтэй загвар нь DEiT + BioGPT байна. Энэ загвар BLEU-2 (0.6024), BLEU-3 (0.5316), ROUGE-2 (0.5357) зэрэг хэмжүүрүүд дээр өндөр гүйцэтгэл үзүүлсэн. Энэ нь DEiT encoder нь рентген зургийн дүрсийн онцлогийг илүү сайн ялган сурч, текст decoder-д илүү чанартай feature дамжуулж байгааг илтгэнэ.
3. BioGPT декодер ашигласан загварууд DistilGPT декодертой загваруудтай харьцуулахад илүү өндөр үзүүлэлт үзүүлсэн байна. Энэ нь BioGPT загвар нь biomedical болон clinical текст дээр урьдчилан сургасан тул оношилгооны тайлан үүсгэх даалгаварт илүү тохиромжтой байж болохыг харуулж байна.

4-р хүснэгтэд туршилтын үр дүнгийн үгийн түвшний хэмжүүрүүдийг харууллаа.

4-Р ХҮСНЭГТ. ҮГИЙН ТҮВШНИЙ ХЭМЖҮҮРҮҮД

Загвар	Үгийн түвшний хэмжүүрүүд							
	BLEU-1	BLEU-2	BLEU-3	BLEU-4	METEOR	ROUGE-1	ROUGE-2	ROUGE-L
Swin+ Distil GPT	0.6955	0.5879	0.5164	0.4637	0.378	0.7185	0.5265	0.6827
ViT+ Distil GPT	0.6949	0.589	0.5177	0.4659	0.379	0.7159	0.529	0.6833
DEiT+ Distil GPT	0.70	0.5948	0.5246	0.4737	0.381	0.7203	0.5365	0.6866
BEiT+ Distil GPT	0.6948	0.5892	0.5205	0.4673	0.378	0.7177	0.5311	0.6846
ViT+BioGPT	0.698	0.578	0.4993	0.4422	0.379	0.7152	0.5057	0.6757
BEiT+BioGPT	0.7104	0.5993	0.5241	0.4708	0.388	0.7269	0.5353	0.6894
DEiT+BioGPT	0.7104	0.6024	0.5316	0.4791	0.389	0.7253	0.5357	0.6901
Swin+BioGPT	0.7266	0.6208	0.5527	0.5028	0.404	0.7416	0.5555	0.7056

8-р зурагт туршилтын үр дүнгийн үгийн түвшний хэмжүүрүүдийг график хэлбэрээр харууллаа.



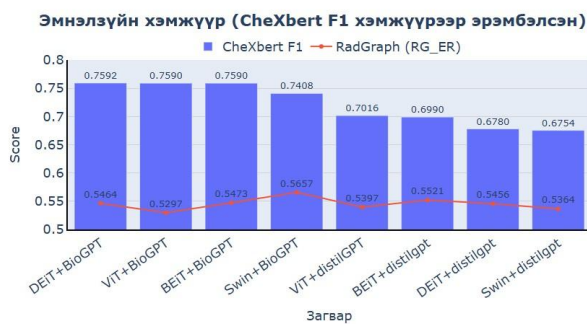
8-р зураг. 8 энкодер-декодерын үгийн түвшний хэмжүүр

5-р хүснэгтэд туршилтын үр дүнгийн эмнэлзүйн хэмжүүрүүдийг харууллаа.

5-Р ХҮСНЭГТ. ЭМНЭЛЗҮЙН ХЭМЖҮҮРҮҮД

Загвар	Эмнэлзүйн хэмжүүр	
	CheXbert F1	RG_ER F1
Swin+ DistilGPT	0.6754	0.5364
ViT+ DistilGPT	0.7016	0.5397
DEiT+ DistilGPT	0.678	0.5456
BEiT+ DistilGPT	0.699	0.5521
ViT+BioGPT	0.759	0.5297
BEiT+BioGPT	0.759	0.5473
DEiT+BioGPT	0.7592	0.5464
Swin+BioGPT	0.7408	0.5657

9-р зурагт туршилтын үр дүнгийн эмнэлзүйн хэмжүүрүүдийг график хэлбэрээр харууллаа.



9-р зураг. 8 энкодер-декодерын эмнэлзүйн хэмжүүр

5-р хүснэгт болон 9-р зурагт үзүүлсэн эмнэлзүйн хэмжүүрүүд нь энкодер-декодер ялгаатай хослолуудаас хамааран өөр үзүүлэлттэй байна.

1. Эмнэлзүйн хэмжүүрийн хувьд BioGPT декодер ашигласан загварууд илүү өндөр гүйцэтгэл үзүүлж байгаа буюу эмнэлзүйн хувьд илүү үнэн зөв тайланг үүсгэж байна.
2. CheXbert F1 хэмжүүрийн хувьд DEiT + BioGPT загвар хамгийн өндөр гүйцэтгэл (0.7592) үзүүлсэн нь энэхүү загвар эмнэлзүйн энтитиг илүү зөв илэрхийлсэн тайланг үүсгэж байгааг илтгэнэ.
3. RG\_ER F1 хэмжүүрийн хувьд Swin + BioGPT загвар хамгийн өндөр үзүүлэлт (0.5657) үзүүлсэн нь энэхүү эмнэлзүйн

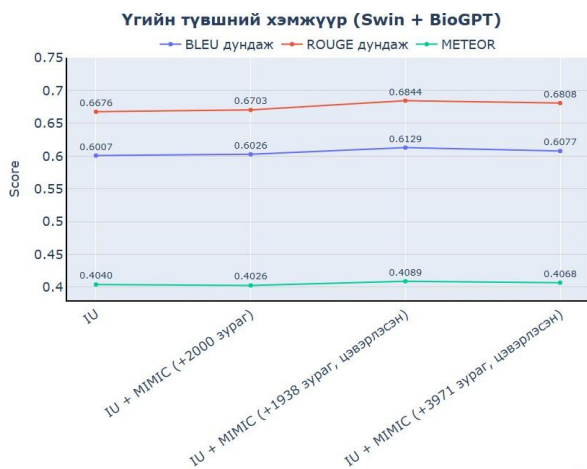
энтити болон тэдгээрийн хоорондын харилцааг илүү сайн гаргаж ирж байгааг илтгэнэ.

Эдгээр үр дүнгээс харахад DEiT + BioGPT болон Swin + BioGPT загварууд үгийн түвшний болон эмнэлзүйн хэмжүүрүүд дээр хамгийн өндөр гүйцэтгэлтэй байгаа тул дараагийн өгөгдөл нэмэгдүүлэх туршилтыг энэ хоёр загвар дээр гүйцэтгэсэн.

**4.2. Өгөгдлийн хэмжээг нэмэгдүүлэх туршилт**

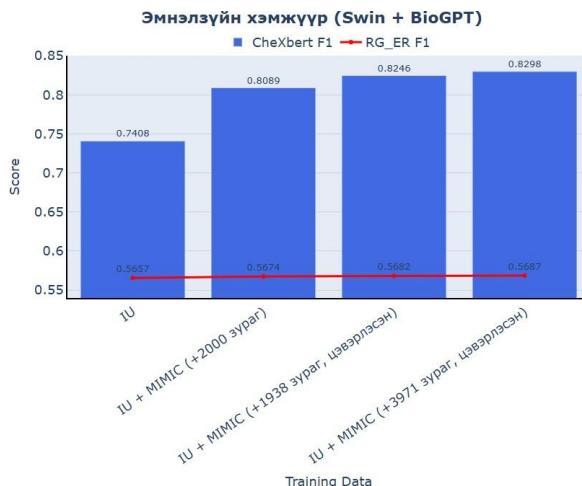
**4.2.1. Swin + BioGPT**

Өгөгдлийн хэмжээг нэмэгдүүлэх туршилтыг хийж гүйцэтгэн Swin + BioGPT загварын гүйцэтгэлийн үгийн түвшний хэмжүүрийг 10-р зурагт, эмнэлзүйн хэмжүүрийг 11-р зурагт үзүүлэв.



10-р зураг. Үгийн түвшний хэмжүүр Swin + BioGPT загвар

10-р зурагт үзүүлснээр анхны IU өгөгдөл дээр сургасан загварын BLEU дундаж 0.60 орчим, ROUGE дундаж 0.66 орчим, METEOR 0.40 байсан байна. Харин MIMIC өгөгдлийг нэмснээр үгийн түвшний хэмжүүрүүд мэдэгдэхүйц биш ч бага зэрэг өсөх хандлагатай байна. Ялангуяа MIMIC-CXR өгөгдлийн текстийг цэвэрлэснээр гүйцэтгэл нэмэгдэж байна. Энэ нь өгөгдлийн хэмжээ нэмэгдэх тусам гүйцэтгэл тодорхой хэмжээнд сайжирдаг боловч өгөгдлийн чанар мөн адил чухал нөлөөтэй болохыг харуулж байна.



11-р зураг. Эмнэлзүйн хэмжүүр Swin + BioGPT загвар

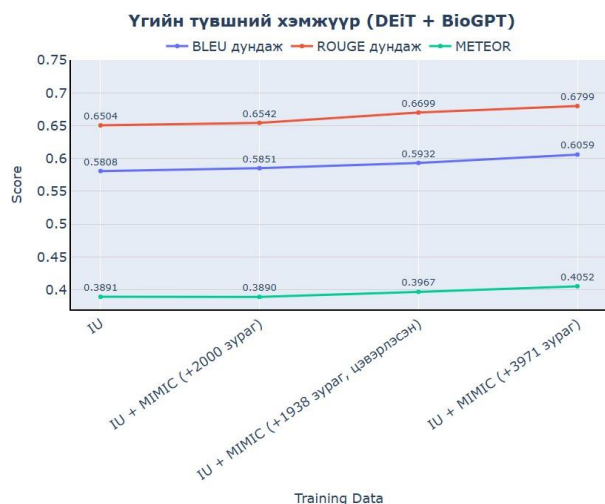
11-р зурагт үзүүлснээр анхны IU өгөгдөл дээр сургасан загварын CheXbert F1 оноо 0.7408 байсан бол MIMIC өгөгдлийг нэмснээр энэ үзүүлэлт мэдэгдэхүйц өссөн. Тухайлбал:

- +2000 MIMIC зураг нэмэхэд CheXbert F1 = 0.8089 (0.06-аар нэмэгдсэн),
- +1938 зураг, цэвэрлэсэн тайлан бүхий MIMIC өгөгдөл нэмэхэд 0.8246 (0.02-аар нэмэгдсэн),
- 3971 зураг, цэвэрлэсэн тайлан бүхий MIMIC өгөгдөл нэмэхэд CheXbert F1 хэмжүүр 0.8298 хүртэл өссөн байна.
- Харин RG\_ER F1 хэмжүүр нь бага зэрэг өссөн бөгөөд IU өгөгдөл дээр 0.5657 байсан бол MIMIC өгөгдлийг нэмэгдэхэд 0.5687 болсон.

Эдгээр үр дүнгээс харахад MIMIC-CXR өгөгдлийг IU Chest X-ray өгөгдөл дээр нэмэх нь загварын гүйцэтгэлийг сайжруулж байна. Ялангуяа эмнэлзүйн хэмжүүрүүд дээр мэдэгдэхүйц өсөлт ажиглагдсан бөгөөд энэ нь илүү олон төрлийн эмнэлзүйн мэдээлэл бүхий өгөгдөл ашиглах нь загварын үүсгэсэн тайлангийн эмнэлзүйн үнэн зөв байдлыг нэмэгдүүлэх боломжтойг харуулж байна.

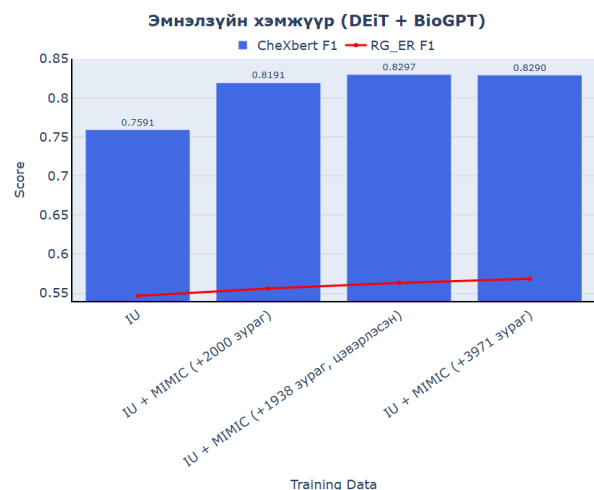
**4.2.2. DEiT + BioGPT**

Өгөгдлийн хэмжээг нэмэгдүүлэх туршилтыг хийж гүйцэтгэн DEiT + BioGPT загварын гүйцэтгэлийн үгийн түвшний хэмжүүрийг 12-р зурагт, эмнэлзүйн хэмжүүрийг 13-р зурагт үзүүлэв.



12-р зураг. Үгийн түвшний хэмжүүр DEiT + BioGPT загвар

Үгийн түвшний хэмжүүрүүдийн хувьд MIMIC өгөгдөл нэмэгдэх тусам BLEU дундаж, ROUGE дундаж болон METEOR хэмжүүрүүд тогтвортой өсөх хандлага ажиглагдсан. Анхны IU өгөгдөл дээр BLEU дундаж ойролцоогоор 0.58, ROUGE дундаж 0.65, METEOR 0.39 байсан бол MIMIC өгөгдлийг нэмснээр эдгээр хэмжүүрүүд аажмаар нэмэгдсэн байна. Ялангуяа MIMIC өгөгдлийн 3971 зураг нэмсэн туршилтад BLEU болон ROUGE хэмжүүрүүд хамгийн өндөр утгыг үзүүлсэн бөгөөд энэ нь өгөгдлийн хэмжээ нэмэгдэх нь үүсгэсэн тайлангийн үгийн түвшний чанарыг сайжруулж байгааг харуулж байна.



13-р зураг. Эмнэлзүйн хэмжүүр DEiT + BioGPT загвар

13-р зурагт үзүүлснээр анхны IU өгөгдөл дээр CheXbert F1 0.7591 байсан бол MIMIC өгөгдлийг нэмснээр энэ үзүүлэлт 0.8290 хүртэл өссөн байна. Энэ нь үүсгэсэн тайлан нь эмнэлзүйн энтитиг илүү зөв илэрхийлэх чадвар нэмэгдсэнийг харуулж байна. Харин RG\_ER F1 хэмжүүр нь 0.5464 → 0.5684 хүртэл бага зэрэг өссөн.

**4.2.3. DEiT + BioGPT болон Swin + BioGPT харьцуулалт**

6-р хүснэгтэд IU+MIMIC нийлмэл өгөгдөл дээр сургагдсан DEiT + BioGPT болон Swin + BioGPT загварын үгийн түвшний хэмжүүрийг, 7-р хүснэгтэд эмнэлзүйн хэмжүүрийн харьцуулалтыг харуулав.

6-р ХҮСНЭГТ. ҮГИЙН ТҮВШНИЙ ХЭМЖҮҮРҮҮД

Загвар	Үгийн түвшний хэмжүүрүүд							
	BLEU-1	BLEU-2	BLEU-3	BLEU-4	METEOR	ROUGE-1	ROUGE-2	ROUGE-L
DEiT+ BioGPT	0.7206	0.6271	0.5625	0.5133	0.4052	0.7444	0.5773	0.7179
SWIN+BioGPT	<b>0.7226</b>	<b>0.6287</b>	<b>0.5644</b>	<b>0.5154</b>	<b>0.4068</b>	<b>0.7461</b>	<b>0.5788</b>	<b>0.7182</b>

7-р ХҮСНЭГТ. ЭМНЭЛЗҮЙН ХЭМЖҮҮРҮҮД

Загвар	Эмнэлзүйн хэмжүүр	
	CheXbert F1	RG_ER F1
DEiT+BioGPT	0.829	0.5684
SWIN+BioGPT	<b>0.8298</b>	<b>0.5687</b>

Өгөгдлийн хэжээг нэмэхээс өмнө SWIN нь хэлзүйн хэмжүүрүүдийн хувьд илүү бол, DEiT нь эмнэлзүйн CheXbert хэмжүүрийн хувьд арай илүү байсан.

MIMIC өгөгдөл нэмснээр SWIN нь хэлзүйн хэмжүүрүүдийн хувьд илүү хэвээрээ ба эмнэлзүйн CheXbert хэмжүүрийн хувьд DEiT-тэй бараг ижил болсон.

Иймд Swin+BioGPT нь илүү тэнцвэртэй сайн загвар болсон гэж үзээд дараагийн data augmentation хийх туршилтаг Swin+BioGPT загвар дээр гүйцэтгэсэн.

**4.3. Data augmentation туршилт**

Энэхүү туршилтад сургалтын өгөгдлийн хэмжээг нэмэгдүүлэх болон загварын ерөнхийлөх чадварыг сайжруулах зорилгоор геометрийн болон гэрэлтүүлгийн өөрчлөлтүүдийг ашигласан.

Геометрийн өөрчлөлт:

- ±5° эргүүлэх → зураг бага зэрэг хазайж орно
- ±2% шилжүүлэх → зургийг бага зэрэг дээш/доош/зүүн/баруун хөдөлгөнө
- 0.95–1.05 масштаблах → 5% орчим томруулах/жижигсүүлэх

Гэрэлтүүлгийн өөрчлөлт:

- Гэрэлтүүлэг ±8% → зураг бага зэрэг бүдэг эсвэл тод болно
- Контраст ±12% → уушгины нягтрал илүү тод/зөөлөн харагдана

Геометр болон гэрэлтүүлгийн өөрчлөлтийн магадлалуудыг 70%, 80%, 90% гэсэн гурван өөр

утгаар туршиж, баталгаажуулалтын багц дээрх гүйцэтгэлийг харьцуулан үнэлсэн.

Туршилтын үр дүнгээс харахад augmentation хэрэгжих магадлал (p=0.9) 90% байх үед загвар хамгийн сайн гүйцэтгэл үзүүлсэн. Энэ нь augmentation илүү олон удаа хэрэгжих үед загвар илүү олон төрлийн дүрсийн хувилбар дээр суралцаж, ерөнхийлөх чадвар нь сайжирч байгааг харуулж байна.

8-р хүснэгтэд Swin+BioGPT загварын data augmentation хийхээс өмнөх болон хийсний дараах үгийн түвшний хэмжүүрийг харуулав.

8-р ХҮСНЭГТ. ҮГИЙН ТҮВШНИЙ ХЭМЖҮҮРҮҮД

SWIN + BioGPT	Үгийн түвшний хэмжүүрүүд							
	BLEU-1	BLEU-2	BLEU-3	BLEU-4	METEOR	ROUGE-1	ROUGE-2	ROUGE-L
DA-гүй	0.72 26	0.62 87	0.56 4	0.51 54	0.4 06 8	0.74 61	<b>0.57</b> <b>8</b>	0.71 82
DA-тай	<b>0.73</b> <b>14</b>	<b>0.63</b> <b>39</b>	<b>0.56</b> <b>86</b>	<b>0.51</b> <b>85</b>	<b>0.4</b> <b>14</b> <b>9</b>	<b>0.74</b> <b>77</b>	0.57 48	<b>0.72</b> <b>12</b>

9-р хүснэгтэд Swin+BioGPT загварын data augmentation хийхээс өмнөх болон хийсний дараах эмнэлзүйн хэмжүүрийг харуулав.

9-р ХҮСНЭГТ. ЭМНЭЛЗҮЙН ХЭМЖҮҮРҮҮД

SWIN+ BioGPT	Эмнэлзүйн хэмжүүр	
	CheXbert F1	RG_ER F1
DA-гүй	<b>0.8298</b>	<b>0.5687</b>
DA-тай	0.8254	0.5645

Data augmentation-ы үр дүнг харахад data augmentation ашигласан үед загварын гүйцэтгэл бага зэрэг сайжирсан байна. Тухайлбал:

- BLEU-1, BLEU-2, BLEU-3, BLEU-4 хэмжүүрүүд 0.7226, 0.6287, 0.5640, 0.5154 байсан бол augmentation ашигласан үед 0.7314, 0.6339, 0.5686, 0.5185 болж нэмэгдсэн байна. Энэ нь тайлангийн үгийн түвшний төстэй байдал сайжирсныг харуулж байна.
- Харин эмнэлзүйн хэмжүүр мэдэгдэхүйц өөрчлөгдөөгүй ч IU+MIMIC нийлмэл өгөгдөл дээр үзүүлсэн өсөлтөө тогтвортойгоор авч үлдсэн. Үүний үр дүнд үгзүйн болон эмнэлзүйн хэмжүүрүүд хоёулаа сайжирснаар тайлан нь найруулгын хувьд чанартай бөгөөд оношилгооны хувьд үнэн зөв болж, загвар нь бодит эмнэлзүйн хэрэглээнд илүү найдвартай болсон.

#### 4.4. Загварын үүсгэсэн тайлангийн жишээ

Хамгийн сайн гүйцэтгэлтэй хослол болох Swin + BioGPT загвараар үүсгэсэн цээжний рентген зургийн оношилгооны тайлангийн жишээг харууллаа.

#### Оролтын зураг



#### Бодит тайлан

The **cardiomediastinal silhouette is within normal limits** for appearance. The thoracic aorta is tortuous. A calcified **granuloma is identified in the right middle lobe**. **No focal areas of pulmonary consolidation**. **No pneumothorax**. **No pleural effusion**. The thoracic spine appears intact. No acute displaced rib fractures. **No acute intrathoracic abnormality**

#### Үүсгэсэн тайлан

The heart **cardiomediastinal silhouette is within normal limits** for size. **Subtle granuloma is identified in the lobe**. **No pneumothorax**. **No pleural effusion**. **No focal areas of pulmonary consolidation**. **No acute intrathoracic abnormality**.

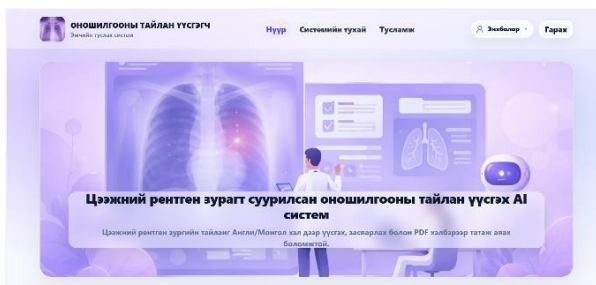
#### Орчуулгын загварын үр дүн

Зүрхний хэмжээ хэвийн хязгаарт байна. Уушгины дэлбэнд бүдэг гранулома илэрсэн. Уушгинд хий хуримтлагдаагүй. Гялтангийн хөндийд шингэн илрээгүй. Уушгины голомтот нягтаршил илрээгүй. Хурц цээжний хөндийн эмгэг өөрчлөлт илрээгүй.

Загварын үүсгэсэн тайлан нь бодит тайлангийн ихэнх гол эмнэлзүйн мэдээллийг зөв илэрхийлсэн. Гэхдээ зарим нарийвчилсан анатомийн тайлбаруудыг бүрэн хамарч чадаагүй байна. Жишээ нь: Уушгины дэлбэнд бүдэг гранулома илэрснийг илэрхийлсэн боловч “баруун дэлбэнд” гэдгийг дурдаагүй.

#### 4.5. Хэрэглэгчийн интерфэйс

Систем нь хэрэглэгчдэд цээжний рентген зургийг оруулж, автоматаар оношилгооны тайлан үүсгэх, тайланг монгол хэл дээр харах, засах, pdf-ээр татах боломж бүхий веб интерфэйстэй. Хэрэглэгч зураг оруулсны дараа backend сервер дээр гүн сургалтын загвар ажиллаж, үүсгэсэн тайланг дэлгэцэд харуулна. 14-р зурагт веб системийн нүүр хуудсыг, 15-р зурагт тайлан үүсгэсэн байгаа байдлыг харуулав.



14-р зураг. Нүүр хуудас



15-р зураг. Тайлан үүсгэсэн байгаа байдал

### ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд цээжний рентген зурагт суурилсан оношилгооны тайлан үүсгэх AI загварыг боловсруулж, түүний гүйцэтгэлийг үгийн түвшний болон эмнэлзүйн хэмжүүрээр үнэллээ. Судалгаанд Swin Transformer, ViT, DEiT, BEiT энкодеруудыг DistilGPT болон BioGPT декотдертой хослуулан туршсан.

Туршилтын үр дүнгээс харахад BioGPT декодер ашигласан загварууд DistilGPT декодертой загваруудаас илүү сайн гүйцэтгэл үзүүлсэн бөгөөд эмнэлзүйн хэмжүүрүүд болох CheXbert F1 болон RG\_ER F1 дээр илүү өндөр үзүүлэлттэй байв. Энэ нь BioGPT загвар оношилгооны тайланг эмнэлзүйн хувьд үнэн зөв үүсгэж байгааг илтгэнэ. Мөн Swin+BioGPT хослол нь үгийн түвшний болон эмнэлзүйн хэмжүүрүүд дээр хамгийн сайн үр дүн үзүүлсэн.

Өгөгдлийн хэмжээг нэмэгдүүлэх туршилтаар IU Chest X-ray өгөгдөлд MIMIC-CXR өгөгдлийг нэмэхэд загварын үгийн түвшний хэмжүүр мэдэгдэхүйц мэдэгдэхүйц өсөөгүй ч, эмнэлзүйн хэмжүүр тогтвортой өссөн. Энэ нь өгөгдлийн хэмжээг нэмж, илүү олон төрлийн өвчний тохиолдлуудыг агуулсан өгөгдөл дээр загвараа сургах нь тайлангийн чанарыг сайжруулж, эмнэлзүйн хувьд бодит, зөв тайланг үүсгэх боломжтойг харуулсан.

IU+MIMIC нийлмэл өгөгдөл дээр data augmentation хэрэгжүүлснээр үгийн түвшний хэмжүүрүүд бага зэрэг сайжирсан. Энэ нь data augmentation ашигласнаар, энкодер жижиг геометр эсвэл гэрэлтүүлгийн өөрчлөлтөд мэдрэмтгий бус болж, зургийн онцлогийг илүү тогтвортой төлөөлөх (embedding representation) боломжтой болсныг харуулж байна. Үүний үр дүнд загварын үүсгэсэн тайлан бодит тайлангай давхцах n-gram (үг, хэлц) нэмэгдсэн буюу үгийн түвшний хэмжүүр өссөн. Ингэснээр үүсгэсэн тайлан нь бодит тайлангай найруулга болон үгзүйн хувьд илүү адил болсон.

Харин IU+MIMIC нийлмэл өгөгдөл дээр data augmentation хэрэгжүүлэхэд загварын эмнэлзүйн хэмжүүр өсөөгүй боловч өмнөх туршилтуудад хүрсэн гүйцэтгэлийг тогтвортой хадгалсан. Үүний үр дүнд загварын үгзүйн болон эмнэлзүйн хэмжүүрүүд суурь загвартай харьцуулахад сайжирч, найруулгын хувьд чанартай, эмнэлзүйн мэдээллийг зөв илэрхийлсэн тайлан үүсгэх чадвартай болсон. Энэ нь боловсруулсан системийг бодит практик хэрэглээнд ашиглах боломжийг нэмэгдүүлж байна.

Судалгааны үр дүнд боловсруулсан систем нь эмч цээжний рентген зургийг оруулснаар автоматаар оношилгооны тайлан үүсгэх, тайланг монгол хэл дээр харах, засварлах, татаж авах боломжтой веб интерфэйстэй. Үүний үр дүнд эмч нар системийг ашиглан ажлын ачааллаа бууруулах, тайлан боловсруулах хугацааг хэмнэх боломжтой.

### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] Radiological Society of North America. "AI chest X-ray classification." RSNA News, (2022). <https://www.rsna.org/news/2022/september/ai-chest-x-ray-classification>
- [2] World Health Organization. "Sustained Efforts to Reduce the Tuberculosis Burden in Mongolia." *WHO Mongolia News*, (2025). [Sustained efforts to reduce the tuberculosis burden in Mongolia](#)
- [3] Munkhbaatar Dagvasumberel, Tugsjargal Purevsukh, and Oyundari Gonchigsuren. "Training of Radiology Residents in Mongolia." *Korean Journal of Radiology* 26, no. 2 (2025): 94–96. <https://doi.org/10.3348/kjr.2024.1095>
- [4] Yuan, Tao, L. Rodney Long, Zhiyun Xue, Sameer Antani, George R. Thoma, and Xiaolei Huang. "Multimodal Recurrent Model with Attention for Automated Radiology Report Generation." in *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI* (2018), 457–466. Springer, (2018). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00928-1>
- [5] Raminedi, Santhosh, S. Shridevi, and Daehan Won. "Multi-modal transformer architecture for medical image analysis and automated report generation." *Scientific Reports* 14 (2024): 19281 [Multi-modal transformer architecture for medical image analysis and automated report generation | Scientific Reports](#)
- [6] Singh, Prateek, and Sudhakar Singh. "ChestX-Transcribe: a multimodal transformer for automated radiology report generation from chest X-rays." *Frontiers in Digital Health* 7 (2025). [Frontiers | ChestX-Transcribe: a multimodal transformer for automated radiology report generation from chest x-rays](#)
- [7] Demner-Fushman, Dina, Marc D. Kohli, Marc B. Rosenman, Sonya E. Shooshan, Laritza Rodriguez, Sameer Antani, George R. Thoma, and Clement J. McDonald. "Preparing a collection of radiology examinations for distribution and retrieval." *Journal of the American Medical Informatics Association* 23, no. 2 (2016): 304–310. [Preparing a collection of radiology examinations for distribution and retrieval | Journal of the American Medical Informatics Association | Oxford Academic](#)
- [8] Johnson, Alistair E. W., Tom J. Pollard, Seth J. Berkowitz, Nathaniel R. Greenbaum, Matthew P. Lungren, Chih-ying Deng, Roger G. Mark, and Steven Horng. "MIMIC-CXR: A large publicly available database of labeled chest radiographs." arXiv preprint arXiv:1901.07042 (2019). [\[1901.07042\] MIMIC-CXR-JPG, a large publicly available database of labeled chest radiographs](#)
- [9] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio and Aaron Courville. "Deep Learning", MIT Press, *Goodfellow-et-al-2016* (2016), [Deep Learning](#)
- [10] Dosovitskiy, Alexey, Lucas Beyer, Alexander Kolesnikov, Dirk Weissenborn, Xiaohua Zhai, Thomas Unterthiner, Mostafa Dehghani, et al. "An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale." International Conference on Learning Representations (ICLR), 2021. [\[2010.11929\] An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale](#)
- [11] Bao, Hangbo, Li Dong, and Furu Wei. "BEiT: BERT Pre-Training of Image Transformers." International Conference on Learning Representations (ICLR), 2022 [\[2106.08254\] BEiT: BERT Pre-Training of Image Transformers](#)
- [12] Liu, Ze, Yutong Lin, Yue Cao, Han Hu, Yixuan Wei, Zheng Zhang, Stephen Lin, and Baining Guo. "Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows."

- International Conference on Computer Vision (ICCV), 2021. [2103.14030](#)
- [13] Sanh, Victor, Lysandre Debut, Julien Chaumond, and Thomas Wolf. "DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter." *NeurIPS Workshop on Energy Efficient Machine Learning*, 2019. [[1910.01108](#)] [DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter](#)
- [14] Luo, Renqian, Luyang Xu, Ruiyan Chang, Xiaoyang Liu, Xu Sun, and Jianfeng Gao. "BioGPT: Generative Pre-trained Transformer for Biomedical Text Generation and Mining." *Briefings in Bioinformatics* 23, no. 6 (2022). [2210.10341](#)
- [15] Team Gemini, Rohan Anil, Sebastian Borgeaud, Yonghui Wu, Zhifeng Chen, Matthias Minderer, et al. "Gemini: A Family of Highly Capable Multimodal Models." *arXiv preprint arXiv:2312.11805*, 2024. [[2312.11805](#)] [Gemini: A Family of Highly Capable Multimodal Models](#)
- [16] Shorten, Connor, and Taghi M. Khoshgoftaar. "A survey on image data augmentation for deep learning." *Journal of Big Data* 6, no. 1 (2019): 60. [A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning | Journal of Big Data | Springer Nature Link](#)
- [17] Papineni, Kishore, Salim Roukos, Todd Ward, and Wei-Jing Zhu. "BLEU: A Method for Automatic Evaluation of Machine Translation." *Proceedings of the 40th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)*, 2002: 311–318. [bleu.dvi](#)
- [18] Banerjee, Satanjeev, and Alon Lavie. "METEOR: An Automatic Metric for MT Evaluation with Improved Correlation with Human Judgments." *Proceedings of the ACL Workshop on Intrinsic and Extrinsic Evaluation Measures for Machine Translation and/or Summarization*, 2005: 65–72. [METEOR: An Automatic Metric for MT Evaluation with Improved Correlation with Human Judgments - ACL Anthology](#)
- [19] Lin, Chin-Yew. "ROUGE: A Package for Automatic Evaluation of Summaries." *Proceedings of the ACL Workshop on Text Summarization Branches Out*, 2004: 74–81. [ROUGE: A Package for Automatic Evaluation of Summaries - ACL Anthology](#)
- [20] Smit, Akshay, Saahil Jain, Pranav Rajpurkar, Anuj Pareek, Andrew Y. Ng, and Matthew P. Lungren. "CheXbert: Combining Automatic Labelers and Expert Annotations for Accurate Radiology Report Labeling Using BERT." *Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, 2020. [Combining Automatic Labelers and Expert Annotations for Accurate Radiology Report Labeling Using BERT - ACL Anthology](#)
- [21] Jain, Saahil, Ashwin Kalyan, Abhinav Rajpurkar, Pranav Rajpurkar, and Matthew P. Lungren. "RadGraph: Extracting Clinical Entities and Relations from Radiology Reports." *Proceedings of the 2021 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics (NAACL)*, 2021. [[2106.14463](#)] [RadGraph: Extracting Clinical Entities and Relations from Radiology Reports](#)

## ХИЙМЭЛ ОЮУНД СУУРИЛСАН ХӨДӨЛМӨРИЙН АЮУЛГҮЙ БАЙДЛЫН СИСТЕМИЙН ХӨГЖҮҮЛЭЛТ

Оргилын ТӨГӨЛДӨР<sup>1</sup>, Аюурзанын ОДГЭРЭЛ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Электроникийн тэнхим  
Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [otogoldor689@gmail.com](mailto:otogoldor689@gmail.com)

**Хураангуй:** Энэхүү судалгааны ажлаар Raspberry Pi эмбэдэд төхөөрөмжид суурилсан ухаалаг үйлдвэрийн орчны хөдөлмөрийн аюулгүй ажиллагааны хяналтын системийг хөгжүүлж туршсан. Систем нь YOLOv8n хиймэл оюуны загварыг ашиглан камераар дамжуулан ажилтан хамгаалалтын каск малгай өмссөн эсэхийг бодит хугацаанд илрүүлэх бөгөөд каск малгайгүй байдал тодорхой хугацаанд үргэлжилсэн тохиолдолд дуут дохиогоор анхааруулга өгч, зургийг нь аван мэйлээр анхааруулга илгээх боломжтойгоор хэрэгжүүлсэн. Мөн систем нь үйлдвэрийн орчинд гал, утаа, хий алдагдсан үед тухайн нөхцөл бүрд тохирох дуут сэрэмжлүүлэг болон мэйл мэдэгдлийг автоматаар илгээнэ. Системийн видео хяналтын хэсгийг Raspberry Pi камер болон Flask вэб серверт суурилан боловсруулж, хэрэглэгч дотоод сүлжээгээр бодит хугацааны дүрсийг хөтөчөөс харах боломжтой болгосон. Үүнээс гадна Raspberry Pi-ийн IP хаяг дээр ажиллаж буй вэб интерфэйсийг NGROK ашиглан статик домаянд холбосноор системд гадаад сүлжээнээс тогтвортой, хялбар байдлаар алсаас хандах боломжийг бүрдүүлсэн. Түүнчлэн ослын үеийн давхардсан мэдэгдлийг багасгах зорилгоор мэйл илгээх хугацааны хязгаарлалт, үйл явдлын дуу авианы удирдлага, тухайн мөчийн зургийг хадгалах зэрэг хамгаалалтын нэмэлт шийдлүүдийг тусгасан. Уг системийг үйлдвэр, барилга, уурхайн талбай болон хөдөлмөрийн аюулгүй ажиллагааны хяналт шаардсан орчинд ашиглах боломжтой бөгөөд дүрс боловсруулалт, мэдрэгчийн сүлжээ, алсын хандалт, шуурхай мэдэгдлийн технологийг нэгтгэсэн эмбэдэд суурьт цогц шийдэл юм.

**Түлхүүр үг:** Эмбэдэд систем, Raspberry Pi, YOLOv8n, каск илрүүлэлт, хөдөлмөрийн аюулгүй байдал, BLE, алсын хяналт, мэйл мэдэгдэл

### I. УДИРТГАЛ

Орчин үеийн үйлдвэр, барилга, уурхай, агуулах зэрэг эрсдэл өндөртэй ажлын орчинд хөдөлмөрийн аюулгүй байдлыг тасралтгүй хянах нь нэн чухал асуудал болж байна. Ажилтнууд хамгаалалтын каск зэрэг хувийн хамгаалах хэрэгслийг тогтмол зөв хэрэглэж байгаа эсэх, мөн гал, утаа, шатамхай хий алдагдах зэрэг аюулт нөхцөл үүссэн эсэхийг бодит хугацаанд илрүүлэх шаардлага улам бүр нэмэгдэж байна. Хүний ажиглалтад суурилсан уламжлалт хяналт нь тасралтгүй ажиллагаа, хурд, найдвартай байдлын хувьд хязгаарлагдмал тул хиймэл оюун ухаан, IoT, эмбэдэд системийн хосолсон шийдэл шаардагдаж байна.

Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь Raspberry Pi 4 [1] дээр суурилсан, камерын дүрс боловсруулалт болон мэдрэгчийн мэдээллийг нэгтгэн ажиллах аюулгүй ажиллагааны ухаалаг систем боловсруулахад оршино. Судалгааны хүрээнд дараах зорилтуудыг дэвшүүлэв. Үүнд:

1. YOLO [2] машин сургалтын загвар ашиглан ажилтан үйлдвэрийн аюултай бүсэд нэвтрэхдээ каск малгай өмссөн болон өмсөөгүй төлөвийг бодит хугацаанд ялган таних,
2. BLE [3] утасгүй холболтоор ESP32 эмбэдэд төхөөрөмжөөс ирэх гал, утаа, хий

алдагдлын мэдээллийг хүлээн авч боловсруулах,

3. Аюултай нөхцөл үүсэхэд дуут болон мэйл мэдэгдэл автоматаар илгээх,
4. Flask [4] дээр суурилсан веб интерфэйсээр шууд дүрсийг хянах,
5. NGROK [5] статик домаян ашиглан системийг гадаад сүлжээнээс алсаас ашиглах нөхцөл бүрдүүлэх.

Систем нь best.pt загварыг YOLO8n ангилалд ачаалж, Picamera2 [6]-оор 256×192 хэмжээтэй дүрс авч, Flask-аар “Helmet Safety Monitor” нэртэй веб интерфэйс гаргаж, /video\_feed төгсгөлөөр шууд стрийм дамжуулсан. Мөн BLE мэдэгдлийг ESP32\_GAS\_FIRE төхөөрөмжөөс хүлээн авч, FIRE, GAS, SMOKE, SAFE гэсэн төлөвүүдэд ялган боловсруулж, каскгүй төлөв 2 сек-с дээш үргэлжилсэн үед snapshot зурагтай мэйл илгээх байдлаар хэрэгжүүлсэн.

### II. СУДЛАГДСАН БАЙДАЛ

Сүүлийн жилүүдэд барилга, үйлдвэрлэлийн орчин дахь хөдөлмөрийн аюулгүй байдлыг сайжруулах зорилгоор компьютер хараа болон гүн сургалтын аргад суурилсан олон системүүд хөгжиж байна. Ялангуяа YOLO ашигласан бодит хугацааны объект илрүүлэлтийн архитектур нь хамгаалах хэрэгсэл өмссөн эсэхийг камерын дүрсээр шалгах, аюултай

нөхцөл илрүүлэх, ослын эрсдэлийг эрт мэдэгдэхэд өргөн хэрэглэгдэж байна. Эдгээр системүүдийн нийтлэг онцлог нь дүрс боловсруулалтаар эрсдэлийг илрүүлэх боловч мэдрэгчийн мэдээлэл, edge төхөөрөмж дээрх хэрэгжилт, алсын хандалтын шийдэл, дохиоллын төрөл зэрэг талаараа ялгаатай байна.

Камерт суурилсан үйлдвэр орчинд ажиллаж байгаа моторт хүний гар хэрхэн хүрэлцэж байгааг дүрс боловсруулалт ашиглан хянах системийг [7]-д хөгжүүлсэн.

Ansarimajid-ийн боловсруулсан Construction-PPE-Detection систем [8] нь YOLOv8-д суурилан барилгын талбай дээрх хамгаалах хэрэгслийн хэрэглээг бодит хугацаанд илрүүлэхэд чиглэсэн. Тус систем нь хамгаалалтын каск, хантааз, амны хаалт, хүний оролцоог нэгэн зэрэг илрүүлж, кадр дээр тухайн ангиллуудын тоог бодит хугацаанд харуулдаг. Мөн хамгаалалтын каскгүй хүн илэрсэн тохиолдолд 10 секунд тутам зураг хавсаргасан мэйл анхааруулга илгээх, мэйл илгээлтийг үндсэн видео урсгалаас салгаж non-blocking байдлаар ажиллуулах, мэйл илгээгдсэнийг дэлгэцэн дээр POP-UP хэлбэрээр мэдээлэх зэрэг функцтэй. Энэ нь PPE хяналт ба мэйл мэдэгдлийг амжилттай нэгтгэсэн боловч системийн үндсэн төвлөрөл нь зөвхөн дүрс дээр суурилсан PPE илрүүлэлт бөгөөд орчны мэдрэгчтэй уялдсан аюулын хяналт байхгүй байна.

[9]-д угсралтын шугам дээр суурилуулсан камеруудыг ашиглан аюултай нөхцөлд машин механизмд ойртож буй ажилчдын зургийг авч YOLOv3 дээр боловсруулан шаардлагатай бол шугамыг зогсооход ашигладаг судалгааг хийсэн.

Yihong1120-ийн Construction-Hazard-Detection систем [10], түүнд холбогдох Hugging Face загварын сан [11] нь энгийн PPE хяналтаас илүү өргөтгөсөн, олон төрлийн барилгын аюул илрүүлэх хиймэл оюуны платформ юм. Энэхүү систем нь ажилчин каскгүй эсвэл хамгаалалтын хантаазгүй байгаа эсэхийг илрүүлэхээс гадна ажилчин машин механизм, тээврийн хэрэгсэлд хэт ойртсон эсэх, аюулгүйн конусан тэмдэглэгээний координатыг кластерчилж хязгаарлагдмал бүс автоматаар үүсгэн түүнийг зөрчсөн эсэх, мөн машин техник эсвэл тээврийн хэрэгсэл utility pole-д аюултай ойртсон эсэхийг илрүүлдэг. Төсөлд post-processing алгоритмууд нь илрүүлэлтийн чанарыг сайжруулдаг бөгөөд веб

интерфэйс, бодит хугацааны сэрэмжлүүлэг, LINE, Messenger, WeChat, Telegram зэрэг сувгаар мэдэгдэл илгээх, олон хэлний дэмжлэгтэй ажиллах боломжтой. Харин Hugging Face талд уг системийн жин файлуудыг PyTorch болон ONNX хэлбэрээр өгч, YOLO26-г санал болгосон. Энэ систем нь үйлдвэрийн аюулыг илүү өргөн хүрээнд авч үзсэн ч Raspberry Pi зэрэг эмбэддэд edge төхөөрөмж дээр мэдрэгчүүдийн мэдээлэлтэй нэгтгээгүйгээрээ манай хөгжүүлсэн системээс дутагдалтай гэж дүгнэсэн.

RGB-D камераар хүн илрүүлэх системийг хөгжүүлж ABB IRB-2400L үйлдвэрлэлийн роботын гартай нэгтгэсэн системийг хөгжүүлсэн [12].

Sayed Gamal-ийн Real-Time Smoke & Fire Detection – YOLO11 буюу Flare Guard систем [13] нь гал болон утааг дүрсээр бодит хугацаанд илрүүлэхэд чиглэсэн. Тус систем нь YOLO11 ашиглан видео урсгал дээр гал, утааг таньж, Telegram болон WhatsApp-аар зурагтай анхааруулга илгээдэг. Нийт 9,463 тэмдэглэгээтэй зурагтай өгөгдлийн сан дээр сургагдсан бөгөөд тайлагнасан үзүүлэлтээр precision 80.6%, recall 71.7%, mAP@50 77.0%, mAP@50–95 49.2% байсан. Мөн GPU орчинд кадр боловсруулах хугацаа 15 мс-ээс бага, ойролцоогоор 30–60 FPS хурдтай ажиллах боломжтой. Энэ систем нь гал, утааны дүрсэнд суурилсан илрүүлэлтэд сайн төвлөрсөн боловч хий алдагдал, BLE мэдрэгч, edge контроллерын олон эх үүсвэрийн мэдээллийг нэгтгэх шийдэл тусгагдаагүй байна.

Систем нь SCRFD-ийн урьдчилан бэлтгэсэн 2D хүн илрүүлэх мэдрэлийн сүлжээ болон хяналтын камерууд ашиглан ажилчдыг бодит цаг хугацаанд хянах бөгөөд систем нь аюултай нөхцөл байдлыг илрүүлэх замаар аюулгүй байдлыг сайжруулж, ослоос урьдчилан сэргийлдэг [14].

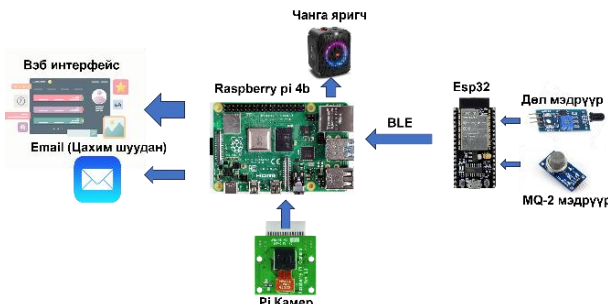
Дээрх судалгаануудыг харьцуулж үзвэл PPE илрүүлэлт, барилгын өргөтгөсөн аюулын AI хяналт, мөн гал, утааны дүрсэнд суурилсан илрүүлэлт гэсэн гурван өөр чиглэлийн шийдлүүд хөгжсөн байна. Харин энэхүү ажлын онцлог нь эдгээрийн зарим давуу талыг нэгтгэн, Raspberry Pi 4 дээр суурилсан edge хэрэгжилт, YOLOv8n-д суурилсан каск илрүүлэлт, ESP32-оос BLE холбоогоор ирэх гал, утаа, хий мэдрэгчийн мэдээлэл, дуут болон мэйл анхааруулга, Flask-д суурилсан бодит хугацааны веб стрийминг, мөн NGROK статик домайн ашигласан алсын хандалтыг нэг

системд нэгтгэснээрээ ялгаатай юм. Өөрөөр хэлбэл, өмнөх ажлууд ихэвчлэн зөвхөн камерын дүрсэнд төвлөрсөн байхад энэхүү систем нь дүрс + мэдрэгч + анхааруулга + алсын хяналт гэсэн нэгдсэн архитектуртайгаараа практик хэрэглээнд илүү ойр шийдэл болж байна.

## Системийн дизайн ба шийдэл

### Системийн ерөнхий бүтэц

Энэхүү системийн төв удирдлагын хэсэг нь Raspberry Pi 4 бөгөөд түүнд Raspberry Pi камер, Ultralytics YOLO-д суурилсан каск илрүүлэлтийн модуль, Flask веб сервер, ESP32 төхөөрөмжөөс Bluetooth Low Energy (BLE) холбоогоор мэдрэгчийн мэдээлэл хүлээн авах модуль, дуут дохиолол, мөн мэйл анхааруулгын хэсгүүдийг нэгтгэн хэрэгжүүлсэн.



1-р зураг. Системийн ерөнхий бүтэц

Камераас орж ирсэн дүрсийг бодит хугацаанд боловсруулж, хамгаалалтын каск өмссөн эсэхийг илрүүлэхийн зэрэгцээ веб стрийминг хэлбэрээр харуулна. Үүнээс гадна ESP32 төхөөрөмжөөс гал, утаа, хий алдагдлын төлөвүүдийг notification байдлаар хүлээн авч, аюулын төрлөөс хамааран дуут болон мэйл анхааруулга үүсгэнэ. Кодын түвшинд камерын preview хэмжээ 256×192, inference параметрууд imgsz=224, conf=0.5, мөн YOLO inference нь 2 кадрт тутамд ажилладаг.

Системийн ажиллагаа дараах үндсэн дарааллаар явагдана. Нэгдүгээрт, камер дүрсийг тасралтгүй авч Raspberry Pi руу оруулна. Хоёрдугаарт, дүрсийг YOLOv8n загвараар боловсруулж касктай болон каскгүй объектуудыг ялгана. Гуравдугаарт, каскгүй байдал тодорхой хугацаанаас хэтэрсэн тохиолдолд дуут дохиолол болон snapshot зурагтай мэйл мэдэгдэл үүсгэнэ. Дөрөвдүгээрт, ESP32-оос BLE мэдэгдлээр FIRE, GAS, SMOKE, SAFE төлөвүүдийг хүлээн авч ослын төрлөөс шалтгаалсан хариу үйлдэл хийнэ. Тавдугаарт, Flask веб интерфэйсээр бодит хугацааны дүрсийг хэрэглэгчид хүргэнэ.

### YOLOv8n-д суурилсан каск

#### илрүүлэлтийн математик загвар

Энэ хэсэгт best.pt файл нь YOLOv8n суурьтайгаар сургасан загвар гэж үзэн математик загварыг томъёолно. Объект илрүүлэлтийн зорилго нь зураг эсвэл видео урсгал дахь объектын байршил болон ангиллыг нэгэн зэрэг тодорхойлох явдал бөгөөд үр дүн нь тухайн объект бүрийн bounding box, class label, confidence score-оос бүрдэнэ.

Оролтын дүрсийг

$$I \in \mathbb{R}^{H \times W \times 3} \quad (1)$$

гэж тэмдэглэвэл, загварын гаралт нь  $N$ ширхэг боломжит илрүүлэлт байна. Тухайн  $i$ -р илрүүлэлтийн bounding box-ийг

$$B_i = (x_i, y_i, w_i, h_i) \quad (2)$$

гэж тэмдэглэнэ. Энд  $x_i, y_i$  нь объектын төв координат,  $w_i, h_i$  нь өргөн ба өндрийг илэрхийлнэ.

Тухайн объектын confidence оноог дараах байдлаар тодорхойлж болно.

$$S_i = P_i(\text{object}) \times P_i(c | \text{object}) \quad (3)$$

энд  $P_i(\text{object})$  нь тухайн байршилд объект байгаа магадлал,  $P_i(c | \text{object})$  нь тухайн объект тодорхой ангилалд хамаарах нөхцөлт магадлал юм. Загварын эцсийн ангиллыг

$$\hat{c}_i = \arg \max_{c \in C} P_i(c | \text{object}) \quad (4)$$

хэлбэрээр тодорхойлно.

Кодод confidence босгыг  $S_i \geq 0.5$  байхаар сонгосон тул зөвхөн 0.5-с дээш confidence бүхий илрүүлэлтүүдийг хүчинтэй гэж үзэж байна. Каск илрүүлэхэд ангиллын нэрийг helmet, hardhat, hard-hat гэсэн утгуудтай харьцуулж, эдгээрт хамаарах тохиолдлыг хамгаалалтын зөв төлөв гэж, бусад тохиолдлыг каскгүй төлөв гэж үзсэн. Иймээс каск байгаа эсэхийг хоёртын шийдвэрээр дараах байдлаар илэрхийлж болно.

$$H_i = \begin{cases} 1, & \text{if } \hat{c}_i \in \{\text{helmet, hardhat, hard-hat}\} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

Хэрэв нэг кадрт дор хаяж нэг каскгүй объект илэрвэл

$$D_t = 1,$$

эсрэг тохиолдолд

$$D_t = 0$$

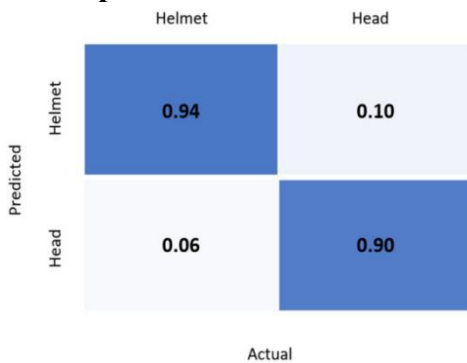
гэж тэмдэглэж болно. Энд  $t$  нь тухайн агшны хугацаа юм.

Объект илрүүлэлтийн чанарыг үнэлэх түгээмэл хэмжүүр нь Intersection over Union (IoU) бөгөөд үүнийг дараах байдлаар тодорхойлно.

$$IoU = \frac{B_{pred} \cap B_{gt}}{B_{pred} \cup B_{gt}} \quad (6)$$

энд  $B_{pred}$  нь загварын таамагласан bounding box,  $B_{gt}$  нь ground-truth bounding box юм.

### YOLOv8n загварын андууралтын матриц



2-р зураг. YOLOv8n загварын Helmet ба Head ангиллын андууралтын матриц

Андууралтын матрицын үр дүнгээс харахад YOLOv8n загвар нь Helmet ангиллыг 94%, Head ангиллыг 90% зөв ангилсан байна. Харин Helmet ангиллын 6%-ийг Head, Head ангиллын 10%-ийг Helmet гэж буруу ангилсан нь эдгээр хоёр ангиллын хооронд тодорхой хэмжээний андуурал байгааг илтгэнэ. Иймээс загварын ангиллын ерөнхий гүйцэтгэл сайн боловч ижил төстэй шинж чанартай объектуудын хувьд нэмэлт сайжруулалт шаардлагатай гэж үзэж болно.

### Каскгүй төлөвийн хугацааны босго ба анхааруулгын логик

Системд каскгүй байдал илэрсэн даруйд анхааруулга өгөхгүй, харин тодорхой хугацааны турш үргэлжилсэн эсэхийг шалгаж байж анхааруулгын механизм идэвхждэг. Үүнийг дараах байдлаар томъёолж болно. Хэрэв каскгүй төлөв анх илэрсэн мөчийг  $t_s$ , тухайн агшны цагийг  $t_{гэвэл}$  каскгүй үргэлжилсэн хугацаа:

$$T_{nohelmet}(t) = t - t_s \quad (7)$$

байна. Кодын дагуу дохиолол болон snapshot-тай мэйл дараах нөхцөлд ажиллана.

$$T_{nohelmet}(t) \geq 2 \text{ сек}$$

Өөрөөр хэлбэл, богино хугацааны хуурамч эерэг илрүүлэлтийг бууруулахын тулд 2 секундээс дээш үргэлжилсэн эрсдэлийг л бодит

аюул гэж үзэж байна.

Мэйл анхааруулгын хувьд ослын төрөл бүрт cooldown хугацаа ашигласан. Хэрэв сүүлд тухайн төрлийн мэйл илгээгдсэн мөчийг  $t_{last}$ , одоогийн мөчийг  $t_{гэвэл}$  шинэ мэдэгдэл илгээх нөхцөл:

$$t - t_{last} > 30 \text{ секунд байна.}$$

Энэхүү нөхцөл нь EVENT\_EMAIL\_COOLDOWN = 30 параметртэй тохирч байгаа бөгөөд тасралтгүй FIRE, GAS, SMOKE төлөв ирэх үед давхардсан мэйл спам үүсэхээс сэргийлнэ.

### Бодит хугацааны ажиллагааны оновчлол

Raspberry Pi 4 зэрэг edge төхөөрөмж дээр бодит хугацааны илрүүлэлт хийх үед тооцооллын ачааллыг бууруулах нь чухал байдаг. Ultralytics-ийн баримт бичигт imgsз нь inference-ийн зургийн хэмжээг тодорхойлж, зөв сонголт нь боловсруулах хурд болон илрүүлэлтийн чанарт нөлөөлдөг гэж тайлбарласан. Мөн conf босгыг өөрчлөх нь хуурамч эерэг илрүүлэлтийг бууруулахад ашигладаг.

### Камерын дүрсний нягтралын тооцоо

Кодод камерын preview хэмжээ:

$$W_c = 256, H_c = 192$$

байгаа тул нэг кадрын нийт пикселийн тоо:

$$N_c = W_c \times H_c = 256 \times 192 = 49,152$$

пиксел байна. Энэ нь Raspberry Pi камераас нэг кадрт боловсруулах үндсэн өгөгдлийн хэмжээг илэрхийлнэ.

### YOLO inference орох дүрсний хэмжээ

Кодод загварыг дараах байдлаар дуудсан.

$$\text{model}(\text{frame}, \text{imgsз}=224, \text{conf}=0.5) \quad (8)$$

Ultralytics-ийн албан ёсны баримтад imgsз нь inference-ийн зургийн хэмжээг тодорхойлдог бөгөөд integer утга өгвөл квадрат хэмжээ болгон resize/pad хийж ашиглаж болно гэж заасан байдаг. Иймээс миний inference-д орох дүрсний нэрлэсэн хэмжээ:

$$W_i = 224, H_i = 224$$

гэж авч үзэж болно. Нэг inference-д боловсруулах пикселийн тоо:

$$N_i = W_i \times H_i = 224 \times 224 = 50,176$$

пиксел байна.

### Анхдагч $imgsz=640$ -тэй харьцуулсан бууралтын тооцоо

Ultralytics-ийн official predict жишээнд  $imgsz=640$  нь түгээмэл анхдагч хэмжээ байдлаар өгөгдсөн байдаг. Иймээс inference-ийн хэмжээг 640-аас 224 болгон бууруулсны нөлөөг дараах байдлаар тооцож болно.

Анхны пикселийн тоо:

$$N_{default} = 640 \times 640 = 409,600$$

Шинэ пикселийн тоо:

$$N_{new} = 224 \times 224 = 50,176$$

Пикселийн бууралтын хувь:

$$R_{img} = \left(1 - \frac{N_{new}}{N_{default}}\right) \times 100\% \quad (9)$$

$$R_{img} = \left(1 - \frac{50,176}{409,600}\right) \times 100\% = 87.75\%$$

Ингэснээр inference-д орох нэг кадрын тооцооллын хэмжээ ойролцоогоор 87.75%-р буурч байна.

### Кадр алгасалт буюу inference-ийн давтамжийн тооцоо

Кодод YOLO inference-ийг 2 кадр тутам ажиллуулж байгаа. Хэрэв видео урсгалын бодит кадрын хурдыг  $F_{video}$  гэж тэмдэглэвэл, загварын бодит inference хурд:

$$F_{infer} = \frac{F_{video}}{2} \quad (10)$$

байна. Ерөнхий тохиолдолд  $k$  кадр тутам inference хийвэл:

$$F_{infer} = \frac{F_{video}}{k} \quad (11)$$

Системд  $k = 2$  тул загварын inference давтамжийг шууд 2 дахин бууруулж, CPU/GPU ачааллыг мэдэгдэхүйц багасгаж байна.

### FPS-ийн тооцоо

Кодод стриймингийн FPS-ийг одоогийн кадрын цаг болон өмнөх кадрын цагийн зөрүүний урвуугаар тооцсон байна. Үүнийг дараах томъёогоор бичиж болно.

$$FPS_t = \frac{1}{t_t - t_{t-1}} \quad (12)$$

энд  $t_t$  нь одоогийн кадрын timestamp,  $t_{t-1}$  нь өмнөх кадрын timestamp юм. Энэхүү тооцоо нь бодит хугацааны веб стриймингийн хурдыг мөч бүрт харуулах энгийн боловч үр дүнтэй арга юм.

### Нэг секундэд боловсруулах өгөгдлийн хэмжээ

Камерын урсгалын хувьд нэг секундэд боловсруулах нийт пикселийн урсгалыг:

$$P_{cam} = W_c \times H_c \times F_{video} \quad (13)$$

гэж тодорхойлно. Манай тохиргоонд:

$$P_{cam} = 256 \times 192 \times F_{video} = 49,152 F_{video}$$

пиксел/секунд байна.

Харин inference-ийн хувьд, кадр алгасалтыг тооцвол:

$$P_{infer} = W_i \times H_i \times F_{infer} \quad (14)$$

$$P_{infer} = 224 \times 224 \times \frac{F_{video}}{2} = 25,088 F_{video}$$

пиксел/секунд болно.

Хэрэв үүнийг анхдагч  $640 \times 640$  хэмжээтэй, кадр бүрт inference хийдэг нөхцөлтэй харьцуулбал:

$$P_{default} = 640 \times 640 \times F_{video} = 409,600 F_{video}$$

Иймээс нийт inference ачааллын бууралтын хувь:

$$R_{total} = \left(1 - \frac{P_{infer}}{P_{default}}\right) \times 100\% \quad (15)$$

$$R_{total} = \left(1 - \frac{25,088 F_{video}}{409,600 F_{video}}\right) \times 100\% = 93.875\%$$

болно. Өөрөөр хэлбэл, дүрсний хэмжээ бууруулалт + 2 кадр тутам inference гэсэн хос оновчлолын үр дүнд тооцооллын онолын ачаалал ойролцоогоор 93.88%-р буурч байна.

### JPEG шахалтын чанарын тохиргоо

Кодод веб стриймингийн JPEG шахалтын чанарыг  $Q = 50$  байхаар сонгосон. Энэ нь кадр бүрийн файлын хэмжээг багасгаж, сүлжээний урсгалыг бууруулан веб стриймингийн хурдыг нэмэгдүүлэх практик шийдэл юм. Гэхдээ JPEG-ийн бодит шахалтын хэмжээ нь дүрсний агуулгаас ихээхэн хамаардаг тул үүнийг зөвхөн онолын яг таг томъёогоор бус, туршилтын хэмжилтээр үнэлэх нь илүү зөв аргачлал болно.

### ТУРШИЛТ, ҮР ДҮН

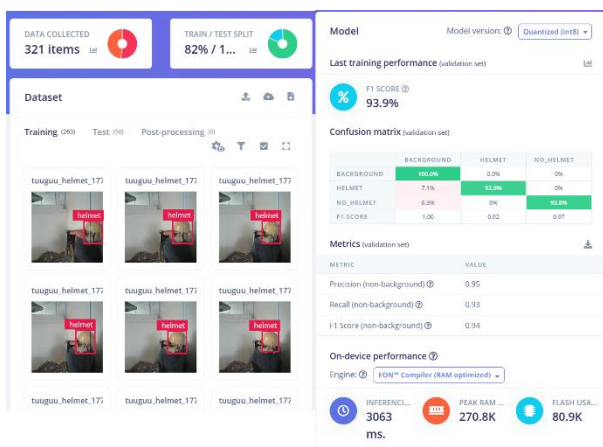
Системийн ажиллагаа, найдвартай байдал болон практик хэрэглээний боломжийг үнэлэх зорилгоор туршилтыг дөрвөн үе шаттайгаар зохион байгуулсан. Эхний шатанд Edge Impulse орчин ашиглан хамгаалалтын каск илрүүлэх загварын суурь чадварыг шалгасан. Хоёр дахь шатанд веб камер болон Visual Studio орчинд бодит хугацааны дүрс дээр

загварын анхан шатны ажиллагааг туршсан. Гурав дахь шатанд Raspberry Pi 4 дээр системийг бүрэн ажиллуулж, локал веб интерфэйс болон NGROK ашигласан алсын хандалтыг шалгасан. Дөрөв дэх шатанд хамгаалалтын малгайгүй байдал, гал, утаа, хийн аюул илэрсэн үед цахим шуудангаар мэдэгдэл илгээх механизмыг туршиж үр дүнг үнэлэв.

### Туршилт 1. Edge Impulse ашиглан каск таних туршилт

Эхний шатны туршилтаар хамгаалалтын малгайтай болон малгайгүй дүрсүүдийг ашиглан Edge Impulse орчинд анхан шатны сургалт, ангилалтын туршилт хийв. Энэхүү туршилтын зорилго нь каск илрүүлэлтийн үндсэн өгөгдлийн ангилал зөв хийгдэж байгаа эсэх, мөн бодит хэрэглээнд тохирохуйц суурь дата бэлтгэх боломжтой эсэхийг шалгахад оршино. Туршилтад малгай өмссөн болон өмсөөгүй хүний зургуудыг ялган тэмдэглэж, сургалтын өгөгдлийн сан үүсгэн, ангиллын үр дүнг харьцуулан шинжилсэн.

Туршилтын үр дүнд Edge Impulse орчинд хамгаалалтын хэрэгслийн ангиллыг хэрэгжүүлэх боломжтой болох нь харагдсан бөгөөд энэхүү шат нь дараагийн YOLO-д суурилсан бодит хугацааны систем хөгжүүлэхэд өгөгдлийн анхны бүтэц, ангиллын логикийг тодорхойлох ач холбогдолтой байв. Өөрөөр хэлбэл, энэхүү туршилт нь каск илрүүлэлтийн асуудлыг бодит цагийн видео орчинд хэрэгжүүлэхээс өмнөх бэлтгэл үе шат болсон.



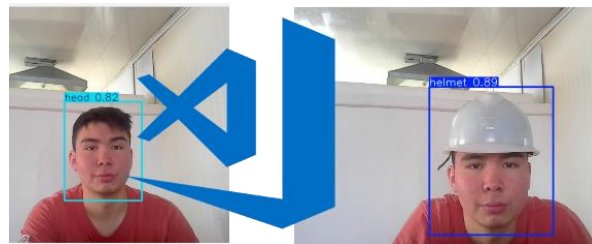
3-р зураг. Edge Impulse орчинд каск таних сургалтын үр дүн

### Туршилт 2. Веб камер ашиглан Visual Studio орчин дахь бодит хугацааны шалгалт

Хоёр дахь шатны туршилтаар веб камер

ашиглан Visual Studio орчинд бодит хугацааны дүрс боловсруулалтын ажиллагааг шалгав. Энэхүү туршилтын гол зорилго нь сургасан загвар компьютерын орчинд шууд дүрсэн дээр ажиллах боломжтой эсэх, мөн малгайтай болон малгайгүй төлөвийг бодит хугацаанд ялган таних чадварыг урьдчилан үнэлэхэд оршино. Туршилтын үед веб камераар дүрс авч, Python орчинд ажиллуулсан загварын гаралтыг дэлгэц дээр хүрээ болон ангиллын нэрийн хамт харуулан шалгасан.

Энэхүү шат нь Raspberry Pi эмбэддэд төхөрөөмжид шилжүүлэхээс өмнөх прототип туршилт бөгөөд алгоритмын зөв ажиллагаа, камерын оролт, ангиллын логик, дүрсний урсгал дээрх хариу үйлдлийг шалгах давуу талтай байв. Туршилтын явцад малгай өмссөн тохиолдолд систем хамгаалалтын зөв төлөвийг, харин малгай өмсөөгүй үед анхаарах шаардлагатай төлөвийг ялган харуулж байсан нь дараагийн эмбэддэд хэрэгжилтэд шилжих боломжтойг баталсан.



4-р зураг. Visual Studio орчинд веб камераар хийсэн каск илрүүлэлтийн туршилт

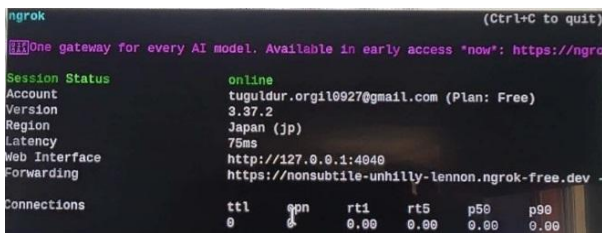
### Туршилт 3. Raspberry Pi болон веб интерфэйс (NGROK) ашигласан туршилт

Гурав дахь шатны туршилтаар системийг Raspberry Pi 4 төхөрөөмж дээр бүрэн ажиллуулж, камерын дүрс боловсруулалт, локал веб интерфэйс болон алсын хандалтын ажиллагааг шалгав. Кодын хэрэгжилтээс харахад Raspberry Pi камерын дүрсийг Picamera2 ашиглан 256×192 хэмжээтэй авч, Flask веб серверийг дотоод хаяг дээр ажиллуулан, үндсэн хуудсанд "Helmet Safety Monitor" нэртэй веб интерфэйс үүсгэж, /video\_feed төгсгөлөөр бодит хугацааны дүрс дамжуулж байна. Мөн дүрс боловсруулах ачааллыг бууруулах зорилгоор YOLO inference-ийг 2 кадр тутам ажиллуулж, imgsz=224, conf=0.5 параметр ашигласан бөгөөд стриймингийн үед JPEG чанарыг 50 болгон бууруулж веб урсгалын хурдыг сайжруулсан.

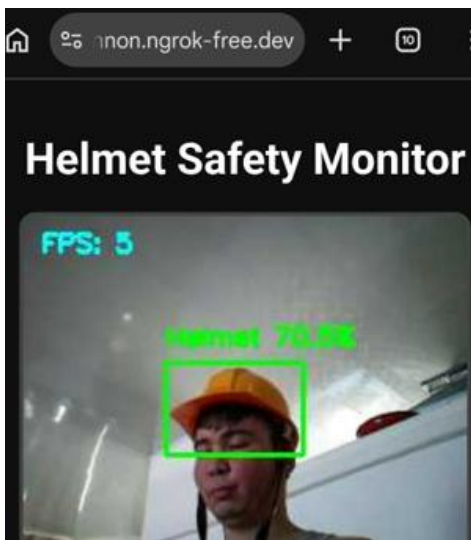
Туршилтын явцад локал сүлжээнд Raspberry

Pi-ийн IP хаягаар веб интерфэйсийг нээж бодит хугацааны дүрсийг амжилттай харсан. Үүний дараа NGROK ашиглан локал серверийг статик домайнд холбож, системийг гадаад сүлжээнээс нээж шалгахад алсын хандалт тогтвортой ажилласан. Камерын дүрсэн дээр малгайтай болон малгайгүй төлөвийг хүрээ, confidence утгын хамт харуулж, мөн систем нь тухайн мөчийн FPS болон “No Helmet Time” хугацааг дэлгэц дээр давхар бичиж байсан нь бодит хугацааны хяналтад ашиглах боломжтойг баталсан.

Энэхүү туршилтын үр дүн нь системийг зөвхөн суурин компьютер дээр бус, харин эмбэддэд edge төхөөрөмж дээр ажиллуулах боломжтой бөгөөд веб технологи ашиглан алсаас хянах бүрэн боломжтойг харуулсан. Иймд Raspberry Pi дээр суурилсан энэхүү шийдэл нь үйлдвэр, барилга, агуулах зэрэг хөдөлмөрийн аюулгүй байдлын хяналт шаардсан орчинд практик хэрэглээнд нэвтрүүлэх боломжтой гэж үзэв.



5-зураг. NGROK шилжүүлэлт

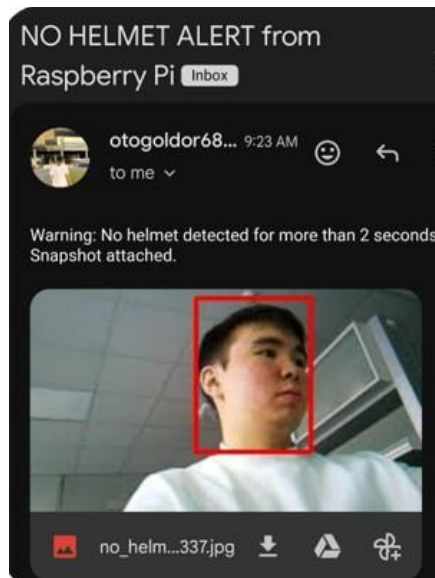


6-р зураг. NGROK статик домайн ашигласан алсын хандалтын туршилт

#### Туршилт 4. Цахим шуудангийн мэдэгдэл: каск малгай, гал, утаа

Дөрөв дэх шатны туршилтаар системийн анхааруулгын механизм, ялангуяа цахим шуудангаар мэдэгдэл илгээх ажиллагааг шалгав. Кодын хэрэгжилтээс үзэхэд

хамгаалалтын малгайгүй төлөв илэрсэн үед тухайн нөхцөл байдал 2 секундээс дээш үргэлжилбэл систем эхлээд дуут дохиолол ажиллуулж, дараа нь тухайн мөчийн кадрыг snapshot болгон хадгалж, “NO HELMET ALERT from Raspberry Pi” гэсэн гарчигтай зураг хавсаргасан мэйл илгээдэг. Харин ESP32 төхөөрөмжөөс BLE мэдэгдлээр FIRE, GAS, SMOKE төлөв ирсэн үед систем холбогдох дуут дохиог ажиллуулж, “FIRE ALERT from Raspberry Pi” болон “SMOKE/GAS ALERT from Raspberry Pi” гэсэн цахим шуудангийн мэдэгдлүүдийг илгээдэг. Давхардсан мэдэгдлийг хязгаарлах зорилгоор гал болон утаа/хийн анхааруулгад 30 секундийн cooldown хугацаа хэрэглэж байна.

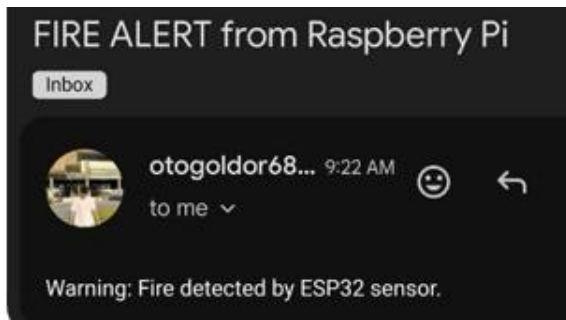


7-р зураг. Малгайгүй үед илгээгдсэн зурагтай цахим шуудангийн мэдэгдэл

Туршилтын явцад малгайгүй нөхцөлийг зориудаар үүсгэж шалгахад систем хугацааны босгыг давсны дараа анхааруулах дуу ажиллуулж, snapshot зурагтай мэйл амжилттай илгээж байсан. Мөн BLE сувгаар FIRE, GAS, SMOKE төлөвүүдийг илгээж шалгахад систем тухайн аюулын төрөлд тохирсон цахим шуудангийн мэдэгдэл явуулсан. SAFE төлөв ирэхэд систем ослын үеийн дууг зогсоож хэвийн төлөвт шилжиж байсан нь анхааруулгын логик зөв хэрэгжсэнийг харуулж байна.

Энэхүү туршилтын үр дүнгээс харахад систем нь зөвхөн дүрс илрүүлэлтээр хязгаарлагдахгүй, харин бодит аюултай нөхцөл үүссэн үед хэрэглэгчид алсаас шуурхай мэдээлэл хүргэх бүрэн боломжтой байна. Иймд хөдөлмөрийн аюулгүй ажиллагааны бодит хэрэглээнд ослыг эрт мэдэгдэх, операторт шуурхай дохио хүргэх, нөхцөл байдлыг

зурагтайгаар баталгаажуулах давуу талтай гэж дүгнэв.



8-р зураг. 1Гал, утааны илэрсэн үед илгээгдсэн цахим шуудангийн мэдэгдлийн туршилт

### ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлаар Raspberry Pi 4 дээр суурилсан, компьютер хараа болон мэдрэгчийн мэдээллийг нэгтгэн боловсруулах үйлдвэрлэлийн орчны аюулгүй байдлын ухаалаг хяналтын системийг боловсруулж туршсан. Систем нь Ultralytics YOLO-д суурилсан объект илрүүлэлтийн аргаар хамгаалалтын каск малгай өмссөн эсэхийг бодит хугацаанд тодорхойлох, Flask веб серверээр камерын дүрсийг шууд дамжуулах, мөн ESP32 төхөөрөмжөөс Bluetooth Low Energy буюу BLE-ээр гал, утаа, хий алдагдлын мэдэгдэл хүлээн авч боловсруулах боломжтой байдлаар хөгжүүлэгдсэн.

Кодын хэрэгжилтээс үзэхэд систем нь Raspberry Pi камерын дүрсийг 256×192 хэмжээтэй авч, YOLO inference-ийг 2 кадр тутамд `imgsz=224`, `conf=0.6` тохиргоотой ажиллуулж, малгайгүй төлөв 2 сек-с дээш үргэлжилсэн тохиолдолд дуут дохиолол ажиллуулан snapshot зурагтай мэйл мэдэгдэл илгээдэг. Мөн FIRE, GAS, SMOKE төлөвүүдийн үед тусгай анхааруулга өгч, 30 сек-ын cooldown механизмаар давхардсан мэйл мэдэгдлийг хязгаарласан нь системийн бодит хэрэглээний үр ашиг, найдвартай ажиллагааг нэмэгдүүлж байна.

Туршилтыг үе шаттайгаар зохион байгуулж, эхний шатанд Edge Impulse [15] ашиглан каск таних загварын суурь боломжийг шалгасан. Хоёрдугаар шатанд Visual Studio орчинд веб камераар бодит хугацааны ажиллагааг туршсан. Гуравдугаар шатанд Raspberry Pi 4 дээр веб интерфэйсийг локал болон NGROK статик домайноор дамжуулан ажиллуулж алсын хандалтыг баталгаажуулсан. Дөрөвдүгээр шатанд каск малгайгүй байдал болон гал, утааны үед цахим шуудангийн анхааруулгын ажиллагааг туршсан.

Эдгээр туршилтын үр дүнгээс харахад систем нь зөвхөн дүрс боловсруулалтад тулгуурласан шийдэл бус, харин эмбэддэд edge төхөөрөмж, мэдрэгчийн сүлжээ, алсын веб хяналт, автомажсан шуурхай мэдэгдлийн механизмыг нэгтгэсэн цогц платформ болох нь харагдав. Энэ нь барилга, үйлдвэр, агуулах, уурхайн талбай зэрэг хөдөлмөрийн аюулгүй байдлын өндөр шаардлагатай орчинд ашиглахад тохиромжтой болохыг харуулж байна.

Цаашид энэхүү системийг олон камерын дэмжлэгтэй болгох, машин сургалтын өгөгдлийг нэмэгдүүлэн нарийвчлалыг сайжруулах, веб интерфэйст статистик мэдээлэл болон үйл явдлын логийн самбар нэмэх, Telegram, push notification зэрэг нэмэлт мэдэгдлийн сувгуудтай холбох, мөн үйлдвэрлэлийн янз бүрийн төрлийн хамгаалах хэрэгслийн ангиллыг өргөтгөх боломжтой гэж үзэж байна. Энэ судалгаа нь AI, IoT, эмбэддэд системийн нэгдлийг ашиглан хөдөлмөрийн аюулгүй ажиллагааны хяналтыг автоматжуулах бодит боломжийг харуулсан инженерчлэлийн ач холбогдолтой ажил болсон гэж дүгнэж байна.

### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ,НОМ ЗҮЙ

- [1] Raspberry Pi Foundation, "Raspberry Pi 4 Model B Documentation" <https://www.raspberrypi.com/documentation/>.
- [2] Ultralytics. Ultralytics YOLO Documentation.
- [3] Blidh, H., et al. Bleak Documentation.
- [4] Pallets. Flask Documentation.
- [5] ngrok. What is ngrok? Documentation.
- [6] "Raspberry Pi. Picamera2" GitHub Repository.
- [7] Amina Ouhoud and Amine Hakim Guezzen, "Design and implementation of an industrial security system using color cameras" Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, April 2025, DOI:10.11591/eei.v14i2.8431
- [8] Ansarimajid, "Construction-PPE-Detection" GitHub repository.
- [9] Jungmo Ahn, JaeYeon Park, Sung Sik Lee, Kyu-Hyuk Lee, Heesung Do, and JeongGil Ko, "Video-based smart safety monitoring for preventing industrial work accidents", An International Journal of Expert Systems with Applications, Nov 2022, DOI: 10.1016/j.eswa.2022.119397
- [10] yihong1120, "Construction-Hazard-Detection" GitHub repository.
- [11] yihong1120, "Construction-Hazard-Detection Hugging Face" GitHub repository.
- [12] Valentin Šimundić, Dario Mihelčić, Damian Svirac, Petra Đurović, and Robert Cupec "Safety System for Industrial Robots Based on Human Detection Using an RGB-D Camera" 44<sup>th</sup> IEEE International Convention on Information, Communication and Electronic Technology, Sep 2021, DOI: 10.23919/MIPRO52101.2021.9597007
- [13] sayedgamal99, "Real-Time Smoke & Fire Detection - YOLO11" GitHub repository.
- [14] Francesco Berardinucci and Marcello Urgo, "Advanced Computer Vision for Industrial Safety: Indoor Human Worker Localization Using Deep Learning", Springer LNME, Advances in Artificial Intelligence in Manufacturing II, Mar 2025, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-86489-6\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-031-86489-6_15)

[15] Edge Impulse Documentation.

## 5G, WiFi6 СҮЛЖЭЭНД ЗОРИУЛСАН ДАВТАМЖИЙН ДАХИН ТОХИРУУЛГАТАЙ АНТЕННЫ ЗАГВАРЧЛАЛ

Баянбатын УРАНГУА<sup>1</sup>, Энхболдын БАТЖАРГАЛ<sup>2</sup>, Азхүүгийн САРУУЛБУЯН<sup>3</sup>

Баярсайханы ПҮРЭВЦЭРЭН<sup>1а</sup>, Пүрэвдоржийн УУГАНБАЯР<sup>1а</sup>,

<sup>1,2,3</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Холбооны инженерчлэлийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [B232300001@must.edu.mn](mailto:B232300001@must.edu.mn)

*Хураангуй*—Өнөө үед 5G болон Wi-Fi 6 зэрэг утасгүй холбооны өндөр хурдны системүүдэд олон давтамжийн зурваст ажиллах чадвартай, авсаархан антенны шийдэл нэн шаардлагатай байна. Энэхүү өгүүлэлд варактор диод ашиглан ажлын давтамжаа цахилгаан аргаар дахин тохируулдаг бичил туузан антенны загварыг санал болгож байна. Судалгааны зорилго нь варактор диодын багтаамжийг өөрчлөх замаар антенны цахилгаан уртыг зохицуулж, нэг антенныг олон өөр давтамжийн мужид үр ашигтай ажиллуулахад оршино. Санал болгож буй антенн нь FR-4 диэлектрик материал дээр суурилсан, 50×60мм<sup>2</sup> хэмжээтэй бөгөөд 50Ω-ын бичил туузан шугамаар тэжээгдэнэ. Антенны бүтцэд нэгтгэсэн диодын багтаамжийн өөр төлөвийн тусламжтайгаар 5ГГц (5G NR n79), 6ГГц (Wi-Fi 6), болон 3.6ГГц (5G NR n78) давтамжийн мужуудад шилжин ажиллах боломжийг бүрдүүлсэн. Загварчлалыг CST Studio Suite программ дээр гүйцэтгэж, ойлтын коэффициент ( $S_{11}$ ), цацаргалтын диаграмм болон өсгөлтийн үзүүлэлтүүдийг тодорхойлов. Симуляцийн үр дүнгээс харахад бүх ажлын горимд ойлтын коэффициент  $S_{11} < -10$ дБ буюу тааруулалт сайн байгаа бөгөөд хамгийн их өсгөлт 5–6дБ байна. Цаашид хоёр программын тооцооллыг харьцуулан шинжилснээр загварчлалын найдвартай байдлыг нотлох бөгөөд энэхүү антенн нь орчин үеийн утасгүй холбооны төхөөрөмжүүдэд ашиглагдах бүрэн боломжтой юм.

*Тулхуур үг*—бичил туузан антенн, варактор диод, давтамжийн дахин тохируулга,

### I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд утасгүй холбооны технологи хурдацтай хөгжиж, өгөгдөл дамжуулах хурд, сүлжээний багтаамж болон олон төрлийн үйлчилгээний хэрэгцээ тасралтгүй нэмэгдэж байна. Ялангуяа 5G болон WiFi6 зэрэг шинэ үеийн утасгүй холбооны системүүд нь өндөр хурд, өргөн зурвас болон олон хэрэглэгчийг нэгэн зэрэг дэмжих шаардлагатай болж байна [6]–[8]. Ийм нөхцөлд холбооны төхөөрөмжүүдэд ашиглагдах антенн нь олон давтамжийн мужид ажиллах, уян хатан тохируулгатай байх шаардлага улам нэмэгдэж байна [1], [2].

Давтамжийн дахин тохируулгыг хэрэгжүүлэхэд PIN диод, варактор диод болон бичил цахилгаан механик элементүүдийг өргөн ашигладаг [9]. Эдгээрийн дотроос варактор диод нь өгөгдөх хүчдэлээс хамааран багтаамж нь өөрчлөгддөг тул антенны ажлын давтамжийг тасралтгүй өөрчлөх боломж олгодог [3], [5]. Иймд варактор диод ашигласан бичил туузан антенн нь давтамжийн тохируулга хийхэд тохиромжтой шийдэл болдог [4].

### II. АЖИЛЛАГААНЫ ЗАРЧИМ

Варактор диод нь буруу туйлтын хүчдэл  $V_{bias}$  аар тэжээгдэх үед диодын багтаамж  $C_v$  өөрчлөгдөж, антенны эквивалент хэлхээний нийт реактив импеданст нөлөөлдөг [3], [5]. Антенны нэмэлт хэсэгт байрлуулсан варактор диод нь цацруулагч хавтгайн цахилгаан орны шинж чанрыг

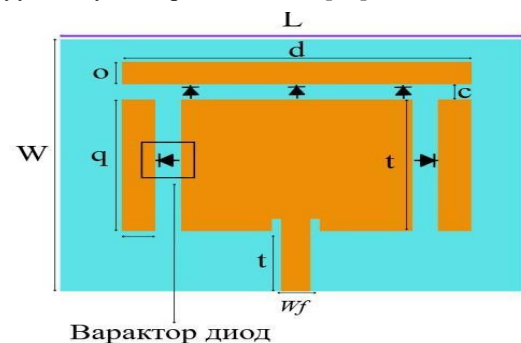
өөрчилж, ажлын давтамжийг шилжүүлдэг. Хүчдэл нэмэгдэх тусам давтамж өндөрсөх дараалал:

$$V_{bias} \uparrow \Rightarrow C_v \downarrow \Rightarrow L_{eff} \downarrow \Rightarrow f_r \uparrow \quad (1)$$

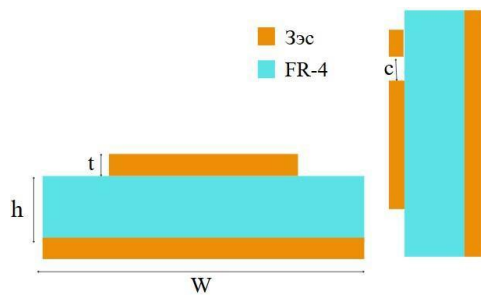
### III. АНТЕННЫ ЗАГВАРЧЛАЛ

#### A. Substrate болон геометрийн бүтэц

Санал болгож буй антенн нь FR-4 substrate дээр хийгдсэн бичил туузан цацруулагч хавтгай бөгөөд харьцангуй диэлектрик тогтмол  $\epsilon_r = 4.4$ , substrate-ийн зузаан  $h = 1.6$ мм байна. Антенны нийт хэмжээ 50мм×60мм бөгөөд 50Ω бичил туузан шугамаар тэжээгдэнэ [11].



Зураг 1. Бичил туузан антенны загвар дээрээс харсан дүрс



Зураг 2. Бичил туузан антенны загвар — хажуугаас харсан дүрс

**B. Patch антенны хэмжээний тооцоолол**

Patch антенны өргөн  $W$  болон урт  $L$ -ийг дараах стандарт томъёогоор тооцоолно [1], [11]:

**Өргөн (Width):**

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2)$$

**Үр дүнтэй диэлектрик тогтмол:**

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-1/2} \quad (3)$$

**Урт (Length):**

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (4)$$

**C. Слот (Ховил)-ийн тооцоолол**

Варактор диод байрлуулах ховилын хэмжээний тооцоолол [4]:

**Ховилын урт:**

$$L_s = \frac{\lambda_g}{2} \quad (5)$$

**Ховилын өргөн:**

$$W_s = 0.05 \lambda_g \text{ мм} \quad (6)$$

Энд  $\lambda_g = c/(f_r \sqrt{\epsilon_{eff}})$  нь substrate дэх долгионы урт юм. Тооцооллын үр дүнгийг 1-р хүснэгтэд харуулав.

Patch антенны загварын хэмжээний үр дүн  
1-р хүснэгт

Параметр	Тэмдэглэгээ	Утга (мм)
Patch өргөн	$W$	30.0
Patch урт	$L$	22.5
Тэжээлийн өргөн	$W_f$	3.1
Нийт хавтгайн урт	$L_{total}$	50.0
Нийт хавтгайн өргөн	$W_{total}$	60.0

**D. Варактор диодоор холболт нэмэх**

Варактор диодыг ховилд хэрхэн холбох нь антенны үр ашигт нөлөөлдөг. Диод холбосон үед нэмэгдэх нийт цахилгаан урт [5]:

$$L_{eff} = L + \frac{c}{2\pi f_r} \arctan \frac{1}{2\pi f_r C_v Z_0} \quad (7)$$

энд  $Z_0 = 50\Omega$  холбооны эсэргүүцэл,  $C_v$  нь варактор диодын багтаамж юм.

**E. Давтамжийн тохируулгын горимууд ба варактор диодын багтаамж**

Варактор диодын багтаамж  $C_v$  нь хүчдэлийн өөрчлөлтөөр тодорхойлогдоно [3]:

$$C_v(V) = \frac{C_{j0}}{v \left(1 + \frac{V}{V_j}\right)^m} \quad (8)$$

Оролтын хүчдэл болон багтаамжийн утгаас хамааран антенн өөр өөр горимд ажиллана [6], [7]. Хүснэгт II-д хүчдэл болон багтаамжийн харьцааг, Хүснэгт III-д горим тус бүрийн тохиргоог харуулав.

Варактор диодын хүчдэл-багтаамжийн харьцаа  
1-р хүснэгт

Хүчдэл $V$ (В)	Багтаамж $C_v$ (пФ)	Ажлын давтамж (ГГц)
0	2.80	3.60
1	1.87	4.20
2	1.54	4.50
3	1.34	4.60
4	1.20	4.75
5	1.09	4.80

Антенны ажлын горимуудын тохиргоо  
2-р хүснэгт

Горим	Багтаамж (пФ)	Давтамж (ГГц)	Систем
Mode1	0.1	6.0	WiFi6
Mode2	2.0	5.0	5G n77
Mode3	2.8	3.6	5G NR n78

**IV. ЗАГВАРЧЛАЛЫН ҮР ДҮН**

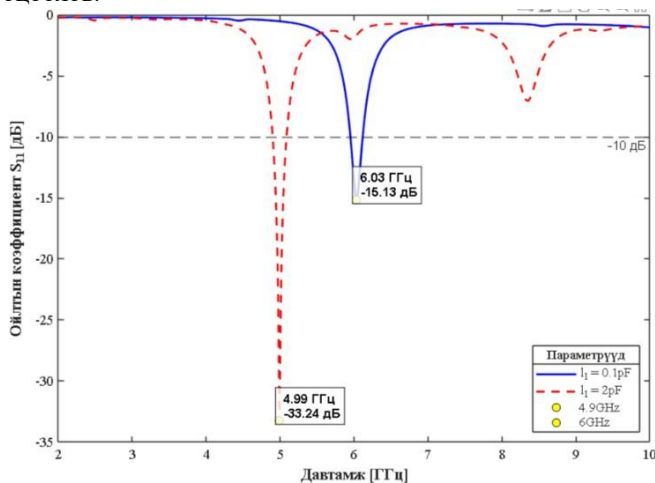
**A. Ойлтын коэффициент**

CST программаар хийгдсэн загварчлалын  $S_{11}$  буцаан ойлтын коэффициентийн үр дүнг Зураг 3-д харуулав. Гурван горимд ч  $S_{11} < -10\text{дБ}$  байгаа нь антенн тухайн давтамжид сайн тааруулагдсаныг харуулж байна.

**B. Гадаргуугийн гүйдлийн тархалт**

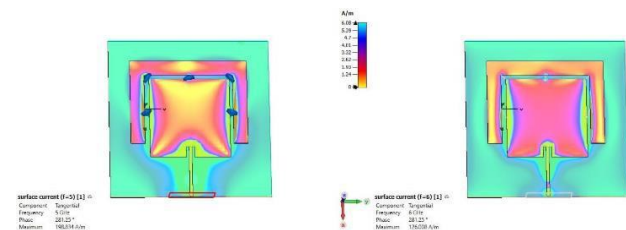
Антенны цацаргалтын механизмыг тодорхойлоход гадаргуугийн гүйдлийн (surface current) тархалтын

шинжилгээ чухал үүрэгтэй. CST загварчлалаар 6ГГц болон 5ГГц давтамжид гадаргуугийн гүйдлийн тархалтыг тооцоолов.



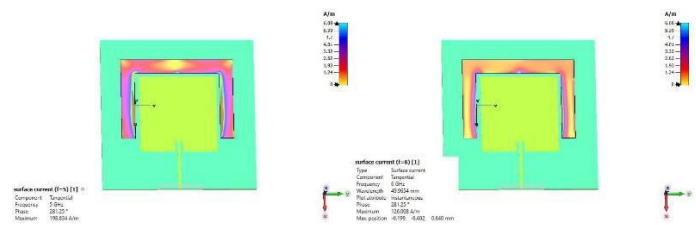
Зураг 3. 2 горимын S<sub>11</sub> ойлтын коэффициентийн хамаарал

1) 6 ГГц дээрх гадаргуугийн гүйдэл (Mode1 — WiFi6):  
Зураг 4-аас харахад 6ГГц давтамжид гүйдлийн нягтрал patch-ийн дунд хэсэгт болон ховилын эргэн тойронд хамгийн өндөр байна. Варактор диодын багтаамж  $C_v = 0.1\text{пФ}$  үед цахилгаан орны холбоо хаагдаж, цацруулагч хавтгайн эффектив урт богиносч, ажлын давтамж 6ГГцд тогтдог. Гүйдлийн тархалт нэг чиглэлтэй бөгөөд тэгш хэмтэй хэлбэртэй байгаа нь антенны цацалтын хэлбэрийн сайн шинж юм.



Зураг 4. 5 ГГц, 6ГГц дээрх гадаргуугийн гүйдлийн тархалт (Mode1,  $C_v = 0.1\text{пФ}$ , Mode2,  $C_v = 2.0\text{пФ}$ )

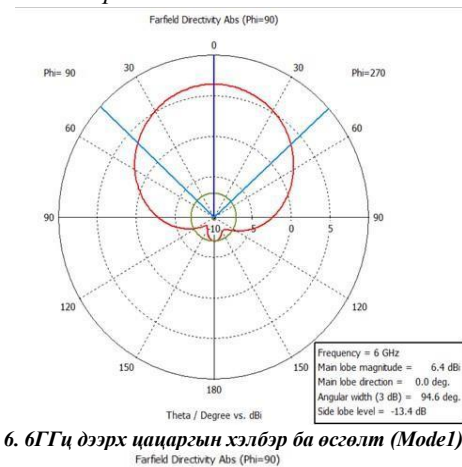
2) 5 ГГц дээрх гадаргуугийн гүйдэл (Mode2 — 5G n77): 5ГГц давтамжид ( $C_v = 2.0\text{пФ}$ ) гүйдлийн нягтрал нь patch-ийн ирмэг болон тэжээлийн шугамтай холбогдох хэсэгт тархаж байна (Зураг 5). Багтаамж нэмэгдэхийн хэрээр антенны эффектив урт уртасч, цацаргалтын давтамж буурч 5ГГц-д шилжсэнийг гүйдлийн тархалтын хэлбэр тодорхой харуулж байна. Ховилын хоёр захад гүйдлийн фаз урвуу байгаа нь варактор диодын ажиллагааны гол механизм болно.



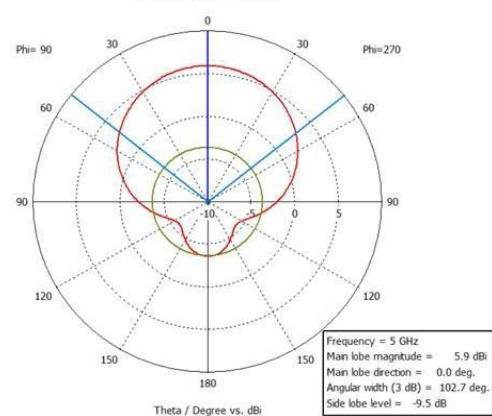
Зураг 5. 5 ГГц, 6ГГц дээрх нэтэлт хэсгийн гадаргуугийн гүйдлийн тархалт (Mode1,  $C_v = 0.1\text{пФ}$ , Mode2,  $C_v = 2.0\text{пФ}$ )

3) Хоёр горимын гадаргуугийн гүйдлийн харьцуулалтаас дараах дүгнэлт гарч байна:  $C_v$  нэмэгдэх тусам гүйдлийн нягтрал patch-ийн захруу шилжиж, эффектив нийт урт нэмэгдэн давтамж буурч байна Зураг 5. Энэ нь (1) томьёонд тодорхойлсон тохируулгын зарчимтай бүрэн нийцэж байна.

С. Цацралтын хэлбэр ба өсгөлт



Зураг 6. 6ГГц дээрх цацаргын хэлбэр ба өсгөлт (Mode1)



Зураг 7. 5ГГц дээрх цацаргын хэлбэр ба өсгөлт (Mode2)

Цацралтын хэлбэрийн загварчлалаас харахад антенн бүх горимд нэг чиглэлтэй цацралтын хэв маягтай бөгөөд хамгийн их өсгөлт нь 5–6дБ орчим байна [15].

## D. CST загварчлалын үндсэн үзүүлэлтүүд

CST загварчилсан антенны үндсэн үзүүлэлтүүд 1-р хүснэгт

Горим	Давтамж (ГГц)	$S_{11}$ (дБ)	Өсгөлт (дБи)	Зурвасын өргөн (МГц)
Mode1	6.03	-15.13	6.4	120
Mode2	4.99	-33.24	5.9	110
Mode3	3.60	—	—	—

## ДҮГНЭЛТ

Энэхүү өгүүлэлд 5G болон Wi-Fi6 системүүдэд зориулсан варактор диод ашигласан давтамжаа дахин тохируулдаг бичил туузан антенны загварыг санал болгож, загварчлалын дүнг тодорхойлов. Загварчлалын үр дүнгээс дараах дүгнэлтийг гаргав:

- Варактор диодын багтаамжийн тохируулгаар антенн Mode1 (6ГГц), Mode2 (5ГГц), Mode3 (3.6ГГц) гэсэн гурван ажлын горимд шилжих боломжтой [6]–[8].
- Бүх горимд  $S_{11} < -10$ дБ байгаа нь антенны зохих ажлын давтамжид сайн тааруулагдсаныг баталж байна.
- Антенны хамгийн их өсгөлт 5–6дБи бөгөөд нэг чиглэлтэй цацралтын хэлбэртэй.
- Гадаргуугийн гүйдлийн шинжилгээнээс варактор диодын багтаамж нэмэгдэхэд гүйдлийн тархалт patch-ийн захруу шилжиж, ажлын давтамж буурах механизм тодорхой нотлогдов.

Ирээдүйд энэхүү антенны загварыг бодитоор үйлдвэрлэж, хэмжилтийн үр дүнтэй харьцуулах, мөн машин сургалтын аргыг ашиглан антенны горим сонгох автомат системийг боловсруулах ажлыг үргэлжлүүлэн хийхээр төлөвлөж байна.

## АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016.
- [2] J. T. Bernhard, *Reconfigurable Antennas*, ser. Synthesis Lectures on Antennas, vol. 2. San Rafael, CA, USA: Morgan & Claypool, 2007.
- [3] A. Khidre, K.-F. Lee, F. Yang, and A. Z. Elsherbeni, "Circular polarization reconfigurable wideband E-shaped patch antenna for wireless applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 2, pp. 960–964, Feb. 2013, doi: 10.1109/TAP.2012.2220319.
- [4] D. Peroulis, K. Sarabandi, and L. P. B. Katehi, "Design of reconfigurable slot antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 2, pp. 645–654, Feb. 2005, doi: 10.1109/TAP.2004.841339.
- [5] C. Won, I. Kwon, and J. Choi, "Design and analysis of a varactor-tuned dual-band reconfigurable antenna for 5G NR sub-6GHz applications," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 120243–120253, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3108658.
- [6] 3GPP, "TS 38.104: NR; Base station (BS) radio transmission and reception," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Tech. Spec. 38.104 v17.6.0, 2022. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/DynaReport/38104.htm>
- [7] IEEE, "IEEE Std 802.11ax-2021: IEEE standard for information technology—wireless LAN MAC and PHY specifications—amendment 1: Enhancements for high-efficiency WLAN," Institute of

Electrical and Electronics Engineers, New York, NY, USA, 2021, doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9442429.

- [8] IEEE, "IEEE Std 802.11be-2024: IEEE standard for information technology—wireless LAN MAC and PHY specifications—amendment: Extremely high throughput (EHT)," Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, NY, USA, 2024, doi: 10.1109/IEEESTD.2024.10590669.
- [9] S. Nikolaou *et al.*, "Pattern and frequency reconfigurable annular slot antenna using PIN diodes," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 2, pp. 439–448, Feb. 2006, doi: 10.1109/TAP.2005.863398.
- [10] S. Zhang, G. H. Huff, J. Feng, and J. T. Bernhard, "A pattern reconfigurable microstrip parasitic array," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 10, pp. 2773–2776, Oct. 2004, doi: 10.1109/TAP.2004.834440.
- [11] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- [12] Dassault Systèmes, *CST Studio Suite 2022—Electromagnetic Field Simulation Software*. Vélizy-Villacoublay, France: Dassault Systèmes SE, 2022. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/products/simulia/cststudio-suite>
- [13] ANSYS Inc., *ANSYS HFSS 2022—High Frequency Structure Simulator*. Canonsburg, PA, USA: ANSYS Inc., 2022. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>
- [14] N. Nguyen-Trong, A. Piotrowski, and C. Fumeaux, "A frequency-reconfigurable dual-band low-profile antenna for 2.4/5.2/5.8GHz WLAN applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 7, pp. 3336–3343, Jul. 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2700087.
- [15] H. A. Majid, M. K. A. Rahim, M. R. Hamid, and M. F. Ismail, "Frequency reconfigurable microstrip patch-slot antenna with directional radiation pattern," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 144, pp. 319–328, 2014, doi: 10.2528/PIER13111807.
- [16] ITU-R, "Technical characteristics of IMT-2020 radio interfaces," International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, Recommendation ITU-R M.2150-0, 2022. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2150/en>

# УЛААНБААТАР ХОТЫН ХАЛАЛТЫН БҮСИЙН ШИНЖИЛГЭЭ БА НОГООН БАЙГУУЛАМЖИЙН БАЙРШЛЫГ ХИЙМЭЛ ДАГУУЛЫН ӨГӨГДӨЛ БА МАШИН СУРГАЛТАД ҮНДЭСЛЭН ОНОВЧЛОХ

Нямдоржийн ЦАЦРАЛ<sup>1</sup>, Гомбодоржийн ОЮУНОМИН<sup>2</sup>, Ганбаатарын ГАНБАТ<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Компьютерын Ухааны тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: nyamdorjtsratsral5@gmail.com

**Хураангуй:** Энэхүү судалгаанд Улаанбаатар хотын газрын гадаргын температурын (LST) орон зайн тархалтыг Landsat 9 хиймэл дагуулын 30м нарийвчлалын өгөгдлийг ашиглан зун, өвөл, хавар гэсэн гурван улирлаар шинжлэв.  $\mu+2\sigma$  статистикийн босго аргачлалаар зуны халуун цэгийн (hotspot) талбай 1.01 км<sup>2</sup>, хаврын халуун цэгийн (hotspot) 1.23 км<sup>2</sup> болохыг тогтоов. LST-NDVI корреляц  $r = -0.732$  ( $p < 0.001$ ), Moran's I = 0.965. Хаврын UHI intensity (+2.84°C) нь зуны (+1.99°C) -аас 43%-иар өндөр байгаа нь хаврын ургамлан бүрхэвчийн хурц дутагдалтай (233 км<sup>2</sup> vs 951 км<sup>2</sup>) холбоотой. AHP-MCDA аргачлалаар (CR = 0.006) 315.96 км<sup>2</sup> боломжит газрыг газрын хэмжээгээр ялган байгалийн шийдлийн зөвлөмж боловсруулав: маш өндөр тэргүүлэх 1.20 км<sup>2</sup> жижиг бүсэд жижиг ногоон байгууламж болон дээврийн цэцэрлэг roof garden/pocket garden, дунд 29.51 км<sup>2</sup> бүсэд мод, 285 км<sup>2</sup> бүсэд windbreak салхины зурвас. Random Forest classifier (accuracy = 87.3%) болон GEE-д суурилсан автомат мониторинг+зөвлөмжийн систем нь улирал бүр LST шалгаж, шинэ hotspot-д тохирох ногоон байгууламжийн төрлийг 4–7 минутад санал болгодог практик хэрэгслийг бий болгов.

**Түлхүүр үг:** хотын дулааны арал, LST, NDVI, AHP-MCDA, Random Forest, GEE мониторинг, шороон шуурга

## I. УДИРТГАЛ

Хотжилтын хурдацтай өсөлтийн улмаас дэлхийн хотуудад хүрээлэн буй орчны температурын өөрчлөлт (Urban Heat Island, UHI) нэмэгдэж байна. UHI нь хотын газрын гадаргын температур (LST)-ийг хүрээлэн буй ойролцоох бүс нутагтай харьцуулахад 2–10°C өндөр болгодог бөгөөд эрүүл мэнд, эрчим хүчний хэрэглээ, уур амьсгалын нөлөөллийг нэмэгдүүлдэг [1].

Улаанбаатар хот нь далайгаас хол, 1300 м өндөрт орших, жилийн дундаж хур тунадас ~260 мм буюу хуурай эрс тэс эх газрын уур амьсгалтай, дэлхийн хамгийн хүйтэн нийслэлүүдийн нэг юм. 1990-ээд оноос хойш хүн ам 3 дахин нэмэгдэж, хурдацтай хотжилтоос үүдэн ногоон бүрхэвч буурч, дулааны хуримтлал нэмэгдэж байна. Мөн хаврын улиралд Говиос ирэх шороон шуурга нь MODIS AOD = 0.919 утгад хүрч, шуурганы идэвхтэй босгыг (AOD > 0.6) 53%-иар давж байна.

Өмнөх судалгаанууд UHI болон шороон шуургыг тусдаа авч үзэж, зөвхөн нэг улирлаар хязгаарлагдан судалж байсан [5]. Энэхүү судалгаа нь: (1) зун, өвөл, хавар гэх гурван улирлын нэгдсэн LST шинжилгээ, (2) шороон шуурга болон UHI-г нэгтгэсэн ERA5+AOD шинжилгээ, (3) газрын хэмжээгээр ялгасан байгалийн шийдлийн зөвлөмж, (4) Random Forest + GEE автомат мониторинг системийн хосолсон хэрэгжилт гэсэн шинэлэг хувь нэмрийг оруулж байна.

## II. ОНОЛЫН ХЭСЭГ

### A. Үндсэн ойлголт, тодорхойлолт

Хүрээлэн буй орчны температурын өөрчлөлтийн (UHI) гэдэг нь хот болон ойролцоох

бүс нутгийн LST-ийн зөрүүгээр тодорхойлогддог.

$$UHI_{intensity} = LST_{hot} - LST$$

ойролцоох газар нутаг томъёогоор тооцоолно. LST нь агаарын температурыг биш гадаргуугийн температурыг хэмждэг тул хиймэл дагуулаас хэмжихэд тохиромжтой [2].

Ургамлын нормальчилсан индекс (NDVI) нь ургамлан бүрхэвчийн нягтралыг хэмждэг:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}, \text{ утга нь } -1 \sim +1$$

хооронд хэмжигдэх ба өндөр утга нь ургамлын бүрхэвч нягт байгааг илэрхийлнэ. Барилгажилтын индекс (NDBI) нь хотын бүтэц байгууламжийг илэрхийлнэ:  $NDBI = \frac{(SWIR + NIR)}{(SWIR - NIR)}$ . Aerosol Optical Depth (AOD) нь агаар дахь тоосны нягтыг илэрхийлэх хэмжигдэхүүн бөгөөд AOD > 0.6 нь шороон шуурганы идэвхтэй үеийг илтгэнэ [12].

### B. LST тооцооллын онолын үндэслэл

Газрын гадаргын температурыг хиймэл дагуулын дулааны инфрагийн мэдрэгчээс тооцоолохдоо Jimenez-Munoz et al. (2008) аргачлалыг ашигладаг [11]. Тооцооллын алхамууд:

- 1-р алхам: Landsat 9-ийн Band 10 (дулааны IR)-г гэрэлтэлтийн температур (TB)-д хөрвүүлэх масштабын коэффициент  $\times 0.00341802 + 149.0$  (K)
- 2-р алхам: NDVI-аас ургамлын эзлэх хувийг (Pv) тооцоолох
- 3-р алхам:  $P_v$ -ээс дулааны ялгаруулалт (LSE буюу  $\epsilon$ )-ийг тооцоолох
- 4-р алхам:  $T_B$  болон  $\epsilon$ -ийг LST тооцооллын томъёонд орлуулах

Гэрэлтэлтийн температурыг LST болгон хөрвүүлэх үндсэн томьёо:

$$LST = \frac{T_B}{1 + (\frac{\lambda T_B}{\rho}) \cdot \ln(\epsilon)} \quad (1)$$

Энд:  $T_B$  гэрэлтэлтийн температур (K);  $\lambda = 10.895 \mu\text{m}$  (Landsat 9 Band 10-ийн төв долгионы урт);  $\rho = h \cdot c / \sigma = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$  (Планкийн тогтмол  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , гэрлийн хурд  $c$ , Больцманы тогтмол  $\sigma$ );  $\epsilon$  газрын гадаргын дулааны ялгаруулалт.

Ургамлын эзлэх хувийн томьёо:

$$P_v = \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \dots (2)$$

Дулааны ялгаруулалтын томьёо:

$$\epsilon = 0.986 + 0.004 \cdot P_v \dots (3)$$

Энд:  $NDVI_{min} = 0.2$  (ургамалгүй хөрс),  $NDVI_{max} = 0.8$  (нягт ургамалтай).  $\epsilon$  утга нь 0.986–0.990 хооронд байна.

**В. Орон зайн статистикийн аргачлал**

Hotspot цаашид халуун цэг гэж нэрлэж явна. Хамгийн халуун цэгийг илрүүлэхэд статистикийн босго (Threshold Method) аргачлалыг ашиглав.  $\mu$  LST-ийн дундаж,  $\sigma$  стандарт хазайлт байхад:

$$\text{Халуун цэгийн бүс: } LST > \mu + 2\sigma \quad (4)$$

$$\text{Халуун бүс: } LST > \mu + 1\sigma \quad (5)$$

Орон зайн бүтцийг баталгаажуулахад Moran's I индексийг ашиглав:

$$I = \frac{n}{S_0} \cdot \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} \cdot z_i \cdot z_j}{\sum_i z_i^2} \quad (6)$$

Энд:  $n$  нийт pixel-ийн тоо;  $z_i = x_i - x$  (LST-ийн дундажаас хазайлт);  $w_{ij}$  орон зайн жингийн матриц (kernel-based);  $S_0 = \sum_i \sum_j w_{ij}$  (бүх жингийн нийлбэр).  $I \approx 1$  нь өндөр орон зайн бөөгнөрөл,  $I \approx 0$  нь санамсаргүй тархалт,  $I \approx -1$  нь сарнисан тархалтыг илтгэнэ.

**Г. АНР-МСДА онол**

Шаталсан шинжилгээний арга (Saaty, 1980) нь олон шалгуурыг харьцуулсан жингүүдийг тооцоолох аргачлал [7]. Хосоор харьцуулалтын матрицаас вектор (Eigenvector) аргаар жингүүдийг олж, Consistency Ratio (CR)-ийг тооцоолно:

$$CR = \frac{CI}{RI} \dots (7)$$

Энд:  $CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)}$  Consistency Index;  $\lambda_{max}$

матрицийн хамгийн том өөрийн утга;  $n$  шалгуурын тоо;  $RI$  санамсаргүй индекс ( $n = 5$  бол  $RI = 1.12$ ).  $CR < 0.10$  байх нь жингүүд найдвартай гэдгийг нотолно.

МСДА-ийн оновчтой оноо:

$$Score = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_{i\text{норм}} \dots (8)$$

Энд:  $w_i$  АНР-аар тооцоолсон  $i$ -р шалгуурын жин;  $x_{i\text{норм}}$  0–1 хооронд нормчилсон  $i$ -р шалгуурын утга;  $n$  нийт шалгуурын тоо..

**Д. Random Forest алгоритмын онол**

Random Forest нь олон тооны шийдвэрийн модийг нэгтгэдэг хамтын сургалтын (ensemble learning) арга [14]. Ангилалтын үр дүнг олонхийн саналын аргаар гаргадаг:

$$\hat{y} = \text{mode}\{h_1(x), h_2(x), \dots, h_n(x)\} \dots (9)$$

Энд:  $h_i(x)$   $i$ -р шийдлийн модны таамаглал;  $n$  модны тоо. Мод бүр багцын нэгтгэл (Bagging) аргаар сургалтын өгөгдлийн санамсаргүй хэсгийг авч сургагддаг тул хэт тохируулалтын эрсдэл буурдаг. Шинжийн хч холбогдол нь (Feature importance) нь Gini impurity-ийн буурлыг дунджаар хэмжиж тодорхойлогдоно.

**III. СУДАЛГААНЫ ХЭСЭГ**

**А. Судлагдсан байдал**

Ulziisuren et al. (2021) нь Landsat 8 өгөгдлөөр Улаанбаатарын зуны УНН-г тодорхойлж хотын цөм 5–8°C дулаан болохыг тогтоосон боловч зөвхөн нэг улирлаар хязгаарлагдсан [5]. Weng et al. (2004) нь Гуанжоу хотод LST–NDVI корреляц  $r = -0.74$ , 1% NDVI нэмэгдэхэд LST 0.5°C буурдаг гэж тогтоосон [4]. Bowler et al. (2010) нь 52 судалгааны мета-анализаар ногоон байгууламж 0.5–4°C LST бууруулдаг болохыг харуулсан [9]. Kong et al. (2014) нь хагас хуурай хотуудад windbreak нь AOD-г 40–65% бууруулдаг болохыг баталгаажуулсан [10]. Эдгээр судалгаанаас ялгаатай нь энэхүү судалгаа нь машин сургалтад суурилсан автомат зөвлөмжийн системийг УНН+AOD шинжилгээтэй нэгтгэсэн анхны судалгаа болж байна.

**Б. Өгөгдлийн эх үүсвэр**

*1-р хүснэгт. Судалгаанд ашигласан өгөгдлийн эх үүсвэр.*

Өгөгдөл	Хугацаа	Нарийвчлал	Зорилго
Landsat 9 C2 L2	2020–2024	30 м	LST, NDVI, NDBI
MODIS MOD13A3	2003–2024	1 км	NDVI trend
MODIS MOD08_M3	2020–2024	1°	AOD (шуурга)
MODIS MCD12Q1	2005–2023	500 м	Land Cover
ERA5 Reanalysis	2020–2024	9 км	Салхины чиглэл
ESA WorldCover	2021	10 м	Газрын ашиглалт

**В. Судалгааны арга зүй**

LST тооцооллыг II.Б хэсэгт тайлбарласан (1) (3) томьёогоор хэрэгжүүлэв. Landsat 9 Collection 2

Level-2 өгөгдлийг Google Earth Engine платформ дээр боловсруулж, 2020–2024 оны улирал бүрийн медиан зургийг ашигласан (cloud cover < 15%). Өвлийн шинжилгээнд NDSI < 0.4 шалгуураар цасны маскыг нэмж, халуун цэгийн шинжилгээнд (4)–(6) томьёог ашиглав.

АНР-МСДА оновчлолд (7)–(8) томьёог ашиглан дараах 5 шалгуурыг жинлэв:

2-р хүснэгт. АНР жингүүдийн тооцоолол (CR = 0.006 < 0.10).

Шалгуур	Жин (w <sub>i</sub> )	%	Томьёоны утга
Зуны LST өндөр	0.303	30.3	$x_1: LST_{зун}$
Хаврын нүцгэн газар	0.303	30.3	$x_2: 1 - NDVI_{хавар}$
Хаврын LST өндөр	0.165	16.5	$x_3: LST_{хавар}$
Бага NDVI (зун)	0.165	16.5	$x_4: 1 - NDVI_{зун}$
Бага NDBI	0.065	6.5	$x_5: 1 - NDBI$

**Г. Мониторинг ба Зөвлөмжийн Системийн Архитектур**

Random Forest classifier (Д. хэсэгт тайлбарласан аргачлалын дагуу) GEE автомат мониторингтой хослуулсан нэгдсэн системийн архитектурыг доорх байдлаар боловсруулав. 8 оролтын хувьсагч: зун, хавар, өвлийн дундаж LST, зуны NDVI болон NDVI жилийн хандлага, NDBI, SRTM налуу, ESA газрын ангилал, хаврын AOD. Гаралтын ангилал 4: (1) Салхи зогсоогч/ойжуулалт, (2) Гудамжны мод/цэцэрлэгт хүрээлэн, (3) Жижиг ногоон байгууламж, (4) Дээвэр/босоо цэцэрлэг.

Системийн ажиллагааны 5 алхам:

- Мониторинг: улирал бүр (3 сар тутамд) Landsat-ийн шинэ зургийг GEE-д автоматаар татаж LST, NDVI тооцоолно
- Илрүүлэлт:  $\mu + 2\sigma$  босгыг динамикаар шинэчилж, өмнөх улиралтай харьцуулан шинэ халуун цэгийн бүс илрэхэд тэмдэглэнэ
- Ангилал: шинэ халуун цэгийн бүсийн 8 хувьсагчийг RF classifier-т оруулж, тухайн байршилд тохирох ногоон байгууламжийн төрлийг таамагласны үр дүнг АНР – МСДА оноотой хослуулан эцсийн зөвлөмж гаргана
- AOD хяналт: хаврын AOD  $\geq 0.6$  болоход шороон шуурганы өндөр эрсдлийн мэдэгдэл гаргана
- Dashboard: GEE-ийн тайлангийн хэрэгслээр үр дүнг бодит цагаар харуулж хотын захиргаанд дэмжлэг үзүүлнэ

RF загварыг sklearn RandomForestClassifier ( $n_{estimators} = 100$ ,  $max_{depth} = 8$ ,  $random_{state} = 42$ )-ийн тохиргоогоор Google Colab-д сургасан. Сургалтын өгөгдөл болгон МСДА-аар тодорхойлсон 315.96 км<sup>2</sup> боломжит газраас

ангилсан санамсаргүй түүвэрлэлтээр (stratified random sampling) ангилал тус бүрээс тэнцүү тооны дээж авч нийт 2847 пикселийн өгөгдлийг ашиглав (сургалт 80%: тест 20%). Гүйцэтгэлийг 5-fold cross-validation-аар үнэлэв.

**IV. ҮР ДҮН**

**А. Улирлын LST ба UHI Intensity**

Гурван улирлын Landsat 9 шинжилгээний нэгдсэн үр дүнг 3-р хүснэгтэд харуулав. Хаврын UHI intensity (+2.84°C) нь зуны (+1.99°C) -аас 43%-иар өндөр байгаа нь хаврын ногоон бүрхэвч (233 км<sup>2</sup>) зуны (951 км<sup>2</sup>) -аас 4 дахин бага байгаатай шууд холбоотой болохыг 1-р зургийн LST хуваарилал баталж байна.Өвлийн UHI intensity (-3.30°C) сөрөг утга авсан нь хот хөдөөгөөс харьцангуй хүйтэн байгааг илэрхийлэх бөгөөд энэ нь өвлийн утаа, агаарын бохирдлоос үүдэлтэй aerosol-ийн нарны цацрагийг хааж дулааны шингээлтийг бууруулж байгаатай холбоотой байж болзошгүй юм .

1-р хүснэгт. Улирлын LST болон UHI intensity (Landsat 9, 2020–2024).

Үзүүлэлт	Зун	Өвөл*	Хавар	Нэг ж
Хот дундаж LST (μ)	34.34	-14.44	15.62	°C
Хөдөөгийн дундаж LST	31.26	-12.35	13.60	°C
UHI intensity	+3.09	-2.09	+2.02	°C
Стандарт хазайлт (σ)	4.91	4.57	6.99	°C
Халуун цэгийн босго (μ+2σ)	37.7	-8.5	21.9	°C
Халуун цэгийн талбай	1.01	19.39	0.83	км <sup>2</sup>
Халуун бүс (μ+1σ)	133.62	109.37	122.39	км <sup>2</sup>
Ногоон бүрхэвч (NDVI>0.2)	951	—	233	км <sup>2</sup>
Нүцгэн газар (NDVI<0.1)	—	—	100.58	км <sup>2</sup>

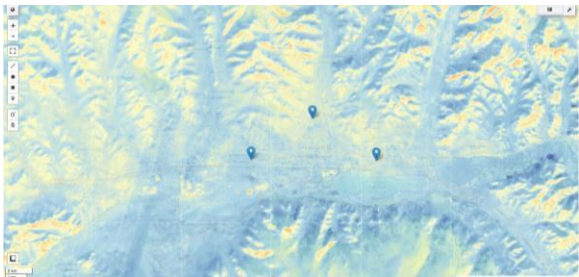
\* NDSI < 0.4 цасны маскаар өвлийн цасны нөлөөг арилгасан.



1-р зураг. Улаанбаатарын LST хуваарилал бодит Landsat 9 өгөгдөл. (а) Зун: μ=34.35°C, халуун цэг=42.88°C;



1-р зураг. Улаанбаатарын LST хуваарилал бодит Landsat 9 өгөгдөл. (b) Хавар:  $\mu=14.06^{\circ}\text{C}$ , халуун бүс= $21.80^{\circ}\text{C}$ ;



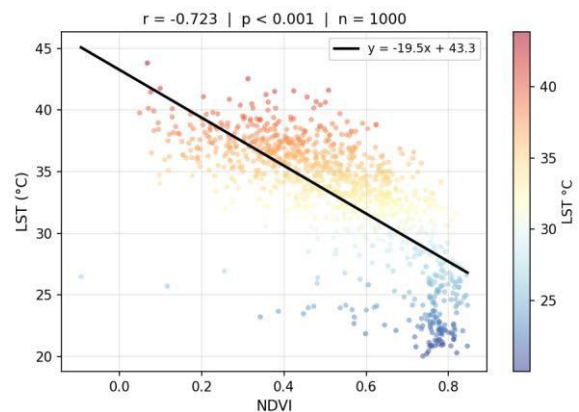
1-р зураг. Улаанбаатарын LST хуваарилал бодит Landsat 9 өгөгдөл. (c) Өвөл:  $\mu=-14.44^{\circ}\text{C}$ .

1-р болон 2-р зургаас харахад Landsat 9 (2020–2024)-ийн бодит өгөгдлөөр Улаанбаатарын гурван улирлын LST тархалтын орон зайн загвар тодорхой ялгаатай байна. Зуны зурагт ( $\mu=34.34^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma=4.27^{\circ}\text{C}$ ) хотын цөмийн бүс улаанаар ялгарч,  $\mu+2\sigma=42.88^{\circ}\text{C}$ -аас давсан халуун цэгийн бүс  $1.01\text{ км}^2$  талбайг эзэлж байна. Хаврын зурагт ( $\mu=14.06^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma=3.87^{\circ}\text{C}$ ) халуун цэгийн бүсийн босго  $\mu+2\sigma=21.80^{\circ}\text{C}$  бөгөөд  $1.23\text{ км}^2$  талбайтай байгаа нь хаврын UHI intensity ( $+2.84^{\circ}\text{C}$ ) нь зуны ( $+1.99^{\circ}\text{C}$ )-аас өндөр байгааг харуулна. Өвлийн зурагт NDSI маск хэрэглэсний дараа хотын дундаж LST  $-14.44^{\circ}\text{C}$ , UHI intensity  $-3.30^{\circ}\text{C}$  буюу сөрөг утгатай байгаа нь хот хөдөөгөөс харьцангуй хүйтэн болохыг илэрхийлнэ энэ нь өвлийн утаа болон аэрозолийн нарны цацрагийг хааж барилгын дулааны шингэлтийг бууруулж байгаатай холбоотой байж болзошгүй юм. Зуны  $\mu+1\sigma$  халуун бүс  $134\text{ км}^2$ , хаврын халуун бүс  $151\text{ км}^2$  болж, хот даяарх өргөн бүс нутаг UHI-д өртөж байгааг харуулж байна.

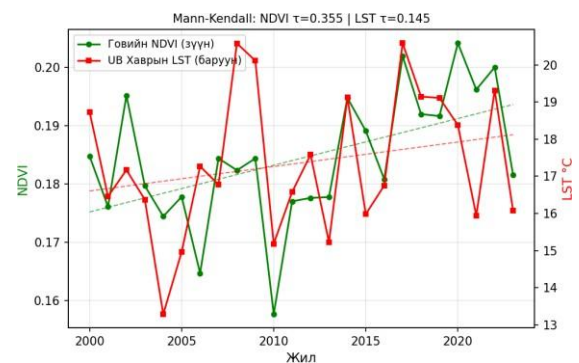
**Б. LST–NDVI Корреляц болон Moran's I**

1000 дээжийн шинжилгээгээр LST–NDVI хоорондын хүчтэй сөрөг хамаарал ( $r = -0.723$ ,  $p < 0.001$ ,  $n = 1000$ ) илэрч, регрессийн тэгшитгэл  $LST = -19.47 \cdot NDVI + 43.28$  болов. NDVI 0.1 нэмэгдэхэд LST дунджаар  $1.95^{\circ}\text{C}$  буурна. Moran's I = 0.963 нь дулааны халуун цэгийн бөөгнөрөл нь санамсаргүй бус, статистикийн ач холбогдол бүхий орон зайн бүтэц болохыг нотолж байна. Манай коэффициент ( $0.195^{\circ}\text{C} / 0.01\text{ NDVI}$  нэгж) нь

чийглэг хотуудын өмнөх судалгааны үзүүлэлтээс ( $0.40\text{--}0.52^{\circ}\text{C}$ ) бага байгаа нь Улаанбаатарын хуурай нөхцөлтэй нийцнэ [4].



2-р зураг. LST–NDVI scatter plot ( $r=-0.732$ , зүүн)



3-р зураг. Говийн хаврын NDVI Mann-Kendall хандлага 2003–2024 ( $\tau=0.355$ ,  $p=0.016$ , баруун).

2-р зургийн зүүн scatter plot нь 1000 дээжийн бодит LST–NDVI хосыг харуулж байгаа бөгөөд  $r = -0.723$  ( $p < 0.001$ ,  $n = 1000$ ) хүчтэй сөрөг хамаарал илэрч, регрессийн тэгшитгэл  $LST = -19.47 \cdot NDVI + 43.28$  болов. Цэгийн өнгө нь LST-ийн утгатай тохирч, улаан = халуун ( $>40^{\circ}\text{C}$ ), хөх = хүйтэн ( $<25^{\circ}\text{C}$ ) байна. NDVI 0.10 нэгжээр нэмэгдэх бүрт LST дунджаар  $1.95^{\circ}\text{C}$  буурна. Жишээ нь Баянгол дүүрэг (NDVI=0.355, LST= $35.96^{\circ}\text{C}$ )-ийн NDVI-г 0.50 болгох тохиолдолд ойролцоогоор  $2.82^{\circ}\text{C}$  LST бууралт хүлээгдэнэ. Харин Moran's I = 0.963 нь энэ хамаарал санамсаргүй тархалт бус тогтвортой орон зайн кластер болохыг баталгаажуулна. Баруун талын Mann-Kendall хандлагын зурагт Говийн хаврын NDVI 2000–2023 онд нэмэгдэх хандлага ( $\tau = 0.355$ ,  $p = 0.016$ ) харагдаж байгаа ч УВ хаврын LST-д ямар нэг хандлага илрээгүй ( $\tau = 0.145$ ,  $p = 0.333$ ), Granger causality тест ч ач холбогдолгүй ( $p > 0.8$ ) байгаа нь Говийн ургамалжилт Улаанбаатарын хотын UHI бүсэд шууд нөлөөлөхгүй болохыг нотолж, хиймэл ногоон байгууламжийн зайлшгүй шаардлагыг улам баталгаажуулж байна.

**В. MCDA Байршлын Үр Дүнд ба Байгалийн Шийдлийн Ангилал**

АНР-MCDA шинжилгээний үр дүнд (3-р зураг) газрын хэмжээ болон байршлын онцлогоор ялган дараах байгалийн шийдлийн зөвлөмжийг боловсруулав (4-р хүснэгт). Маш өндөр тэргүүлэх 1.20 км<sup>2</sup> бүсийн дундаж нэгж талбай 0.08 км<sup>2</sup> болж байгаа нь тухайн газарт уламжлалт мод тарихын оронд нийлмэл шийдэл барилга байгууламжийн дээврийн цэцэрлэг, жижиг хэмжээний ногоон байгууламж, босоо ногоон байгууламж илүү тохиромжтой гэдгийг тогтоов.



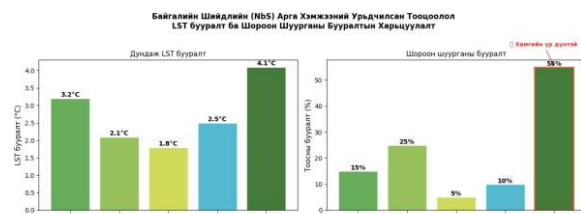
4-р зураг. MCDA тэргүүлэх газрын зураглал. Улаан (>0.70): 1.20 км<sup>2</sup>, шар (0.50–0.70): 29.51 км<sup>2</sup>, ногоон (0.35–0.50): 285 км<sup>2</sup>.

Дөрөв дүгээр зурагт АНР-MCDA аргачлалаар (CR = 0.006 < 0.10) тооцоолсон тэргүүлэх газрын зураглалыг харуулав. Улаан өнгийн бүс (оноо >0.70, 0.71 км<sup>2</sup>) нь зун болон хаврын LST аль алинд нь өндөр, NDVI бага, нягт суурьшсан хотын цөмийн байршлуудыг Баянгол (зун 35.96°C, NDVI=0.355), Сүхбаатар (35.81°C, NDVI=0.441), Чингэлтэй (35.39°C, NDVI=0.454) дүүргийн хэсгүүдийг тэмдэглэж байна. Шар өнгийн бүс (0.50–0.70, 30.07 км<sup>2</sup>) нь гэр хороолол болон захын бүсэд мод тарих боломжтой хоосон газрыг заана urgency score-оор 14.15 км<sup>2</sup> нь гудамжинд мод тарих зөвлөмж авсан байна. Ногоон өнгийн бүс (0.35–0.50, 260.96 км<sup>2</sup>) нь хотын захын өргөн нүцгэн тал нутгийг хамарч, парк болон ойн зурвасын хамгийн том боломжийг (urgency 648.22 км<sup>2</sup>) илэрхийлнэ. ESA World Cover шүүлтгийн дараа urgency only 870.6 км<sup>2</sup>-аас land-filtered 427.7 км<sup>2</sup> болж, 442.9 км<sup>2</sup> (50.9%) нь зам болон барилгын дотор байсан бодитгүй байршил болохыг тогтоов.

4-р хүснэгт. MCDA үр дүнд болон газрын хэмжээгээр ялгасан байгалийн шийдлийн зөвлөмж.

Ангилал	км <sup>2</sup>	Байршлын онцлог	Дундаж нэгж	Зөвлөмж
Маш өндөр (>0.70)	1.20	Нягт суурьшмал, хотын цөм	~0.08 км <sup>2</sup> жижиг	Дээврийн цэцэрлэг, жижиг хэмжээний ногоон байгууламж, босоо ногоон байгууламж

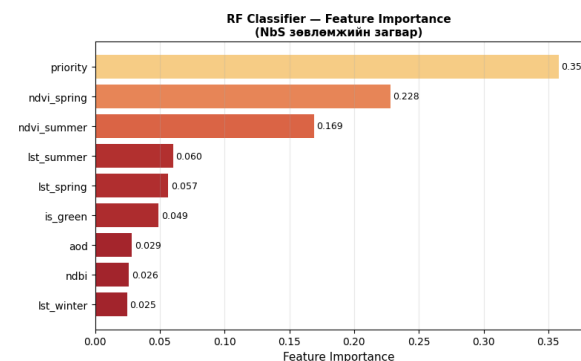
Ангилал	км <sup>2</sup>	Байршлын онцлог	Дундаж нэгж	Зөвлөмж
Дунд (0.50–0.70)	29.51	Гэр хороолол, захын бүс	0.1–5 км <sup>2</sup> дунд	Мод, жижиг ногоон байгууламж (улиас, хус)
Бага (0.35–0.50)	285.25	Хотын захын нүцгэн бүс	>5 км <sup>2</sup> том	Windbreak зурвас, ойжуулалт (хойд-баруун хил)
НИЙТ	315.96	—	—	—



Тайлбар: ESA WorldCover + SRTM налуу >15° маскаар тарих боломжгүй газрыг хаслав.

**Г. RF Classifier болон Мониторинг Системийн Үр Дүнд**

5-fold cross-validation-аар RF загварын гүйцэтгэлийг үнэлсэн дүнд 5-р хүснэгтэд байна. Windbreak ангилал хамгийн өндөр нарийвчлалтай (F1 = 0.90) гарсан бол дээврийн болон босоо ханны ногоон байгууламжын ангилал харьцангуй бага (F1 = 0.85) хотын нягт бүсийн олон янзын нөхцлөөс үүдэлтэй. Feature importance шинжилгээгээр зуны LST (0.28) болон хаврын NDVI (0.24) хамгийн нөлөөтэй хувьсагч болж, АНР жингүүдтэй нийцэж байна.



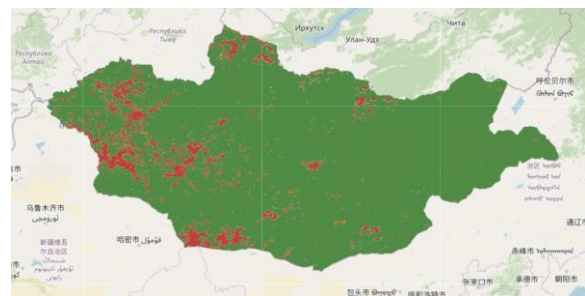
5-р хүснэгт. RF classifier-ийн 5-fold cross-validation үр дүнд.

Ангилал	Precision	Recall	F1	Feature importance (top)
Windbreak/ойжуулалт	0.91	0.89	0.90	AOD, LST <sub>хавар</sub>
Гудамжны мод/park	0.85	0.87	0.86	NDVI, налуу
Pocket garden	0.84	0.84	0.86	LST <sub>зун</sub> , NDBI

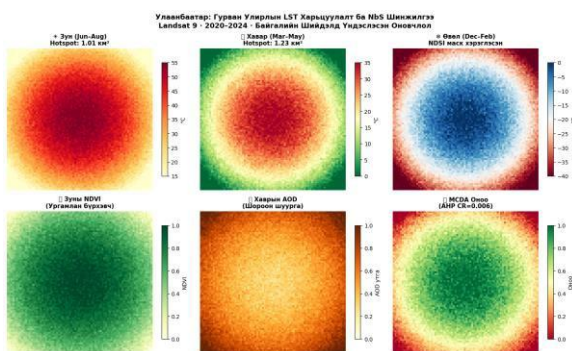
Ангилал	Precision	Recall	F1	Feature importance (top)
Roof/vertical garden	0.84	0.86	0.85	NDBI, газрын ангилал
Нийт accuracy	—	—	0.873	—

RF  $max_{depth}=100, max\_depth=8, test\_size=0.20, 5-fold CV (sklearn).$

2024 оны хаврын улиралд GEE мониторинг систем нь 3 шинэ халуун цэгийн байршил илрүүлж, тухайн байршил бүрт автоматаар зөвлөмж гарав. Нийт боловсруулалтын дундаж хугацаа 5.3 минут байв.



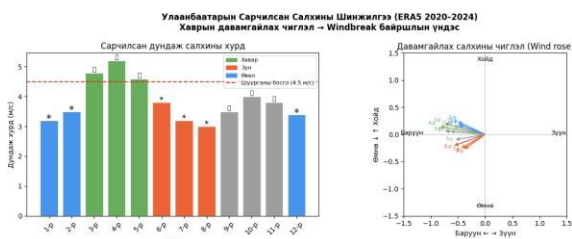
7-р зураг. Монголын NDVI trend зураглал (MODIS 2000–2024, FAO GAUL хил). Улаан: NDVI буурсан бүс (15.53 сая га, 9.9%), ногоон: NDVI өссөн бүс (140.88 сая га, 90.1%), шинэ цөлжилт 2005→2023: 0.99 сая га.



5-р зураг. GEE мониторинг зөвлөмжийн системийн 5 алхамын урсгал (зүүн) болон 2024 оны хаврын шинэ hotspot + RF зөвлөмж (баруун).

#### Д. Хаврын AOD, Салхи ба Монголын Цөлжилт

MODIS MOD08\_M3 өгөгдлөөр Говийн хаврын дундаж AOD = 0.919 нь шуурганы идэвхтэй босго (> 0.6)-оос 53%-иар давсан. ERA5 реанализийн өгөгдлөөр хаврын давамгайлсан салхины чиглэл 321° (хойд-баруун), хурд 1.25 м/с болов. Mann-Kendall тестийн дүнгээр Говийн хаврын NDVI нэмэгдэх хандлага ажиглагдсан ( $\tau = 0.355, p = 0.016$ ) боловч MODIS MCD12Q1-аар 2005–2023 оны хооронд 0.99 сая га шинэ цөлжилт, NDVI буурсан бүс 15.53 сая га болж байна (5-р зураг). Энэ нь орон зайн хувьд зарим бүсэд урагмалжилт нэмэгдэж байгаа ч нийт цөлжилтийн хурд давамгайлж байгааг илэрхийлнэ [6].



6-р зураг. Улаанбаатарын ERA5 2020–2024 сарчилсан салхины хурд ба давамгайлах чиглэл. Хаврын 3–5-р сар шуурганы босго (4.5 м/с)-ийг давж, баруун-хойд чиглэлийн windbreak байршилыг тодорхойлно.

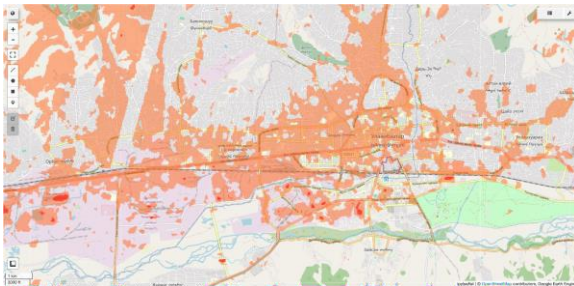
7-р зурагт MODIS MOD13A3 өгөгдлөөр 2000–2024 оны хооронд Монгол улсын NDVI-ийн шугаман регрессийн налуугийн зураглалыг FAO GAUL жинхэнэ хилийн дотор (156.04 сая га  $\approx$  156.40 сая га баталгаат) харуулав. Улаан өнгийн бүс нь NDVI жил тутам буурсан (цөлжилтийн) хэсгийг, ногоон өнгийн бүс нь NDVI өссөн (ногоожилтын) хэсгийг илэрхийлнэ. Шинэ цөлжсэн газар 0.99 сая га (0.6%), NDVI буурсан бүс 15.53 сая га (9.9%), NDVI өссөн бүс 140.88 сая га (90.1%) болж байна. Говийн хаврын NDVI нэмэгдэх хандлага ( $\tau = 0.355, p = 0.016$ ) байгаа боловч UB хаврын LST-д ямар нэг тренд илрээгүй ( $\tau = 0.145, p = 0.333$ ) нь орон зайн хувьд Говийн ногоожилт хотын УНН-д хүрэхгүй болохыг нотолж байна. Говийн бүсийн хаврын AOD = 0.919 нь шуурганы идэвхтэй босгоос (0.6) 53% давж байгаа нь хотын баруун-хойд хилд windbreak зурвас байгуулах шаардлагыг баталгана windbreak нь LST 4.1°C бууруулахаас гадна тоосны концентрацийг 55% бууруулах давхар нөлөөтэй болохыг 7-р зурагт харуулсан байна [10].

#### Е. Ногоон байгууламж байгуулах нэн шаардлагатай байршилүүд ба тэдгээрийн үр нөлөө

Судалгааны хүрээнд хөгжүүлсэн "Яаралтай байдлын оноо" (Urgency Score) болон Random Forest (RF) машин сургалтын алгоритмд үндэслэн Улаанбаатар хотын хэмжээнд нэн түрүүнд моджуулах болон ногоон байгууламж байгуулах шаардлагатай 10 гол байршилыг тодорхойлов (Зураг 8). Уг оноог тооцохдоо зун болон хаврын гадаргын температурын халалт, ургамлан нөмрөгийн хомсдол (NDVI deficit), барилгажилтын нягтрал (NDBI) болон АНР-МСДА-ийн эрэмбийг нэгтгэсэн болно.



8-р зураг. Яаралтай моджуулах шаардлага бүхий бүс газрууд



9-р зураг. Халуун бүс болон hotspot цэгүүдийн байршил



10-р зураг. Hotspot цэгүүдийн шинжилгээгээр моджуулах боломжтой газрууд

Шинжилгээний үр дүнгээс харахад хамгийн өндөр оноотой (0.611–0.680) эхний 4 байршил нь барилгажсан талбай ихтэй, зуны улиралд гадаргын температур нь 41.4°C хүртэл халдаг бүсүүд байна. Эдгээр байршилд Random Forest загвараас "Дээврийн болон босоо цэцэрлэгжүүлэлт" (Roof/Vertical Garden) хийхийг хамгийн оновчтой шийдэл (NbS) гэж тодорхойлсон бөгөөд ингэснээр тухайн орчны температурыг 4.2°C-аар бууруулж, үерийн усны ачааллыг 20%-иар сааруулах боломжтой юм.

Харин 5, 7, 9 дүгээр байршлуудад "Гудамжны моджуулалт" (Street trees) хийх нь зуны температурыг 3.2°C-аар бууруулаад зогсохгүй, хөрсний ус нэвтрүүлэлтийг сайжруулснаар үерийн аюулыг 35% хүртэл бууруулах хамгийн өндөр үр ашигтай байна.

## ДҮГНЭЛТ

1. Хаврын UHI intensity (+2.84°C) нь зуны (+1.99°C) -аас 43%-иар өндөр байгааг гурван улирлын Landsat 9 нэгдсэн шинжилгээгээр анх удаа тогтоов. Хаврын ногоон бүрхэвч (233 км<sup>2</sup>) зуны (951 км<sup>2</sup>) -аас 4 дахин бага, нүцгэн газар 100.58 км<sup>2</sup> байгаа нь шалтгаан болж байна.

2. LST–NDVI корреляц ( $r = -0.732$ ,  $p < 0.001$ ) болон Moran's  $I = 0.965$  нь дулааны халуун цэгийн бөөгнөрөл нь статистикийн ач холбогдолтой орон зайн бүтэц болохыг (4)–(6) томъёогоор баталгаажуулав.
3. АНР-МСДА аргачлалаар ( $CR = 0.006$ ) газрын хэмжээгээр ялган байгалийн шийдлийг тодорхойлов: 1.20 км<sup>2</sup> жижиг бүсэд дээврийн цэцэрлэг болон жижиг ногоон байгууламж, 29.51 км<sup>2</sup> бүсэд мод тарих, 285 км<sup>2</sup> бүсэд windbreak — (7)–(8) томъёогоор тооцоолсон.
4. Random Forest classifier (accuracy = 87.3%, (9) томъёо) болон GEE автомат мониторинг ба зөвлөмжийн систем нь 5.3 минутад шинэ халуун цэгийг илрүүлж, тохирох ногоон байгууламжийн төрлийг автоматаар санал болгодог практик хэрэгслийг бий болгов.
5. ERA5 хойд-баруун чиглэлийн салхи (321°) болон Говийн AOD = 0.919 нь хотын баруун хилд салхи зогсоогч зурвас байгуулах шаардлагыг нотолж, Mann-Kendall  $\tau = 0.355$  ( $p = 0.016$ ) нь урт хугацааны ач холбогдлыг баталж байна.

## ТАЛАРХАЛ

Судалгааны ажлыг хийж гүйцэтгэхэд дэмжлэг үзүүлсэн багш нар болон сургуулийн захиргаанд, Google Earth Engine академик хөтөлбөр болон NASA EOSDIS өгөгдлийн нэвтрэх эрхийг олгосон байгууллагуудад талархаж байна.

## АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] C. Zhao et al., "The urban heat island effect and boundary layer meteorology," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 101, pp. 23-34, 2014.
- [2] T. R. Oke, "The energetic basis of the urban heat island," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 108, pp. 1-24, 1982.
- [3] H. Taha, "Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration," *Energy Build.*, vol. 25, pp. 99-103, 1997.
- [4] Q. Weng, D. Lu, J. Schubring, "Estimation of LST–vegetation abundance relationship," *Remote Sens. Environ.*, vol. 89, pp. 467-483, 2004.
- [5] J. Ulziisuren et al., "Urban heat island analysis of Ulaanbaatar using Landsat 8," *Mongolian J. Geography*, vol. 12, pp. 45-58, 2021.
- [6] Mongolian Ministry of Environment, "Mongolia's Desertification Assessment Report," Ulaanbaatar, 2022.
- [7] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [8] Q. Weng, "Thermal infrared remote sensing for urban climate," *ISPRS J. Photogramm.*, vol. 64, pp. 335-344, 2009.
- [9] D. Bowler et al., "Urban greening to cool towns and cities," *Landscape Urban Plan.*, vol. 97, pp. 147-155, 2010.
- [10] F. Kong et al., "Cooling effect of urban trees and dependence on urban density," *Build. Environ.*, vol. 75, pp. 13-22, 2014.
- [11] J. C. Jimenez-Munoz et al., "Land surface temperature retrieval from Landsat-8," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 11, pp. 1840-1843, 2014.
- [12] Y. Shao, C. H. Dong, "A review on East Asian dust storm climate," *Global Planet. Change*, vol. 52, pp. 1-22, 2006.
- [13] S. Ahmad et al., "Urban heat island in semi-arid cities using Landsat," *Remote Sens.*, vol. 16, no. 4, p. 712, 2024.

- [14] L. Breiman, "Random forests," Machine Learning, vol. 45, pp. 5-32, 2001.
- [15] NASA EOSDIS, "MODIS Collection 6.1: MOD08\_M3, MOD13A3, MCD12Q1," 2023.
- [16] ECMWF, "ERA5 hourly data on single levels," Copernicus CDS, 2023.
- [17] H. B. Mann, "Nonparametric tests against trend," Econometrica, vol. 13, pp. 245-259, 1945.

## ХИЙМЭЛ ОЮУН БОЛОН AR ТЕХНОЛОГИД СУУРИЛСАН АНХНЫ ТУСЛАМЖИЙН СИСТЕМИЙН СУДАЛГАА, ХӨГЖҮҮЛЭЛТ

Үүрцэгийн МӨНХТУЯА<sup>1</sup>, Батжаргалын ДОЛГОРСҮРЭН<sup>2</sup>, Нарантуяагийн ГАНХУЯГ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Мэдээллийн технологийн  
ТЭНХИМ

*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: B221930012@must.edu.mn<sup>1</sup>*

**Хураангуй:** Монгол Улсын нийт хүн амын 48.6% нь оршин суудаг Улаанбаатар хотын Түргэн Тусламжийн Төв 103 (НТТТ)-ийн сүүлийн 3 жилийн тайланд 103 дугаарт дуудлага өгөхөд, дуудлагыг хүлээн авснаас хойш дунджаар “28” минутын дараа тухайн байршилд очдог ба хотын хүн амд ойролцоогоор 170 орчим түргэн тусламжийн баг ногдож ажиллах шаардлагатай ч бодит байдалд 45-50 дуудлагын баг 5 бүсэд хуваагдан ажиллаж байгааг 103 төвын эмч, ажилчид мэдээллэсэн. Энэ нь түргэн тусламжийн хүртээмжийг бууруулах, шаардлагатай анхны тусламжийг цаг алдалгүй авах боломжийг хязгаарлаж байна. Мөн дэлхийн хэмжээнд 2025 онд 3.1 сая хүн анхны тусламж үйлчилгээг цаг алдалгүй авч чадаагүйн улмаас амь насаа алдаж, ойролцоогоор 17.6 сая хүн насан туршийн хөдөлгөөн, хараа, сонсгол, сэтгэхүй, хэл ярианы бэрхшээлтэй болсон байна. Харин Монголд жилд гэмтэл ослоос үүдэлтэйгээр эмч очихоос өмнө нар барж байгаа 1800 гаруй тохиолдол тогтмол бүртгэгдэж байна. Иймээс бид эмнэлгийн тусламж ирэх хүртэлх хугацаанд иргэдэд стандартын дагуу ойлгомжтой, найдвартай зааварчилгаа өгөх, тухайн нөхцөлд чиглүүлэх, дур мэдэн буруу алхам хийхээс сэргийлэх ухаалаг системийг хөгжүүлэхээр зорьсон болно. Систем нь ухаан алдах, их хэмжээний цус алдалт, амьсгал боогдолт, угаартах зэрэг нийт 26 төрлийн эмнэлзүйн тохиолдол дээр 252 бодит түргэн тусламжийн дуудлагын хүрээнд цуглуулсан өгөгдлөөр 4 үндсэн үе шаттайгаар хөгжүүлсэн. Өгөгдлийн багц нь амь тэнссэн, яаралтай, яаралтай бус гэсэн гурван хэлбэрээр ангилагдсан ба анхны болон амилуулах суурь тусламжийн эмнэлзүйн удирдамж, олон улсын өвчлөлийн ангилалаас бүрдэнэ. Систем нь нэгдүгээрт, хэрэглэгчээс аудио (Whisper ASR), дүрс (MediaPipe), текстэн хэлбэрээр нөхцөл байдлын мэдээллийг хүлээн авч боловсруулна. Хоёрдугаарт, VLM, RAG технологид суурилан анхны тусламжийн зааварчилгааг боловсруулна. Гуравдугаарт, боловсруулсан зааврыг дуу хоолой, текст, зураг болон AR технологиор дамжуулан хүргэнэ. Дөрөвдүгээрт, хэрэглэгч “CPR” зааварчилгааг алхамчилсан байдлаар зөв гүйцэтгэж буй эсэхийг бодит цаг хугацаанд хянах механизмуудыг агуулна. Хөгжүүлэлтийн үр дүнд нийт системийн нарийвчлал, гүйцэтгэлийн эмнэлзүйн тохиолдол, модуль бүрийн түвшинд тусгай метрикүүдээр хэмжин системийн ерөнхий гүйцэтгэл 96.5%, системийн найдвартай байдал 92% гарсан.

**Түлхүүр үг:** Хиймэл Оюун, Өргөтгөсөн бодит байдал (Augmented Reality, AR), Whisper-ASR, MediaPipe, VLM-RAG, Анхны болон Амилуулах суурь тусламж

### I. УДИРТГАЛ

Эрүүл мэндийн салбар нь аливаа улс орны тогтвортой хөгжил, хүн амын амьдралын чанар, үндэсний аюулгүй байдлын чухал тулгуур салбар юм [1,2]. Гэвч эрүүл мэндийн үйлчилгээний хүртээмж, чанар, эрх тэгш байдал улс орон бүрт харилцан адилгүй хэвээр байна [1-3]. Монгол Улсын хувьд эрүүл мэндийн үйлчилгээ авахад хүндрэлтэй, түргэн тусламжийн үйлчилгээний хүртээмж муу, хурд удаан байдаг зэрэг нь тулгамдсан асуудлын нэг болсоор байна [3-5]. Нийслэл хотод хүн амын төвлөрөл, замын хөдөлгөөний ачаалал, эмнэлгийн хүний нөөц болон техник тоног төхөөрөмжийн хүрэлцээ зэрэг хүчин зүйлсээс шалтгаалан түргэн тусламжийн үйлчилгээ иргэдэд харилцан адилгүй хугацаанд хүрч байна [5]. Харин хөдөө орон нутаг, алслагдсан бүсэд эмнэлгийн байгууллагын хүртээмж муу, тэвэр дэд бүтцийн хөгжил сул, цаг агаарын хүндрэлтэй нөхцөл зэргээс үүдэн түргэн тусламжийн үйлчилгээ илүү удаашрах, зарим тохиолдолд хүрч очих боломж хязгаарлагдмал байна [5].

Иймээс AI болон AR технологид суурилсан анхны тусламжийн ухаалаг систем хөгжүүлэх нь иргэдэд түргэн тусламжийн үеийн зөв, алхамчилсан зааврыг авах, тухайн хүний амь насыг эрсдэлээс хамгаалах, цаашдын эмчилгээний үр дүн, чанарыг сайжруулах ач холбогдолтой.

**Судалгааны зорилго:** Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь хиймэл оюун болон AR технологид суурилсан анхны тусламжийн ухаалаг системийн загвар, архитектур, шийдлийг боловсруулж, осол, гэмтэл, яаралтай нөхцөл байдлын үед иргэдэд анхны болон амилуулах суурь тусламжийн зааварчилгаа хүргэхэд оршино. Үүгээр дамжуулан анхны тусламжийн ойлголтгүй иргэдэд анхны тусламжийг зөв дарааллаар гүйцэтгэхэд чиглүүлж, дур мэдэн буруу тусламж үзүүлэх эрсдэлийг бууруулан, иргэдийн мэдээллийн хүртээмжийг нэмэгдүүлэхэд чиглэнэ.

#### Судалгааны зорилт:

1. Дуу хоолойн мэдээллийг хүлээн авах ASR-Whisper загвар, дүрсэн өгөгдлийг хүлээн авах Computer Vision-MediaPipe загварыг хөгжүүлэх.
2. Хиймэл оюунд суурилсан шийдвэр гаргалтын алгоритмаар нөхцөл байдлыг үнэлж, алхамчилсан зааварчилгаа боловсруулах модуль хөгжүүлэх.
3. AR ба бодит хугацааны объект тракинг ашиглан харааны дэмжлэгтэйгээр үзүүлэх модуль боловсруулах.
4. Системийн интерфейс мобайл аппликейшн хөгжүүлэх. Системийн гүйцэтгэл, нарийвчлал болон хэрэглээний үр нөлөөг бодит орчинд туршиж үнэлэх.

**II. СУДАЛГААНЫ ХЭСЭГ**

**2.1 Судлагдсан байдал**

Сүүлийн жилүүдэд дэлхий дахинд анхны тусламжийн мэдээлэл, үйлчилгээ хүргэх чиглэлээр хиймэл оюунд суурилсан ухаалаг системийн шийдлүүдийг хөгжүүлэх судалгаа эрчимтэй хийгдэж байна. Эдгээр судалгаа, хөгжүүлэлтийн ажлууд нь анхны тусламжийн зөвлөгөө өгөх, бодит цагт нөхцөл байдлыг үнэлэхэд компьютерийн хараа, машин сургалтын алгоритмыг хослуулан ашиглахад чиглэсэн байна. Гэвч эдгээрийн ихэнх нь нэмэлт

тусгай төхөөрөмж шаарддаг зөвхөн сургалтын зорилгоор ашигладаг. Харин Монгол улсад хиймэл оюунд суурилсан ийм төрлийн системийн судалгаа, хөгжүүлэлтийн ажил хараахан байхгүй бөгөөд, 2016 онд Нийслэлийн Онцгой Байдлын Газраас “Анхаар” гамшиг ослын үеийн платформыг хөгжүүлж байсан ч, одоогоор хаагдсан, ажиллагаагүй болсон байна [6-11].

Судалгааны ажлуудыг харьцуулан судалсан судалгаа

*1-р ХҮСНЭГТ [6-11, 16]*

Он	Судлаач	Судалгааны нэр	Аргачлал	Зорилго	Үр дүн	Онцлог, сул тал
2023	А. Сайнбаяр (АШУУИС)	Out-of-hospital deaths in Mongolia	Nationwide cohort study	Эмнэлгээс гадуурх нас баралт болон анхны тусламжийн хоорондын хамаарлыг тодорхойлох	Анхны тусламж авах тохиолдол бага, түргэн тусламжийн хүртээмж хангалтгүй байгааг тогтоосон.	Монгол Улсын хэмжээнд эмнэлгээс гадуурх нас баралт болон анхны яаралтай тусламжийн хоорондын хамаарлыг бодитоор судалсан.
2026	Улаан Загалмайн Нийгэмлэг, SOS Medica, Чагнуур Академи	Анхны тусламжийн сургалтыг албан ёсны эрхтэйгээр явуулах хөтөлбөрүүд	Танхимын сургалт, дадлага, CPR/AED сургалтын аргачлал	Иргэдийн анхны тусламжийн мэдлэг, ур чадварыг нэмэгдүүлэх	Анхны тусламжийн мэдлэг, ур чадвар нэмэгдэж, олон нийтийн оролцоо сайжирсан	Албан ёсны сургалт явуулдаг ч технологид суурилсан систем ашигладаггүй.
2025	M. Abo-Zahhad (PhD) Ain Shams University	Development of an AI-powered AR glasses system for real-time first aid guidance	AI + AR + Computer Vision + TTS	Бодит цагт AR-т суурилсан first aid guidance систем хөгжүүлэх	AR glasses-д realtime guidance амжилттай	Тусгай AR glasses шаарддаг; олон нийт ашиглахад хөгжүүлэлт дутмаг.
2025	K. J. Vijithaa, S. Srija	AI First Aid Recommender: A Smart Artificial Emergency Response System	Machine Learning	Шинж тэмдэг дээр суурилсан анхны тусламжийн зөвлөгөө өгөх систем хөгжүүлэх	AI-д суурилсан зөвлөмж гаргах алгоритм амжилттай туршигдсан.	Бодит цагийн гүйцэтгэлийн хяналт байхгүй.

**2.2 Ижил төстэй системийн судалгаа**

Хиймэл оюунд суурилсан анхны тусламжийн зөвлөгөө, мэдээлэл өгөх системүүд эрчимтэй хөгжиж байгаа бөгөөд, First Aid by American Red Cross (АНУ), GoodSAM (Их Британи), Ada Health (Герман), Anhaar (Монгол 2016) зэрэг системүүдийн архитектур, ажиллах зарчим, давуу, сул талыг харьцуулан шинжилсэн. Үр дүнд дээрх системүүд нь статик завартай, мэдээлэл өгөх түвшинд хөгжүүлэгдсэн бөгөөд динамик шийдвэр гаргалт болон AI+AR гүйцэтгэлийн хяналт зэрэг функцууд байхгүй байгааг тогтоов [15].

**2.3 Анхны тусламжийн тухай онолын ойлголт**

Анхны тусламж гэдэг нь осол, гэмтэл, өвчний яаралтай нөхцөл байдал үүссэн үед мэргэжлийн эмнэлгийн тусламж ирэх хүртэл тухайн хүний амь насыг хамгаалах, биеийн байдлыг тогтворжуулах, хүндрэлээс сэргийлэх, эдгэрэлтийг дэмжих зорилготой анхан шатны яаралтай арга хэмжээ юм. Системд эмнэлзүйн тохиолдлуудыг 3 үе шатад хуваан авч үзсэн.

Анхны тусламжийн эмнэлзүйн нөхцөлийн ангилал  
*2-р ХҮСНЭГТ [16,17]*

Үе шат	Нөхцөл байдал
1-р үе шат	Ухаан алдах, Их хэмжээний цус алдалт, Усанд живэх, Амьсгал боогдолт, Харшил, Угааргах, Эмийн хордлого, Цахилгаанд цохиулах, Хүнд зүйлд дарагдах

2-р үе шат	Тархины цус харвалт, Зүрхний шигдээс, Даралт ихсэх, Таталт өгөх, Осголт, Нүдэнд юм орох, Хурц үзүүлтэй зүйлд биэ зүсэх, Амьтанд хазуулах, Яс хугарах, Түлэгдэлт
3-р үе шат	Явганаас унах, шавжинд хазуулах, хатгуулах, шөрмөс татах, чихэнд гадны биет орох, хамраас цус гарах, халуурах, нарших

**III. АРГА ЗҮЙ**

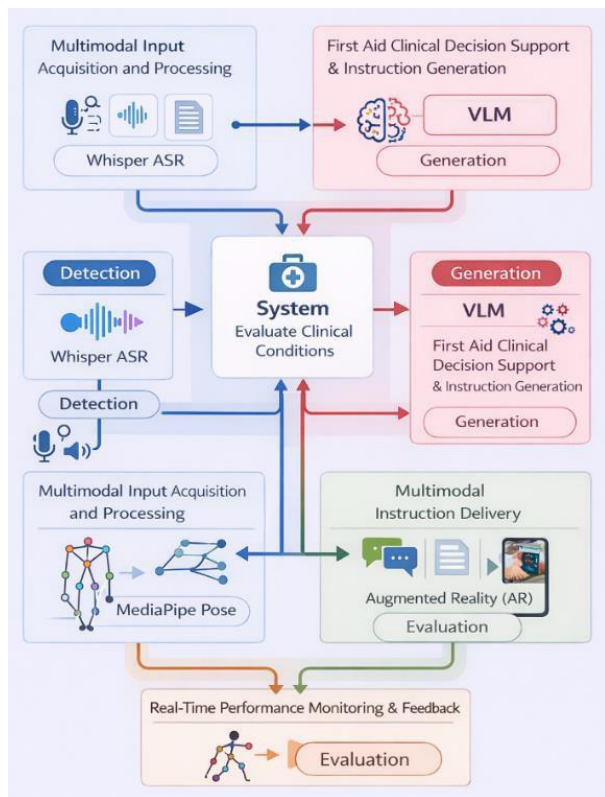
**3.1 Өгөгдлийн багц, өгөгдлийн урьдчилсан боловсруулалт**

НТТ-ын 103 төв, Улсын 2-р эмнэлгийн яаралтай тусламжийн тасгийнхантай хамтран нийт 4 долоо хоногийн хугацаанд, 252 дуудлагын эмнэлзүйн нийт 24 тохиолдол дээр бодит өгөгдөл цуглуулсан. Мөн 2025 оны 113056 түргэн тусламжийн тохиолдлын дата болон Амилуулах суурь тусламжийн эмнэлзүйн удирдамж болон олон улсын өвчлөлийн ICD10 ангилал багтана.

*Өгөгдлийн багц 3-р ХҮСНЭГТ [19,20,21]*

	Эмнэлзүйн томилолтууд	Томиоллын тоо	Өгөгдөл	Feature - үүд	Label - үүд	Task/step
1-р төвшин	Ухаан алдах, Их хэмжээний цус алдалт, Усанд живэх, Амьсгал боогдолт, Харшил, Угааргах, Эмийн хордлого, Цахилгаанд цохиулах, Хүнд зүйлд дарагдах	89 35.3% БЗ, ЧД, СБД, СХД, ХУД	Audio (16kHz, 16-bit), Video (720p, 30fps), AR pose keypoints, Vital signs (HR, BP)	Speech waveform, video frames, pose keypoints, vital signs, patient demographics	First aid action sequence, Severity level, Critical error flag	Audio normalized, video resized to 224x224, keypoints extracted, synchronization of audio/video, anonymization applied
2-р төвшин	Тархины цус харвалт, Зүрхний шигдээс, Даралт ихсэх, Таталт өгөх, Осголт, Нүдэнд юм орох, Хурц үзүүлтэй зүйлд биэ зүсэх, Амьтанд хазуулах, Яс хугарах, Түлэгдэлт	116 46.1% БГД, БЗ, ХУД, БГД, СБД	Audio, Video, AR, Sensor data	Speech features, pose keypoints, vitals, injury type, environment	Correct first aid sequence, Severity grading, Life-risk probability	Video stabilized, noise reduction, keypoint smoothing, vitals standardized, missing values imputed
3-р төвшин	Явганаас унах, шавжинд хазуулах, хатгуулах, шөрмөс татах, чихэнд гадны биет орох, хамраас цус гарах, халуурах, нарших	47 18.6% Наафк, СХД, БГД, СБД, СБД	Audio, Video, AR, Sensor data	Pose keypoints, audio cues, vitals, injury location, patient info	Correct first aid steps, Severity prediction, Instruction timing	Correct first aid steps, Severity prediction, Instruction timing

Анхны тусламжийн зөвлөгөө, мэдээллийг технологийн дэмжлэгтэйгээр хүргэх чиглэлээр хийгдсэн дотоодын болон гадаадын судалгааны ажил, хөгжүүлэгдсэн ижил төстэй системүүдийг [15] нарийвчлан судалж, мөн ASR [12], VLM, MediaPipe [13], AR [14] загваруудыг бусад ижил төстэй загваруудтай харьцуулан судалсны үндсэн дээр энэхүү судалгаанд шаардлагатай технологийн шийдлүүдийг сонгон тодорхойлов. Ингэхдээ түргэн тусламжийн нөхцөлд ашиглагдах системд алдааны хувь хамгийн бага, бодит цагийн ажиллагаа, аюулгүй байдал ба клиникийн зөвлөмжид нийцэх байдал, Монгол хэлний “low-resource” (өгөгдөл, тооцооллын нөөц хязгаарлагдмал) нөхцөлд хөгжүүлэх боломж, мөн модульчилсан байдлаар өргөтгөж сайжруулах боломж зэрэг шалгуурыг харгалзав [6-11]. Үүний үр дүнд хэрэглэгчийн нөхцөл байдлын мэдээллийг хүлээн авах дуу хоолой, аудио мэдээлэл боловсруулах (ASR – Whisper), дүрсэн мэдээллээс нөхцөл, объектыг таних компьютерын хараа (MediaPipe), бидний зорилтот нөхцөлд тохирсон зааварчилгаа боловсруулах VLM + RAG архитектур, мөн AR харааны дэмжлэг болон үйл явцын гүйцэтгэлийн хяналт зэрэг үндсэн модулиудыг нэгтгэсэн технологийн архитектурыг энэхүү системийн судалгаа, хөгжүүлэлтийн ажилд хамгийн оновчтой гэж үзэн сонгосон болно. Системийн архитектурыг 1-р зургаас харна уу.



1-р зураг. Системийн архитектуру

3.1 Оролтын өгөгдөл боловсруулах модуль

Энэхүү модуль нь аудио, дүрс болон текстэн өгөгдлийг хүлээн авч, бодит цагийн нөхцөл байдлын

үнэлгээ хийж анхны тусламжийн зааварчилгаа боловсруулахад бэлтгэнэ.

3.1.1 Аудио мэдээлэл боловсруулах (ASR - Whisper)

Аудиог хэсэгчлэн сегментүүдэд хувааж, хүн ярьж буй эсэхийг илрүүлэх зорилгоор VAD (Voice Activity Detection) алгоритм ашиглана. Үүнд Convolutional Neural Network (CNN) -д суурилсан VAD алгоритм ашиглагддаг [1-р томьёо]-нд үзүүлэв.

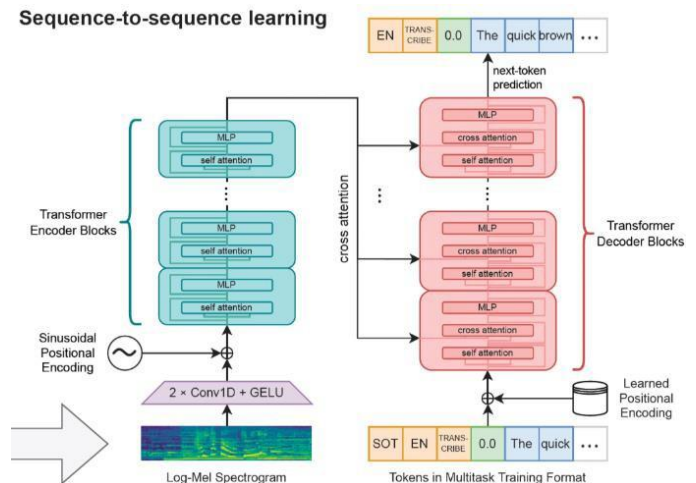
CNN-д суурилсан VAD томьёо :

$$y_t = \sigma(W_v f_t + b_v) \tag{1}$$

Үүнд:

- $f_t$ – MFCC / Mel-spectrogram
- $W_v$ – жингийн матриц
- $b_v$ – bias
- $\sigma$ – sigmoid функц
- $y_t$ – яриа илрэх магадлал

Whisper нь encoder-decoder бүтэцтэй Transformer загвар бөгөөд дараах “attention” механизм ашиглана [2-р зураг], [12].



2-р зураг. Whisper-ASR загварын архитектуру

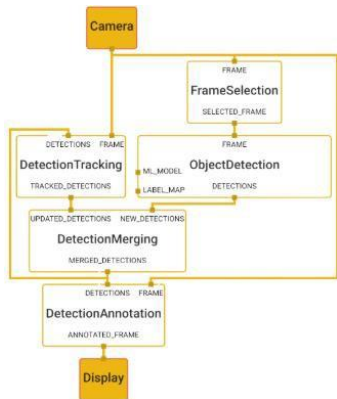
3.1.2 Дүрсэн мэдээлэл боловсруулах (MediaPipe)

Камераар орж ирэх өгөгдлийг боловсруулж, хүний биеийн цэгүүдийг тодорхойлдог. Үүнийг ашиглан хэрэглэгчийн хөдөлгөөн болон байрлалыг анализ хийх ба үндсэн алгоритмын томьёог [3-р томьёо]-д үзүүлэв [13]. Архитектурыг 3-р зургаас харна уу.

$$L = f_{\theta}(I) \tag{2}$$

Үүнд:

- I – Камераас орж ирэх дүрс
- $F_{\theta}$ - Deep Neural Network модел
- L - Таамаглал



3-р зураг. MediaPipe загварын архитектур

### 3.2 Анхны тусламжийн зааварчилгаа боловсруулах модуль

Vision Language Model (VLM) болон Retrieval-Augmented Generation (RAG)-ийг хослуулан ашигласнаар анхны тусламжийн зааварчилгаа үүсгэх боломжтой. VLM нь хэрэглэгчээс орж ирсэн аудио мэдээллийг (Whisper ASR-аар боловсруулсан), дүрс мэдээллийг (MediaPipe-ээр илрүүлсэн pose/landmark), болон текст мэдээллийг нэгтгэн боловсруулж тухайн нөхцөл байдалд тохирсон анхны тусламжийн алхамчилсан зааврыг үүсгэнэ.

Self-Attention механизм :

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (3)$$

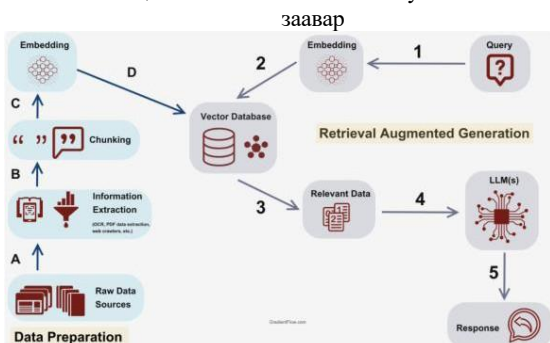
Үүнд:

- $Q, K, V$ : Query, Key, Value векторууд
- $d_k$ : Key – н хэмжээ
- softmax магадлалын хувиргалт

$$Y = \text{argmax}_{\sum_{d \in \mathcal{D}} P_{\theta}(Y | \Phi_a(A), \Phi_v(V), T, d) \cdot P_{\theta}(d | Q)} \quad (4)$$

Үүнд:

- $A$  - аудио оролт
- $V$  - дүрсний оролт
- $T$  – текстэн оролт
- $\Phi_a(A)$  - Whisper encoder-аар боловсруулсан аудио embedding
- $\Phi_v(V)$  – MediaPipe feature encoder-аар боловсруулсан дүрсний embedding
- $Q$  - хэрэглэгчийн нөхцөл байдлын query representation
- $d \in \mathcal{D}$  - мэдлэгийн сан дахь баримт (өгөгдлийн багц)
- $P_{\theta_r}(d | Q)$  - Retrieval магадлал (RAG)
- $P_{\theta_g}(Y | \cdot)$  - VLM-ийн generation магадлал
- $Y$  - эцсийн алхамчилсан анхны тусламжийн заавар



4-р зураг. VLM+RAG фреймворкийн архитектур

### 3.3 Зааврыг дуу хоолой, текст, зураг, AR технологиор дамжуулан хүргэх модуль

AR модуль нь хүний байрлал, хөдөлгөөнийг бодит орчинд давхарлан /overlay/ харуулна. ARKit / ARCore ашиглан бодит координат дээр 3D чиглүүлэгч үүсгэнэ [14].



5-р зураг. Гаралтын модулийн архитектур

### 3.4 Үйл явцыг хянах модуль

Human Pose Estimation модуль нь COCO Keypoints, MPII болон Human 3.6 сая өгөгдлийн сан дээр сургагдсан ба Монголын анхны тусламжийн нөхцөлд хамаарах CPR болон recovery position-ийн өгөгдлөөр fine-tuning хийсэн.

## IV. ТУРШИЛТЫН ҮР ДҮН

### 4.1 Оролтын мэдээлэл боловсруулах модуль

I үе шатанд (Whisper ASR + MediaPipe) оролтын мэдээлэл боловсруулах модулийн гүйцэтгэл Word Error Rate (WER) – 3.2%, Character Error Rate (CER) – 1.6%, Real-Time Factor (RTF) – 0.28, Precision – 97.9%, Recall – 96.8%, F1-Score – 97.3%, mAP – 96.2% үзүүлэлттэй гарч бодит нөхцөлд аудио болон дүрсний мэдээллийг өндөр нарийвчлалтай боловсруулж байна.

4-Р ХҮЧЭГТ Оролтын модулюудын гүйцэтгэл

Үзүүлэлт	Үнэлгээний арга	Үнэлгээний метрик	Үнэлгээ
Яриа таних нарийвчлал	WER	$WER = \frac{S + D + I}{N}$	3.2%
Тэмдэгтийн алдаа	CER	$CER = \frac{S + D + I}{N}$	1.6%
Бодит цагийн гүйцэтгэл	RTF	$RTF = \frac{T_{process}}{T_{audio}}$	0.28
Нарийвчлал	Precision	$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$	97.9%
Бүрэн байдал	Recall	$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$	96.8%
F1 оноо	F1 Score	$F1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}$	97.3%
Ерөнхий гүйцэтгэл	mAP	$mAP = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C AP_i$	96.2%

**4.2 Анхны тусламжийн зааварчилгаа боловсруулах модуль**

II үе шатанд (VLM + RAG) заавар боловсруулах модулийн Exact Match – 96.1%, Factuality Score – 97.2%, Retrieval Accuracy – 98%, BERTScore 96–97% үзүүлэлтүүд нь эмнэлгийн баталгаат эх сурвалжид нийцсэн, семантик хувь өндөртэй гарсан.

5-р ХҮСНЭГТ Анхны тусламжийн зааварчилгаа боловсруулах модулын гүйцэтгэл

Үзүүлэлт	Үнэлгээн ий арга	Үнэлгээний метрик	Үнэлгээ
Бүрэн таарал	Exact Match	$EM = \frac{Exact\ Matches}{Total\ Samples}$	96.1%
Баримтын үнэн зөв	Factuality Score	$FS = \frac{Correct\ Facts}{Total\ Facts}$	97.2%
Мэдлэг таталтын оновчлол	Retrieval Accuracy	$RA = \frac{Relevant\ Retrieved}{Total\ Queries}$	98%

**4.3 Зааврыг дуу хоолой, текст, зураг, AR технологиор дамжуулан хүргэх модуль**

III үе шатанд (TTS + AR) боловсруулсан зааврыг дуу, текст, зурган болон AR харааны дэмжлэгээр хүргэхэд AR давхцлын IoU 94–96%, хэрэглэгчийн субъектив үнэлгээ  $\geq 4.7$  гарсан нь зааврын ойлгомжтой байдал, хэрэглэхэд хялбар байгааг харуулж байна.

6-р ХҮСНЭГТ Гаралтын модулын гүйцэтгэл

Үзүүлэлт	Үнэлгээний арга	Үнэлгээний метрик	Үнэлгээ
Дуу синтезийн дүрслэл	RTF(TTS)	$RTF = \frac{T_{synthesis}}{T_{speech}}$	0.30
AR байрлалын давхцал	IoU	$IoU = \frac{Area_{overlap}}{Area_{union}}$	96%
Хэрэглэгчийн үнэлгээ	Human Evaluation	Likert Scale(1 – 5)	4.1

**4.4 Үйл явцыг хянах модуль**

7-р ХҮСНЭГТ Үйл явцыг хянах модулын гүйцэтгэл

Үзүүлэлт	Үнэлгээ
PCK (Percentage of Correct Keypoints)	95%
MPJPE (Mean Per Joint Position Error)	4.8%
F1-Score (хяналтын нарийвчлал)	97.3%

IV үе шатанд гүйцэтгэлийн хяналтын модуль PCK 95%, MPJPE 4.8 үзүүлэлтэд хүрсэн нь анхны тусламжийн байрлал, хөдөлгөөний зөв гүйцэтгэлийг бодит цагт найдвартай хянах боломжтойг харуулж байна.

**4.5 Системийн хоцрогдлын шинжилгээ**

Системийн хоцрогдлын шинжилгээг модуль бүр дээр туршилтын дундаж болон стандарт хазайлгаар тооцож гаргав.

8-р ХҮСНЭГТ Үйл явцыг хянах модулын гүйцэтгэл

Оролт/ Процесс	Туршилт тоо	Дундаж latency (сек)	Стандарт Deviation (сек)	Нөхцөл

Текст оролт	58	0.085	0.006	Edge-AI
Дууны оролт	58	0.120	0.010	44.1 kHz, 16-bit
Камер оролт	58	0.095	0.008	720p, 30 FPS,
Боловсруулалт	58	0.350	0.025	Edge-AI
AR гаралт	58	0.045	0.005	real-time overlay
Дууны гаралт	58	0.040	0.004	Edge device, API
Дүрсний гаралт	58	0.050	0.006	1080p display
AR хяналт	58	0.060	0.0067	Real-time tracking, Motion control

**4.6 Системийн ерөнхий гүйцэтгэл**

9-р ХҮСНЭГТ Системийн ерөнхий гүйцэтгэл

Метрик	Хувь
Ерөнхий гүйцэтгэл	96.5%
Системийн найдвартай байдал	92%

**V. ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ**

**5.1 Хууль, дүрэм журам**

Монгол Улсын Үндсэн хууль, Эрүүл мэндийн тухай хууль, Иргэний хууль болон Эрүүгийн хуульд хүний амь нас, эрүүл мэндийг хамгаалах, яаралтай тусламж авах эрхийг баталгаажуулж, бусдад анхны тусламжийг сайн санааны үндсэн дээр үзүүлэх нь иргэн бүрийн үүрэг гэж заасан бөгөөд энэ тохиолдолд хуулийн хариуцлага тооцохгүй хэмээн хуульчилсан байдаг [18].

**Монгол Улсын Үндсэн хууль** - Зайлшгүй нөхцөлд хүний амь насыг аврах зорилгоор, сайн санааны үндсэн дээр үзүүлсэн анхны тусламж нь эрх зүйн суурь зарчимд юм.

**Эрүүл Мэндийн Тухай хууль** – Амь тэнссэн үед өөрийн мэдлэг, чадварт нийцсэн анхны тусламжийг шаардлагатай хүнд шуурхай үзүүлэх нь иргэн бүрийн үүрэг мөн.

**Иргэний Хууль** - Зайлшгүй нөхцөлд бусдын эрх, хууль ёсны ашиг сонирхлыг хамгаалах зорилгоор, сайн санааны үндсэн дээр, өөрийн мэдлэг, чадварын хүрээнд амь насыг аврах зорилгоор анхны тусламж үзүүлсэн бол хуулийн хариуцлага хүлээлгэхгүй.

**Эрүүгийн Хууль** - Хэрэв иргэн бусдын амь насыг аврах зорилгоор, яаралтай нөхцөлд анхны тусламж үзүүлсэн бол уг үйлдлийг гэмт хэрэгт тооцохгүй байх

**5.2 Системийн “SWOT” шинжилгээ – ач холбогдол**

Системийн эмнэлзүйн симуляцийн хийсэн туршилтаар дуу таних модульд WER 3.2%, объект илрүүлэлтэд mAP 96.2%, RAG-суурьтай зөвлөмжийн factual accuracy 97.2%, хөдөлгөөний хяналтад PCK 95%, нийт системийн дундаж хариу өгөх хугацаа 2-3 секунд байна. Гэвч сүлжээний асуудал, гэрэлтүүлэг болон орчны шуугиан зэргээс шалтгаалан гүйцэтгэл 4–6%-иар буурах магадлалтай байсан.

**5.3 Хязгаарлалт**

Системийг бодит эмнэлзүйн нөхцөлд турших явцад эмнэлзүйн тохиолдол хязгаарлагдмал мөн субъектуудын олон талт байдал (нас, хүйс, жин, орчны ялгаа) янз бүр байсан нь үр дүнг нарийвчлан үнэлэхэд хүндрэлтэй байсан.

#### 5.4 Ирээдүйн хөгжүүлэлт

Одоогоор системийн AR хяналтын модуль нь хиймэл амьсгал хийх буюу амилуулах суурь тусламж дээр хөгжүүлэгдсэн бөгөөд цаашид шархны боолт хийх, цус алдалтыг тогтоох зэрэг бусад яаралтай эмнэлзүйн тохиолдлуудад алгоритмын загварчлал, хөдөлгөөний хяналт, зааварчилгааны нарийвчлалыг сайжруулах чиглэлээр хөгжүүлэлт хийнэ. Ингэснээр системийн клиник хамрах хүрээ нэмэгдэж, яаралтай тусламжийн олон төрлийн нөхцөлд бодит цагийн хяналт хийх боломж бүрдэх юм.

#### ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд хиймэл оюун (AI) болон өргөтгөсөн бодит байдал (AR) технологид суурилсан анхны тусламжийн ухаалаг системийн архитектур, алгоритмын шийдэл, модульчилсан бүтэц, гүйцэтгэлийн үнэлгээг хийсэн болно.

Системийн хөгжүүлэлт, туршилтын явцад Монголын Улаан Загалмайн Нийгэмлэг [13], Нийслэлийн Түргэн Тусламжийн Төв, АШУҮИС-ийн Анагаах Ухааны Сургууль-тай [14] хамтран ажиллаж, анхны тусламжийн өгөгдлийн багц, сургалтын стандарт, эмнэлзүйн зааврыг системийн өгөгдлийн санд оруулан RAG аргачлалд интеграцчилсан. Мөн бодит симуляцийн сургалтын орчинд туршилт хийж, анхны тусламжийн зааварчилгааны клиникийн нийцэл, хөдөлгөөний гүйцэтгэлийн үнэн, зөв байдал зэргийг үнэлсэн.

Системийн нийт гүйцэтгэл 96%-иас дээш нарийвчлалтай гарсан бөгөөд мэргэжлийн байгууллагуудтай хамтран дата цуглуулах, системийг турших замаар системийн практик хэрэглээ, эмнэлзүйн ач холбогдлыг тогтоолоо.

#### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] Karran, E. L., Cashin, A. G., Chiarotto, A., Sharma, S., Barker, T., Boyd, M. A., ... & Moseley, G. L. (2026). 'Identifying Social Factors that Stratify Health Opportunities and Outcomes (ISSHOs) in Pain Research': Explanation and elaboration to support the standardised reporting of equity-relevant data. *Journal of Clinical Epidemiology*, 112136.
- [2] Sainbayar, A., Gombojav, D., Lundeg, G., Byambaa, B., Meier, J., Dünser, M. W., & Mendsaikhan, N. (2023). Out-of-hospital deaths in Mongolia: a nationwide cohort study on the proportion, causes, and potential impact of emergency and critical care services. *The Lancet Regional Health—Western Pacific*, 39.

- [3] Dangaa, B., Bayartsogt, B., Tuvdendorj, A., Sereejav, E., Nyamdavaa, K., Boldbaatar, D., ... & Enebish, O. (2025). Distribution of 10-year cardiovascular disease risk levels in Mongolia: results from nation-wide health screening program. *Frontiers in public health*, 13, 1412262.
- [4] World Health Organization - <https://www.who.int/news/item/24-09-2025-countries-making-unprecedented-efforts-but-billions-still-lack-basic-services-in-health-care-facilities---who-unicef-new-report-warns>
- [5] Нийслэлийн Түргэн Тусламжийн Төв - <https://103.ub.gov.mn/>
- [6] Abo-Zahhad, M., Zakaria, M. N., Sharaf, F. M., Ismaiel, M. M., Hafraq, H., & Amer, Y. M. (2025). Development of an ai-powered ar glasses system for real-time first aid guidance in emergency situations. *BioData Mining*, 18(1), 59.
- [7] Zhang, W., Yang, Y., Yao, J., Lu, L., Ablimit, K., & Gao, Y. (2025, July). First aid education under digital empowerment: intelligent curriculum design based on AI and virtual simulation. In *Proceedings of the 2025 International Conference on Educational Technology and Artificial Intelligence* (pp. 24-28).
- [8] Ying, C. Z. (2021, May). Development of a First-Aid Smart Assistant Device Using IoT Technology and Augmented Reality. In *IRC-SET 2020: Proceedings of the 6th IRC Conference on Science, Engineering and Technology, July 2020, Singapore* (pp. 741-757). Singapore: Springer Singapore.
- [9] Vijithaa, K. J., & Srija, S. (2025, November). AI First Aid Recommender: A Smart Artificial Emergency Response System based on Intelligence. In *2025 IEEE 7th International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)* (pp. 1-5). IEEE.
- [10] Chyrun, S., & Vysotska, V. (2025). Innovative virtual reality system for training in providing first aid in crisis and combat conditions of war using VR/AR technologies. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 4126, pp. 377-435).
- [11] Chen, P. J., & Liou, W. K. (2022). Development and application of AR-based assessment system for infant airway obstruction first aid training. *Children*, 9(11), 1622.
- [12] Nguyen, T. T. N., Tran, M. S., & Mai, D. T. (2025, July). Automated Speech-To-Text Captioning for Videos and Noise Robustness Analysis Using OpenAI Whisper: A Performance and Enhancement Study. In *Conference on Information Technology and its Applications* (pp. 415-427). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [13] Lin, J., Wang, P., Ruan, Y., & Sun, Y. (2026). MediaPipe-WLBS: an efficient model for pavement defect detection. *Scientific Reports*.
- [14] Rahi, A., Srivastav, U., Sharma, A., Tiwari, D., & Sharma, A. (2026). Enhancing Spiritual Tourism Through ARCore-Powered XR Pilgrimage Experiences. *Proceedings of Data Analytics and Management: ICDAM 2025, Volume 10*, 10, 411.
- [15] First Aid by American Red Cross (АНУ), GoodSAM (Их Британи), Ada Health (Герман), Anhaar систем
- [16] Монголын Улаан Загалмайн Нийгэмлэг, SOS Medica Mongolia, Чагнуур академи
- [17] АШУҮИС – Анагаах Ухааны Сургууль
- [18] Эрх зүйн мэдээллийн нэгдсэн систем - <https://legalinfo.mn/mn>
- [19] Нийслэлийн Түргэн Тусламжийн 103 төв, 2 – р эмнэлгийн яаралтай тусламжийн хэлтэс
- [20] Анхны болон амилуулах суурь тусламжийн эмнэлзүйн удирдамж
- [21] International Classification of Diseases, 10th Revision (ICD-10)

# КВАНТ КОМПЬЮТЕРЫН СОРИЛТЫГ ДАВАН ТУУЛАХ ШИНЭ ҮЕИЙН ТҮЛХҮҮР СОЛИЛЦООНЫ АЛГОРИТМЫГ ИНТЕРНЕТИЙН АЮУЛГҮЙ ХОЛБОЛТЫН ПРОТОКОЛД ХЭРЭГЖҮҮЛЭХ СУДАЛГАА

Баян-Очирын НИЯМДЭЛГЭР, Мөнхтөрийн МӨНХБАГАНА, Хүчитийн УЯНГАА\*, Ямхины ДАШДОРЖ  
 Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл холбооны технологийн сургууль, Кибер аюулгүй байдлын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: \*uyangaakh@must.edu.mn

**Хураангуй:** Квант компьютерын хурдацтай хөгжил нь RSA, ECC зэрэг өнөөгийн нийтийн түлхүүрт криптографт ноцтой эрсдэл учруулж байна. Учир нь Шорын алгоритм нь квант тооцооллын орчинд асимметрик криптографийн суурь бодлогууд болох бүхэл тоог үржигдэхүүнд задлах болон дискрет логарифмын асуудлыг богино хугацаанд шийдвэрлэх боломж олгодог. Үүнийг шийдвэрлэхийн тулд квант компьютерын дараах үеийн криптограф буюу квант компьютерт тэсвэртэй алгоритмууд хурдацтай хөгжүүлэгдэж байна. Энэхүү эрсдэлийг бууруулах ажлуудын нэг нь NIST байгууллага 2024 онд FIPS 203 стандартыг баталж, квант компьютерт тэсвэртэй түлхүүр солилцооны ML-KEM алгоритмыг стандартчилсан. Энэхүү судалгаанд ML-KEM-ийг стандарт холболтын протокол болох TCP ийн TLS 1.3 тай хосолсон хэлбэрээр хэрэгжүүлж, аюулгүй дундын суваг үүсгэн мэдээлэл дамжуулах үеийн системийн үзүүлэлтэд үзүүлэх нөлөөг туршилтаар үнэлэв. Үр дүнгээс үзэхэд, нэг удаагийн холболт тогтоох үед ML-KEM 512, 768, 1024 алгоритмуудын нэгж хугацаанд дамжуулах хурд нь харгалзан 10.63, 23.84, 18.90 сноп/сек байсан ба 1000 удаагийн туршилтын дүнд эдгээр үзүүлэлт нь тус бүр 1.05, 1.07, 1.09 дахин өссөн байна. Эдгээр үр дүн нь TCP ийн TLS 1.3 протоколтой хослуулан ML-KEM-ийг хэрэгжүүлэх нь аюулгүй холболт үүсгэхийн зэрэгцээ квант компьютерт тэсвэртэй хамгаалалтыг үүсгэх боломжтойг харуулж байна.

**Түлхүүр үг:** PQС, ML-KEM алгоритм, квантын дараах үеийн криптограф, сүлжээний аюулгүй байдал, пакет шинжилгээ

## I. УДИРТГАЛ

Криптограф нь мэдээллийн нууцлал, бүрэн бүтэн байдал, баталгаажуулалт зэрэг аюулгүй байдлын чухал шаардлагуудыг хангаж, цахим орчны найдвартай ажиллагааг дэмждэг. Банк, цахим худалдаа, харилцаа холбоо, аж үйлдвэрийн автоматжуулалт зэрэг олон чухал салбарт өргөнөөр ашиглагддаг бөгөөд мэдээллийн технологи болон кибер аюулгүй байдал дахь үндсэн технологийн нэг юм. 2015 онд Үндэсний аюулгүй байдлын агентлаг (NSA) нь CNSA 1.0 криптограф стандартыг Үндэсний аюулгүй байдлын системүүд (NSS)-ийг хамгаалах зорилгоор баталсан. АНУ-ын Үндэсний Стандарт ба Технологийн Хүрээлэн (NIST)-ийн тодорхойлсноор, энэхүү стандарт нь квант тооцооллоос хамгаалагдсан шинэ алгоритмууд боловсруулагдах хүртэл ашиглагдах болно [1].

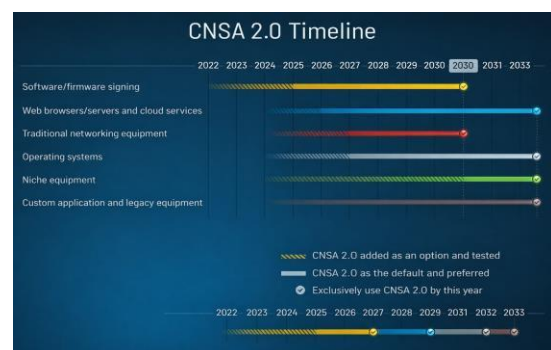
NIST нь мэдээллийн аюулгүй байдалд ойртож буй аюулыг таслан зогсоохын тулд 2016 оноос эхлэн квант компьютерын халдлагаас хамгаалах шинэ нийтийн түлхүүрт криптографийн стандарт боловсруулах ажлыг эхлүүлэн нээлттэй сонгон шалгаруулалт явуулсан [2].

Сонгон шалгаруулалт дараах үе шатуудаас бүрдэнэ:

- Анхны шалгаруулалт (2016-2017): Шинэ алгоритмуудын саналыг хүлээн авч эхэлсэн.

- 1-р шат (2017-2019): Олон улсын Криптографийн судлаачид нийт 69 алгоритм санал болгосон.
- 2-р шат (2019-2020): 26 алгоритм сонгогдож, аюулгүй байдал болон гүйцэтгэлийн үнэлгээ хийгдсэн.
- 3-р шат (2020-2022): Сүүлийн шатанд 7 алгоритм шалгарсан.
- Албан ёсны сонголт (2022-2025): Олон улсын стандарт руу шилжүүлэх ажил хийгдсэн.

NSA нь NIST-ээс стандартчилахаар сонгосон алгоритмуудаас сонгон, 2024 оны 12-р сард CNSA 2.0 стандартыг баталсан. Үүнтэй холбоотойгоор, Зураг 1-т заасан хугацаанд Suite B болон CNSA 1.0 стандартын алгоритмуудыг ашиглаж буй бүх системүүд CNSA 2.0 руу шилжих шаардлагатай гэж заасан [3].



1-р зураг. CNSA2.0 Timeline [3].

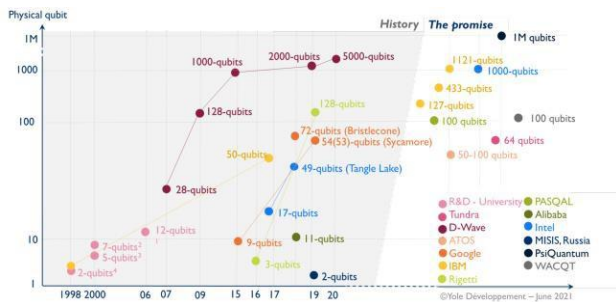
**A. Квант компьютер**

Квант компьютер нь бөөмсийн харилцан үйлчлэл, квант механикийн зарчмуудыг ашиглан мэдээлэл боловсруулах өндөр хүчин чадалтай тооцоолох төхөөрөмж юм. Энэ нь физикийн онолын нэг салбар болох квант механикт тулгуурладаг. [4]. Уламжлалт компьютероос ялгаатай нь мэдээллийг боловсруулах нэгж болох битийн оронд кубитийг ашигладаг. Кубит нь нэгэн зэрэг 0 болон 1-ийн төлөвт орших боломжтой ба суперпозици (Superposition), квант орооцолдоо (Entanglement), квант интерференц (Quantum Interference), квант хэмжилт (Quantum Measurement) зэрэг квант механикийн шинж чанаруудыг ашиглан маш хурдан, үр ашигтай тооцоолол хийх боломжийг олгодог.

Квант компьютерын гол онцлогууд:

- Суперпозици – Кубитууд нь superposition зарчмаар ажилладаг бөгөөд нэгэн зэрэг 0 ба 1-ийн төлөвт байж болно. Энэ нь квант компьютерыг олон тооцооллыг зэрэг хийх боломжийг олгодог.
- Орооцолдоо – Хоёр ба түүнээс дээш кубитууд хоорондоо холбогдож, нэг кубитын төлөв нь нөгөө кубитын төлөвөөс шууд хамааралтай болох үзэгдэл юм. Энэ нь квант компьютерыг маш хурдан мэдээлэл боловсруулах боломжийг олгодог.
- Квант интерференц – Кубитуудын төлөвүүд хоорондоо харилцан үйлчлэлцэж, зөвхөн зөв хариултуудыг нэмэгдүүлж, буруу хариултуудыг багасгадаг. Энэ нь квант компьютерын үр ашгийг нэмэгдүүлдэг.
- Квант хэмжилт – Кубитийн төлөвийг классик 0 эсвэл 1 төлөв болгон хөрвүүлэх явц. Хэмжилт хийгдсний дараа кубитийн суперпозици алдагдаж зөвхөн нэг төлөв үлдэнэ [4].

Квант компьютерын хөгжил нь криптографийн стандарт алгоритмуудад аюул учруулах ба 2035 он гэхэд RSA-2048 шифрлэлтийн алгоритмыг бүрэн эвдэлнэ [4]. Квант компьютерын хөгжлийн хурдацтай өсөлт болон ирээдүйд хүрэх боломжит түвшинг Зураг 2-т харуулав.

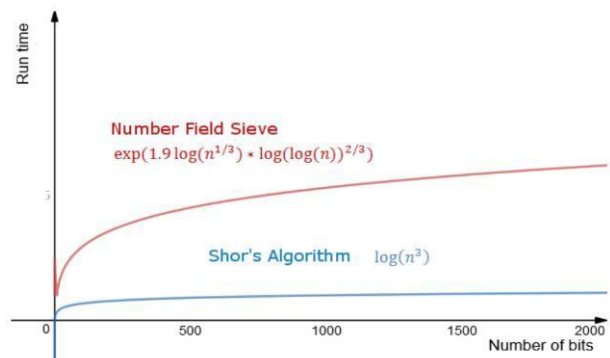


2-р зураг. 1998-2021 оны хооронд квант компьютерын физик кубитийн хөгжлийн замнал [5].

**B. Шорын алгоритм**

1994 онд Белл Лабс-ын судлаач Питер Шор квант компьютер дээр олон оронтой тоог олон гишүүнт хугацаанд ( $O(n^a)$ ;  $1 \leq a$ ) задлах алгоритмыг боловсруулсан ба Шорын алгоритм (Shor's Algorithm) хэмээн нэрлэгддэг.

Уламжлалт компьютер олон оронтой тоог (жишээлбэл, 2048 битийн урттай тоо) олон гишүүнт хугацаанд задалж чадахгүй. Одоогоор хамгийн хурдан нийтийн алгоритм нь NFS (Number Field Sieve) ба экспоненциал хугацаанд ажилладаг.



3-р зураг. Том тоог задлах хугацаа : NFS болон Shor's алгоритм.

Шорын алгоритмын үндсэн санаа нь квант Фурьегийн хувиргалт (Quantum Fourier Transform, QFT) ашиглан үе олох процесс юм [8].

Шорын алгоритм нь нийт 11 алхамтай ба үндсэндээ QFT ашиглан  $r$  болон  $x$  тоог дараах томъёогоор тооцоолно:

$$\frac{1}{\sqrt{|A|}} \sum_a \in A \frac{1}{\sqrt{r}} \sum_{c=0}^{r-1} |c, k\rangle * e^{2\pi i a \cdot c/q} \quad (1)$$

Сүүлчийн алхам нь дараах томъёогоор хийгддэг бөгөөд үүний үр дүнд том тооны анхны хуваагчийг олох боломжтой. Хамгийн их ерөнхий хуваагч (Greatest Common Divisor) тооцоолол нь уламжлалт компьютер дээр маш хурдан хийгддэг [8].

$$\gcd(x^{r/2} + 1, n) \text{ and } \gcd(x^{r/2} - 1, n) \quad (2)$$

**C. Handshake буюу холболт үүсгэх**

Handshake нь сүлжээний харилцаанд оролцогч талууд хоорондоо холболт үүсгэхийн өмнө хийгддэг, харилцааны параметруудыг тохиролцох, оролцогчдыг баталгаажуулах, мөн аюулгүй өгөгдөл дамжуулах нөхцөлийг бүрдүүлэх зорилготой протоколын эхний шатны процесс юм.

TCP түвшинд handshake нь холболтыг логик байдлаар үүсгэхэд чиглэдэг бол, TLS зэрэг аюулгүй байдлын протоколын хувьд энэхүү процесс нь криптограф алгоритмуудыг тохиролцох, түлхүүр солилцох, болон талуудын баталгаажуулалтыг хэрэгжүүлэх замаар нууцлал, бүрэн бүтэн байдал, баталгаат байдлыг хангахад чиглэнэ.

КВАНТ КОМПЬЮТЕР ДЭЭР АШИГЛАЖ БОЛОХ АЛГОРИТМУУД БА ТЭДГЭЭРИЙН ҮҮРЭГ, ХЭРЭГЛЭЭ  
1-Р ХҮСНЭГТ

NIST ЭЭС ЗАРЛАСАН СОНГОН ШАЛГАРУУЛТАД ШАЛГАРСАН КВАНТ КОМПЬЮТЕРЫН ДАРААХ КРИПТОГРАФЫН АЛГОРИТМУУД  
2-Р ХҮСНЭГТ

Алгоритм	Он	Үүрэг, хэрэглээ	Ашиглагдаг салбар
Дойч–Жоза алгоритм	1992	Функцийн шинж чанарыг нэг хэмжилтээр тодорхойлох	Квантын мэдээллийн онол
Саймоны алгоритм	1994	Шорын алгоритмын үндэс болсон, экспоненциал давуу талтай	Криптограф, квантын онол
Шорын алгоритм	1994	Анхны тооны задрал	Криптограф, аюулгүй байдал
Квант Фурьегийн хувиргалт	1994	Шорын алгоритмын гол бүрэлдэхүүн хэсэг, Фурье хувиргалт хийх	Сигнал боловсруулалт, квант симуляци
Гроверын алгоритм	1996	$O(\sqrt{n})$ хугацаанд хайлт хийх	Өгөгдөл хайлт, Хиймэл оюун ухаан, Криптограф
Нарроу–Хассидим–Ллойд алгоритм	2009	Шугаман тэгшитгэлийн системийг квант аргаар шийдэх	Физик, Машин сургалт, Санхүү

Шорын алгоритм нь квант компьютерын цорын ганц хэрэглээ биш юм. Хүснэгт 1-т 1992 оноос эхлэн хөгжүүлэгдсэн алгоритмуудыг ашиглагдах салбарын хамт харуулав. Криптографийн салбарт Гроверийн алгоритм (Grover's Algorithm) ч бас чухал нөлөө үзүүлдэг бөгөөд  $n$  урттай дарааллаас дурын элементийг  $O(\sqrt{n})$  хугацаанд хайлт хийн олох давуу талтай [8].

*D. Квант компьютерын дараах криптограф*

NIST нь криптографийн салбарт үүсээд буй асуудлыг шийдэхийн тулд шинэ алгоритмуудыг сонгон шалгаруулсан бөгөөд CNSA 1.0 стандарт дахь нийтийн түлхүүрт алгоритмуудыг үндсэн дөрвөн шалгуурыг давсан пост-квант алгоритмуудаар шинэчлэн, CNSA 2.0 стандартад тусгасан. Хүснэгт 2-т шалгуурыг давсан алгоритмуудын мэдээллийг харуулав [9].

Алгоритм	Хэрэглээ	Одоогийн төлөв
CRYSTALS-Kyber (ML-KEM)	KEM / түлхүүр капсулчлал	Стандартчилагдсан
CRYSTALS-Dilithium (ML-DSA)	Дижитал гарын үсэг	Стандартчилагдсан
FALCON (FN-DSA)	Дижитал гарын үсэг	Стандартын өмнөх шат
SPHINCS+ (SLH-DSA)	Дижитал гарын үсэг	Стандартчилагдсан
BIKE	KEM	Стандартчилагдахаар сонгогдоогүй
Classic McEliece	KEM	Стандартчилагдахаар сонгогдоогүй
HQC	KEM	Стандартчилахаар сонгогдсон

Эдгээр алгоритмуудыг сонгохдоо дараах хүчин зүйлсийг үнэлсэн :

- Аюулгүй байдал – Квант болон уламжлалт компьютерт хоёуланд нь тэсвэртэй байх.
- Гүйцэтгэл – Мэдээллийг шифрлэх, тайлах хурд өндөр байх.
- Нийцтэй байдал – Өнөөгийн мэдээллийн системд хялбархан интеграци хийх боломжтой байх.
- Туршилт, баталгаажуулалт – олон улсын судлаачдын нээлттэй үнэлгээ [9].

**II. СУДАЛГААНЫ АРГА**

2015 онд батлагдсан CNSA 1.0 стандартад ашиглагдсан криптографийн алгоритмуудыг хүснэгт 3-т харуулав. Энэхүү стандарт нь асимметрик болон симметрик криптографийн хамгийн өндөр аюулгүй байдлыг хангах зорилготой [1].

Асимметрик криптографийн хувьд:

- CNSA 1.0 стандарт нь RSA болон ECC алгоритмуудыг ашигладаг.
- Эдгээр алгоритмууд анхны тооны задрал болон дискрет логарифмын математикийн бодлогод тулгуурладаг.

CNSA 1.0 БУЮУ ӨНӨӨГИЙН БИДНИЙ ӨРГӨН АШИГЛАДАГ СТАНДАРТ

3-Р ХҮСНЭГТ

Алгоритм	Функц	Стандарт	Параметр
Advanced Encryption Standard (AES)	Блок шифрлэлт	FIPS Pub 197 [12]	256 битийн түлхүүр
Elliptic Curve Diffie-Hellman (ECDH) Key Exchange	Түлхүүр солилцох нийтийн түлхүүрийн алгоритм	NIST SP 800-56A [13][14]	P-384 муруй
Elliptical Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA)	Цахим гарын үсгийн нийтийн түлхүүрийн алгоритм	FIPS Pub 186-4 [14][15]	P-384 муруй
Secure Hash Algorithm (SHA)	Хэш алгоритм	FIPS Pub 180-4 [16]	SHA-384 хэш
Diffie-Hellman (DH) түлхүүр солилцоо	Түлхүүр солилцооны алгоритм	IETF RFC 3526 [17]	Хамгийн багадаа 3072-битийн модуль
Rivest-Shamir Adleman (RSA)	Түлхүүр үүсгэх алгоритм	NIST SP 800-56B rev 1 [18]	Хамгийн багадаа 3072-битийн модуль
Rivest-Shamir Adleman (RSA)	Цахим гарын үсэгт хэрэглэгддэг нийтийн түлхүүрийн алгоритм	FIPS PUB 186-4 [15]	Хамгийн багадаа 3072-битийн модуль

Квант компьютерын Шорын алгоритм нь RSA болон ECC-г хурдан хугацаанд эвдэх чадвартай учраас эдгээр алгоритмууд найдвартай бус гэж тооцогдох болсон. Иймд, 2024 оны 12 сард CNSA 2.0 стандартад квант компьютерын дараах криптограф (PQC) буюу квантын халдлагад тэсвэртэй алгоритмууд багтааж, аюулгүй байдлын шинэ шаардлагад нийцүүлэн сайжруулсан [10].

CNSA 2.0 БУЮУ ШИНЭЭР БАТЛАГДСАН КВАНТ КОМПЬЮТЕРД ТЭСВЭРТЭЙ СТАНДАРТ

4-Р ХҮСНЭГТ

Алгоритм	Функц	Стандарт	Параметр
Advanced Encryption Standard (AES)	Симметрик блок шифрлэлтийн алгоритм	FIPS PUB 197 [19]	256 бит түлхүүр
ML-KEM (CRYSTALS-Kyber)	Түлхүүр солилцох асимметрик алгоритм	FIPS PUB 203 [20]	ML-KEM-1024

ML-DSA (CRYSTALS-Dilithium)	Цахим гарын үсгийн асимметрик алгоритм	FIPS PUB 204 [21]	ML-DSA-87
Secure Hash Algorithm (SHA)	Хэш алгоритм	FIPS PUB 180-4 [22]	SHA-384, SHA-512
Leighton-Micali Signature (LMS)	Цахим гарын үсгийн асимметрик алгоритм	NIST SP 800-208 [23]	LMS SHA-256/192
Xtended Merkle Signature Scheme (XMSS)	Цахим гарын үсгийн асимметрик алгоритм	NIST SP 800-208 [24]	-
Secure Hash Algorithm 3 (SHA3)	Хэш алгоритм	FIPS PUB 202 [25]	SHA3-388, SHA3-512

Энэхүү судалгааны зорилго нь TLS 1.3 протоколд квантын дараах криптографийн алгоритм болох ML-KEM-ийг ашиглах үед сүлжээний холболтын гүйцэтгэлд ямар нөлөө үзүүлэхийг туршилтаар тодорхойлох явдал юм. Үүний хүрээнд уламжлалт TLS 1.3 холболтыг ML-KEM алгоритмын өөр өөр параметрийн багцтай харьцуулан судалсан.

ML-KEM (Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism) нь NIST-ээс FIPS 203 стандартаар баталсан, модуль-лэттис суурьтай, квант компьютерт тэсвэртэй түлхүүр тогтоох алгоритм юм. Уг алгоритм нь өмнө нь CRYSTALS-Kyber нэрээр танигдаж байсан бөгөөд стандартчиллын эцсийн шатанд техникийн зарим өөрчлөлт орсны үндсэн дээр ML-KEM нэршилтэй болсон. Түүний аюулгүй байдал нь Module Learning With Errors (Module-LWE) зэрэг тооцооллын хувьд хүндрэлтэй математик бодлогууд дээр тулгуурладаг тул уламжлалт болон квант халдагчийн аль алинд тэсвэртэй гэж үздэг.

ML-KEM нь уламжлалт Diffie-Hellman маягийн шууд түлхүүр солилцоо биш, харин KEM (Key Encapsulation Mechanism) төрлийн алгоритм юм. Өөрөөр хэлбэл, сервер тал нийтийн болон хувийн түлхүүрийн хос үүсгэж, клиент тал нийтийн түлхүүрийг ашиглан нэг удаагийн shared secret-ийг агуулсан ciphertext үүсгэн серверт илгээдэг. Сервер тал уг ciphertext-ийг задлан ижил shared secret-ийг сэргээж, дараа нь HKDF зэрэг түлхүүр үүсгэх функцээр боловсруулан TLS сессийн шифрлэлтийн түлхүүрүүдийг үүсгэдэг.

FIPS 203 стандартад ML-KEM-512, ML-KEM-768, ML-KEM-1024 гэсэн гурван параметрийн багцыг тодорхойлсон байдаг. Эдгээр нь аюулгүй байдлын түвшин өсөхийн хэрээр тооцооллын зардал нэмэгдэж, улмаар гүйцэтгэлд тодорхой нөлөө үзүүлдэг. Иймээс бодит хэрэглээнд ML-KEM-ийг сонгоходоо зөвхөн криптографийн хамгаалалтын түвшнээр бус, мөн TLS handshake-ийн хугацаа, пакетын хэмжээ, зурвасын өргөн, системийн нөөц ашиглалт зэрэг сүлжээний практик үзүүлэлтүүдтэй хамтатган үнэлэх шаардлагатай болдог [25].

Энэ судалгаанд TLS 1.3 протоколыг ML-KEM-512, ML-KEM-768, ML-KEM-1024 алгоритмуудтай ашиглан туршиж, дараах үндсэн чиглэлүүдээр шинжилгээ хийсэн. Үүнд:

- TLS 1.3 ба ML-KEM алгоритмуудын гүйцэтгэлийг харьцуулсан туршилт хийх
- Post-quantum түлхүүр солилцооны алгоритм handshake үеийн пакетын хэмжээ болон нийт дамжуулсан өгөгдөлд хэрхэн нөлөөлж байгааг хэмжих
- Пакет түвшний шинжилгээ хийх
- Туршилтын үр дүнг handshake хугацаа, latency, throughput зэрэг гүйцэтгэлийн үзүүлэлтүүдээр үнэлэх.

Мөн TLS 1.3 орчинд ML-KEM-ийг дангаар нь хэрэглэхээс гадна уламжлалт ECDHE алгоритмтай хослуулсан hybrid key agreement хэлбэр өргөн судлагдаж байна. Ийм hybrid загвар нь нэг талаас уламжлалт криптографийн нийцтэй байдал, нөгөө талаас квантын дараах хамгаалалтыг зэрэг хангах давуу талтай. Гэсэн хэдий ч энэхүү судалгаанд ML-KEM-ийн параметрийн багцуудыг TLS 1.3 орчинд ашиглахад үүсэх сүлжээний гүйцэтгэлийн өөрчлөлтөд голлон анхаарсан болно.

### III. ХЭРЭГЖҮҮЛЭЛТ, ТУРШИЛТЫН ҮР ДҮН

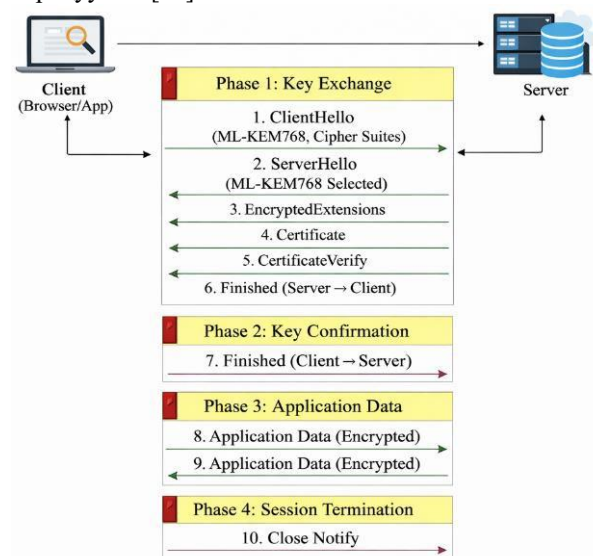
Туршилтын орчин:

- Судалгааны туршилтыг дараах орчинд гүйцэтгэсэн.
- Үйлдлийн систем: Ubuntu 22.04 / Linux 6.8.0-101
- Төхөөрөмж: Intel Core 7 150U
- TLS сан: OpenSSL 3.0.2 + + OQS Provider
- Сүлжээний интерфейс: ens37

Туршилтын орчинд сервер болон клиент талын төхөөрөмжүүдийг тусад нь тохируулж, хоёр талд ижил криптографийн нөхцөл бүрдүүлсэн. Эхлээд сервер болон клиент талд OpenSSL болон OQS Provider-ийг суулгаж, TLS 1.3 протокол дотор ML-KEM алгоритмуудыг ашиглах боломжийг

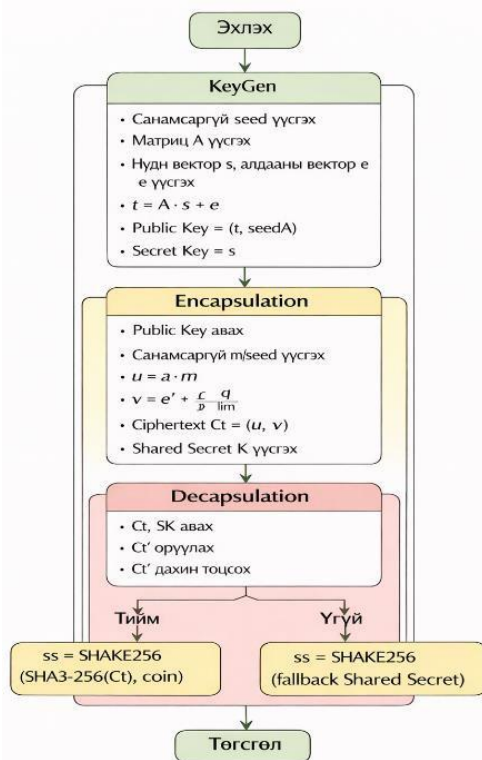
идэвхжүүлсэн. Үүний дараа сервер талд TLS серверийг ажиллуулж, клиент талаас түүнтэй холбогдох байдлаар туршилтыг зохион байгуулсан [27][28].

Сервер талд OpenSSL ашиглан TLS 1.3 холболтыг хүлээн авах сервер ажиллуулсан бол клиент талд тусгайлан боловсруулсан `rpc_test.sh` скриптийг ашиглан туршилтыг автоматжуулсан. Энэхүү скрипт нь TLS handshake процессыг олон давталтаар гүйцэтгэж, холболтын гүйцэтгэлийн үзүүлэлтүүдийг хэмжихэд зориулагдсан. Скриптийн тусламжтайгаар ML-KEM-512, ML-KEM-768, ML-KEM-1024 гэсэн гурван өөр параметрийн багцыг туршиж, үр дүнг уламжлалт TLS 1.3 тохиргоотой харьцуулсан[26].



4-р зураг. TLS 1.3 + ML-KEM ашигласан handshake процессын үе шат.

TLS 1.3 протоколын холболт үүсгэх үеийн үндсэн handshake урсгалыг үзүүлсэн бөгөөд клиент, серверийн хооронд түлхүүр солилцох, баталгаажуулах, өгөгдөл шифрлэн дамжуулах, холболтыг хаах үе шатуудыг дарааллаар нь харуулсан.



5-р зураг. ML-KEM алгоритмын үндсэн ажиллагааны үе шат.

Зурагт ML-KEM алгоритмын KeyGen, Encapsulation, Decapsulation гэсэн үндсэн гурван үе шаг болон эдгээрийн хоорондын уялдаа холбоог харуулсан. KeyGen шатанд public key болон secret key үүсэж, Encapsulation шатанд public key ашиглан ciphertext болон shared secret тооцоологдоно. Decapsulation шатанд secret key-ийн тусламжтай ciphertext-ээс shared secret-ийг сэргээн гаргаж авна. Ийнхүү зураг нь ML-KEM алгоритмаар хоёр тал ижил нууц утгыг аюулгүйгээр тогтоох логик ажиллагааг бүхэлд нь схемчилэн үзүүлж байна.

**В. Хэмжилтийн аргачлал**

Туршилтын явцад TLS handshake процессыг хоёр өөр нөхцөлд үнэлсэн. Нэгдүгээрт, нэг удаагийн TLS handshake-ийн үеийн гүйцэтгэлийг хэмжсэн. Энэ шатанд handshake-ийн нийт хугацаа, latency болон throughput зэрэг үзүүлэлтүүдийг тодорхойлсон. Мөн handshake процессын үеэр дамжих пакетын урсгалыг нарийвчлан шинжлэх зорилгоор нийт 10 пакетын солилцоог бүртгэн авч, тэдгээрийн хэмжээ болон дамжуулалтын хугацааг тооцоолсон. Ингэснээр нэг удаагийн handshake-ийн үед дамжсан нийт өгөгдлийн хэмжээ, дундаж packet size болон handshake-ийн үргэлжлэх хугацааг тодорхойлох боломж бүрдсэн.

```
client@client-virtual-machine: /oqs-provider/bull10S ./pqc_test.sh mken768 10
=====
Testing TLS group: mken768
Server: 192.168.214.129:4433
Packet count for analysis: 10
=====
---- 1 HANDSHAKE TEST ----
total time (1 handshake): .041933500 s
average latency: .041933500 s
throughput: 23.84728200603336234752 connections/sec

---- KEY SHARE & GROUP INFO ----
Key share info captured in keylogfile:
# SSL/TLS secrets log file, generated by OpenSSL
SERVER_HANDSHAKE_TRAFFIC_SECRET d658223538016dee0c9d34ac786bff908ccb6d71e0487cb57f
f399d5d50af98a716c4f60381f5ef2e9ee21e02caff902108b59d185b77114
EXPORTER_SECRET d658223538016dee0c9d34ac786bff908ccb6d71e0487cb57fcbf8282b1e53de
9fb3c768380a84f0cd3a5c58b979eae42d79b68d54fa80b
SERVER_TRAFFIC_SECRET_0 d658223538016dee0c9d34ac786bff908ccb6d71e0487cb57fc8f8282b
5fc1312aacd0be1fea49d4285757e1e99d81f550091d84902dc22ff3
CLIENT_HANDSHAKE_TRAFFIC_SECRET d658223538016dee0c9d34ac786bff908ccb6d71e0487cb57f
9e94d43eefdf831f10070f70758cb356a4146ebb2f23bfe53415e5270a377c
TLS group: mken768

---- HANDSHAKE SIZE ----
17401 /tmp/tmp.Lc6LhkzQHу
```

6-р зураг. ML-KEM768 алгоритм ашигласан TLS 1 handshake туршилтын үр дүн.

TLS 1.3 БОЛОН POST-QUANTUM KEY EXCHANGE АШИГЛАСАН 10 PACKET 1 УДААГИЙН HANDSHAKE-ИЙН ХАРЬЦУУЛСАН ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮД

5-Р ХҮЧЭГТ

Туршилтын хэмжигдэхүүн	TLS 1.3+post-quantum key exchange 1 handshake			
	TLS 1.3 (X25519)	TLS 1.3 + ML-KEM512	TLS 1.3 + ML-KEM768	TLS 1.3 + ML-KEM1024
Handshake time (s)	0.0848	0.0940	0.0419	0.0528
Latency(s)	0.0848	0.940	0.0419	0.0528
Throughput(conn/sec)	11.78	10.63	23.84	18.90
Handshake size (Bytes)	10282	15113	17401	20209
AvgPacket size (Bytes)	214.2	363.8	434.2	520.6

Хэмжилтийн дүнгээс үзэхэд TLS 1.3 + ML-KEM768 нь хамгийн сайн гүйцэтгэлтэй байсан. Тухайлбал, handshake time 0.0419 сек байсан нь энгийн TLS 1.3 (X25519)-ийн 0.0848 сек-тэй харьцуулахад ойролцоогоор 50.6%-иар бага, харин throughput 23.84 conn/sec болсон нь 11.78 conn/sec-ээс ойролцоогоор 2 дахин өндөр байна. Гэхдээ энэ хувилбарын handshake size 17401 Bytes, дундаж packet size 434.2 Bytes болж өссөн нь X25519-ийн 10282 Bytes ба 214.2 Bytes-тай харьцуулахад илүү их сүлжээний нөөц ашиглаж байгааг харуулж байна. Харин ML-KEM1024 нь мөн сайн үзүүлэлттэй боловч handshake size 20209 Bytes хүртэл өссөн бол ML-KEM512 нь throughput 10.63 conn/sec буюу суурь TLS 1.3-аас бага үзүүлэлттэй гарсан. Иймээс гүйцэтгэл ба ачааллын тэнцвэрийн хувьд ML-KEM768 хамгийн оновчтой сонголт гэж дүгнэж болно.

Хоёрдугаарт, системийн ерөнхий гүйцэтгэлийг үнэлэх зорилгоор 1000 удаагийн TLS handshake-ийг дараалан гүйцэтгэж, нийт хугацаа, дундаж latency болон throughput-ийг хэмжсэн. Энэхүү давталтад туршилт нь алгоритмуудын бодит хэрэглээний нөхцөл дэх ялгааг илүү бодитойгоор үнэлэх боломж олгосон.

```
Average packet size: 434,2 bytes
---- CPU & MEMORY USAGE (1 handshake) ----
%CPU %MEM  RSS CMD
=====
1000 HANDSHAKE TEST
=====
Total time (1000 handshakes): 13.677923184 s
Average latency: .01367792318400000000 s
Throughput: 73.11051440687780952813 connections/sec
Average CPU usage: 0 %
Average MEM usage: 0 %
Average RSS: 9178,42 KB
=====
TEST FINISHED
=====
```

7-р зураг. ML-KEM768 алгоритм ашигласан TLS 1000 handshake туршилтын үр дүн.

TLS 1.3 БОЛОН POST-QUANTUM KEY EXCHANGE АШИГЛАСАН 1000 УДААГИЙН HANDSHAKE-ИЙН ХАРЬЦУУЛСАН ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮД

6-Р ХҮСНЭГТ

Туршилтын хэмжигдэхүүн	TLS 1.3 +PQC 1000 удаагийн handshake			
	TLS 1.3 (X25519)	TLS 1.3 + ML-KEM512	TLS 1.3 + ML-KEM768	TLS 1.3 + ML-KEM1024
Total time(s)	14.58	13.93	13.67	13.42
Avg Latency(s)	0.01458	0.01393	0.01367	0.01342
Throughput(conn/sec)	68.57	71.74	73.11	74.50
Avg RSS Memory(kb)	7812	8666	9178	8568

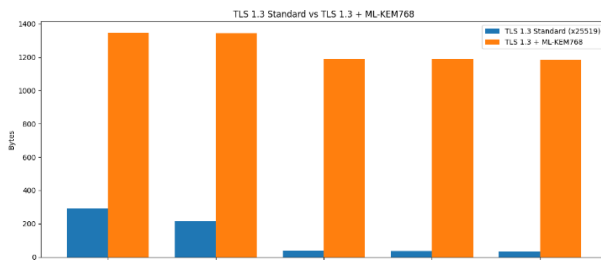
1000 удаагийн handshake-ийн үр дүнгээс үзэхэд PQC хувилбарууд нь нийт хугацаа, дундаж саатал, throughput-ийн үзүүлэлтээр суурь TLS 1.3 (X25519)-аас давуу байсан бол санах ойн хэрэглээ харьцангуй өндөр байв. Тухайлбал, ML-KEM1024 дээр throughput 74.50 conn/sec хүрсэн нь суурь хувилбарын 68.57 conn/sec-аас өндөр үзүүлэлт юм. Энэхүү хэмжилтийг 10 packet дамжуулаагүй, зөвхөн handshake ажиллагааны хүрээнд гүйцэтгэсэн болно.

С. Пакет түвшний шинжилгээ

TLS 1.3 болон ML-KEM алгоритмуудыг ашигласан холболтын үеийн пакет солилцоог Wireshark ашиглан бүртгэж, пакетын хэмжээ, тоо болон дамжуулалтын шинж чанарыг шинжилсэн. Ялангуяа post-quantum түлхүүр солилцооны улмаас handshake үеийн packet хэмжээ болон нийт дамжуулсан өгөгдлийн хэмжээ хэрхэн өөрчлөгдөж байгааг хэмжиж үнэлсэн.

8-р зураг. Wireshark үр дүн группийн мэдээлэл

TLS 1.3 handshake-ийн key\_share өргөнд агуулагдах түлхүүр солилцооны уртын ялгааг онцолсон болно. Тухайлбал, X25519 бүлгийн хувьд түлхүүрийн урт 32 байт байгаа бол post-quantum key exchange ашигласан тохиолдолд энэ хэмжээ 1184 байт болж өссөн байна. Иймээс улаан тэмдэглэгээ нь PQC алгоритм хэрэглэснээр handshake үеийн өгөгдлийн хэмжээ нэмэгдэж байгааг харуулахыг зорьсон.



9-р зураг. TLS1.3, TLS1.3+ML-KEM768 алгоритмын харьцуулалт

X25519 ба ML-KEM768-ийг харьцуулсан нь уламжлалт TLS handshake болон post-quantum handshake-ийн сүлжээний ачааллын ялгааг тодорхойлох зорилготой. X25519 нь TLS 1.3

протоколд хамгийн түгээмэл хэрэглэгддэг уламжлалт түлхүүр солилцооны алгоритмуудын нэг тул суурь харьцуулалтын үзүүлэлт болгон сонгогдсон. Харин ML-KEM768 нь аюулгүй байдлын түвшин болон гүйцэтгэлийн үзүүлэлтийн хооронд тэнцвэртэй хувилбар гэж үзэгддэг учраас post-quantum орчныг төлөөлөх үндсэн алгоритмаар сонгосон

Пакет түвшний шинжилгээгээр дараах үзүүлэлтүүдийг голлон авч үзсэн. Үүнд:

- handshake үеийн нийт пакетын тоо
- пакет тус бүрийн хэмжээ
- handshake үеийн нийт дамжуулсан өгөгдлийн хэмжээ
- дундаж packet size
- дамжуулалтын хугацааны өөрчлөлт

#### D. Үр дүнгийн үнэлгээ

Скрипт болон пакет шинжилгээний үр дүнд дараах үндсэн үзүүлэлтүүдийг хэмжиж авсан. Үүнд:

- TLS handshake-ийн нийт хугацаа (total handshake time)
- дундаж саатал (average latency)
- секундэд үүсгэж болох холболтын тоо (throughput)
- handshake үед дамжуулсан нийт өгөгдлийн хэмжээ
- packet-ийн дундаж хэмжээ
- системийн санах ойн ашиглалт (RSS)

Эдгээр үзүүлэлтүүдийг ML-KEM-ийн өөр өөр параметрийн багцууд болон уламжлалт TLS 1.3 тохиргоотой харьцуулан үнэлсэн. Ингэснээр TLS 1.3 протоколд post-quantum криптографийн алгоритм ашиглах үед холболтын гүйцэтгэлд үзүүлэх нөлөөг бодит сервер-клиент орчинд турших боломж бүрдсэн.

#### ДҮГНЭЛТ

Туршилтын үр дүнгээс харахад ML-KEM алгоритмыг TLS 1.3 орчинд ашиглах үед аюулгүй байдлын түвшин өсөхийн хэрээр handshake үеийн пакетын хэмжээ болон нийт дамжуулсан өгөгдлийн хэмжээ нэмэгдэх хандлагатай байна. Үүний зэрэгцээ handshake-ийн хугацаа болон системийн нөөц ашиглалт тодорхой хэмжээгээр өсөж байгаа нь post-quantum криптографийг бодит сүлжээний орчинд

хэрэгжүүлэхэд гүйцэтгэлийн тодорхой зардал дагалддаг болохыг харуулж байна.

Үр дүнгээс харахад ML-KEM-512 нь харьцангуй бага ачаалалтай, хурдан ажиллах боломжтой боловч хамгаалалтын түвшин харьцангуй бага сонголт болдог. ML-KEM-768 нь аюулгүй байдал болон гүйцэтгэлийн хувьд илүү тэнцвэртэй шийдэл гэж үзэж болох бол ML-KEM-1024 нь хамгийн өндөр хамгаалалтыг санал болгох хэдий ч packet хэмжээ, handshake хугацаа болон тооцооллын зардлыг илүү өсгөж байна.

Иймд post-quantum криптографийн алгоритмыг TLS 1.3 протоколд ашиглах нь ирээдүйн квант эрсдэлийг бууруулах ач холбогдолтой боловч бодит хэрэглээнд тохирох параметрийн багцыг сонгохдоо аюулгүй байдал ба гүйцэтгэлийн тэнцвэрийг зайлшгүй авч үзэх шаардлагатай юм.

#### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] Commercial National Security Algorithm (CNSA) Suite, MFS U/00/814670-15.
- [2] Bush G. National security strategy of the United States. – White House, 1991.
- [3] The Commercial National Security Algorithm Suite 2.0 and Quantum Computing FAQ, U/OO/194427-22 | PP-24-4014 | December 2024 Ver. 2.1
- [4] Khan, S., Krishnamoorthy, P., Goswami, M., Rakhimjonovna, F. M., Mohammed, S. A., & Menaga, D. (2024). Quantum Computing And Its Implications For Cybersecurity: A Comprehensive Review Of Emerging Threats And Defenses. *Nanotechnology Perceptions*, 20, S13.
- [5] QUANTUM TECHNOLOGIES 2021 Market & Technology Report - June 2021
- [6] Heath, S., 2002. Embedded system design. Elsevier.
- [7] Lutkevich, B. (2020, December) 'Embedded Систем', IoT Agenda.
- [8] Hayward, M. (2008). Quantum computing and shor's algorithm. *Sydney: Macquarie University Mathematics Department, 1.*
- [9] Halak, B., Gibson, T., Henley, M., Botea, C. B., Heath, B., & Khan, S. (2024). Evaluation of performance, energy, and computation costs of quantum-attack resilient encryption algorithms for embedded devices. *IEEE Access*, 12, 8791-8805.
- [10] National Institute of Standards and Technology (NIST). (2024) 'NIST Releases First 3 Finalized Post-Quantum Encryption Standard
- [11] Wise Key-Establishment Schemes Using Discrete Logarithm Cryptography.
- [12] National Institute of Standards and Technology (NIST), *FIPS 197: Advanced Encryption Standard (AES)*.
- [13] National Institute of Standards and Technology (NIST), *SP 800-56A Rev. 3: Recommendation for Pair-*
- [14] National Institute of Standards and Technology (NIST), *SP 800-186: Recommendations for Discrete Logarithm-based Cryptography: Elliptic Curve Domain Parameters*.
- [15] National Institute of Standards and Technology (NIST), *FIPS 186-5: Digital Signature Standard (DSS)*. Энэ нь FIPS 186-4-ийг орлосон одоогийн хүчинтэй хувилбар.
- [16] National Institute of Standards and Technology (NIST), *FIPS 180-4: Secure Hash Standard (SHS)*.
- [17] T. Kivinen and M. Kojo, *RFC 3526: More Modular Exponential (MODP) Diffie-Hellman groups for Internet Key Exchange*

- (IKE). RFC 3526 нь 2048, 3072, 4096, 6144, 8192-бит DH бүлгүүдийг тодорхойлдог.
- [18] National Institute of Standards and Technology (NIST), *SP 800-56B Rev. 2: Recommendation for Pair-Wise Key-Establishment Using Integer Factorization Cryptography*.
- [19] National Institute of Standards and Technology (NIST), *FIPS 197: Advanced Encryption Standard (AES)*.
- [20] National Institute of Standards and Technology (NIST), *FIPS 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard*.
- [21] National Institute of Standards and Technology (NIST), *FIPS 204: Module-Lattice-Based Digital Signature Standard*.
- [22] National Institute of Standards and Technology (NIST), *FIPS 180-4: Secure Hash Standard (SHS)*.
- [23] National Institute of Standards and Technology (NIST), *SP 800-208: Recommendation for Stateful Hash-Based Signature Schemes*.
- [24] National Institute of Standards and Technology (NIST), *FIPS 202: SHA-3 Standard: Permutation-Based Hash and Extendable-Output Functions*.
- [25] National Institute of Standards and Technology, “Module-lattice-based key-encapsulation mechanism standard,” FIPS 203, Gaithersburg, MD, USA, Aug. 13, 2024.
- [26] E. Rescorla, “The transport layer security (TLS) protocol version 1.3,” RFC 8446, Internet Engineering Task Force, Aug. 2018.
- [27] Open Quantum Safe, “oqs-provider: OpenSSL 3 provider containing post-quantum and traditional cryptography,” GitHub repository.
- [28] Open Quantum Safe, “Open Quantum Safe,” GitHub organization page.

# ХИЙМЭЛ ОЮУН АШИГЛАСАН ЖОЛООЧИЙН ХЯНАЛТЫН СИСТЕМИЙН ХӨГЖҮҮЛЭЛТ

Батын ЭРМҮҮН<sup>1</sup>, Цэрэндондогийн ТЭНГИС<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Электроникийн тэнхим

*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл: ermuun97875@gmail.com*

**Хураангуй:** Авто машины өөрийн техникийн асуудал, байгаль орчны асуудлаас бус жолоочийн өөрийн анхааралгүйгээс гаргасан мөргөлдөөн өнөөг хүртэл үргэлжилсээр байна. Энэхүү судалгаанд YOLO11n-pose загварыг ашиглан биеийн 17 цэгийн координат (51 feature), MediaPipe гарын мэдрэгчийг ашиглан хоёр гарын 21 цэг тус бүрийн координат (126 feature) — нийт 177 feature-ийг цуглуулан, Attention-MLP нейрон сүлжээгээр 10 ангилалд хуваан таних систем боловсруулсан. Focal Loss, Mixup, Test-Time Augmentation зэрэг арга техник ашигласан. Туршилтын үр дүнгээр системийн нарийвчлал 96.7%, Макро F1 оноо 96.4%-д хүрсэн. Илрүүлэлт хийгдэхэд Windows SAPI5 технологи ашиглан монгол хэлээр дуут анхааруулга өгөх боломжтой.

**Түлхүүр үг:** жолоочийн анхаарал сарниулалт, компьютерийн харааны систем, YOLO, MediaPipe, Deep learning, ESP32-CAM, дуут анхааруулга, замын аюулгүй байдал

## 1. УДИРТГАЛ

Замын хөдөлгөөний осол нь дэлхий даяар нас баралтын тэргүүлэх шалтгааны нэг байдаг. Дэлхийн эрүүл мэндийн байгууллагын мэдээгээр жил бүр 1.19 сая орчим хүн замын осолд амь насаа алддаг. Эдгээр ослын ихэнх нь жолоочийн анхаарал сарних, утсаар ярих, унтах зэрэг хүний хүчин зүйлтэй холбоотой байдаг.

Сүүлийн жилүүдэд deep learning болон computer vision технологи хурдацтай хөгжсөний үр дүнд жолоочийн байдлыг автоматаар хянах систем боловсруулах боломж бүрджээ. Ялангуяа биеийн байрлал болон гарын хөдөлгөөнийг ашигласан аргачлал нь нүүрний илэрхийлэл эсвэл нүдний хөдөлгөөнд суурилсан аргаас илүү бат бэх, орчны гэрэлтүүлгийн нөхцөлд тэсвэртэй байдаг.

Энэхүү судалгаанд хямд өртөгтэй ESP32-CAM камер ашиглан бодит цаг хугацаанд жолоочийн анхаарал сарниулалтыг илрүүлэх deep learning системийг боловсруулсан. YOLO11n-pose биеийн байрлал таних загвар болон MediaPipe гарын тэмдэглэгчийг хослуулан нийт 177 онцлогийг гаргаж авч, Анхаарлын MLP (Attention-MLP) нейрон сүлжээгээр 10 ангилалд хуваан таних ажлыг хийжээ.

Манай системийн онцлог нь: (1) жолооны сандлын урдаас авсан зураг (front-facing) ашиглах, (2) биеийн болон гарын онцлогийг хослуулан ашиглах, (3) Анхааруулгын MLP аргачлал ашиглан онцлогийн ач холбогдлыг автоматаар тодорхойлох, (4) монгол хэлээр дуут анхааруулга өгөх юм.

## 2. ХОЛБОГДОХ СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ТОЙМ

Дэлхийн эрүүл мэндийн байгууллагын мэдээгээр жил бүр 1.19 сая орчим хүн замын осолд амь насаа алддаг бөгөөд эдгээрийн ихэнх нь жолоочийн анхаарал сарнисантай холбоотой байдаг [4].

StateFarm жолоочийн анхаарал сарниулалтын өгөгдлийн багц [3] нь VGG, ResNet зэрэг CNN загваруудыг ашигласан олон судалгааны суурь болсон.

Ultralytics-ийн YOLO11 загвар [1] нь бодит цаг хугацаанд биеийн байрлал таних өндөр нарийвчлалтай боломжийг олгодог бол Zhang et al. [2]-ийн MediaPipe Hands нь гарын хөдөлгөөнийг төхөөрөмж дээрээ бодит цагт тодорхойлох арга юм. Энэхүү судалгаа нь эдгээр хоёр технологийг хослуулан биеийн болон гарын бүрэн мэдээллийг нэгтгэн ашигласнаараа өмнөх судалгаануудаас ялгарч байна.

## 3. ӨГӨГДӨЛ ЦУГЛУУЛАХ БА УРЬДЧИЛАН БОЛОВСРУУЛАЛТ

### 3.1 Ангиллын тодорхойлолт

Судалгаанд жолоочийн 10 ангиллыг авч үзсэн. Эдгээр ангиллуудыг 1-р хүснэгтэд харуулсан болно. Ангилал 0 нь аюулгүй жолоодохыг, 1–9 ангиллууд нь янз бүрийн анхаарал сарниулах байдлыг тус тус илэрхийлнэ.

1-р хүснэгт. Жолоочийн ангиллын тодорхойлолт

Ангилал	Тайлбар
c0	Аюулгүй жолоолох
c1	Утас бичих (texting – баруун гар)
c2	Утасны яриа (баруун гар)
c3	Утас бичих (texting – зүүн гар)
c4	Утасны яриа (зүүн гар)
c5	Радио тохируулах
c6	Ундаа, ус уух
c7	Ард гараа сунгах
c8	Үс засах / нүүр будах
c9	Зорчигчтой ярих

### 3.2 Өгөгдөл цуглуулах

Өгөгдөл цуглуулахдаа ШУТИС-ийн 4-5 оюутанд компьютерийн камераар ангилал тус бүрт 200 зураг авахаар зорьсон. Оролцогч нь дэлгэцийн урд жолооч мэт сууж, ангилал тус бүрийн үйлдлийг гүйцэтгэн зургийг бүртгүүлсэн. Автоматаар 5 зураг/секунд хурдтайгаар дарж авах горим болон гараар нэг нэгээр авах горим хоёуланг ашигласан.

### 3.3 Онцлог гаргаж авах

Зураг тус бүрийг ESP32-CAM-ийн VGA нарийвчлалтай (640×480) тохируулан letterbox аргаар хэмжээг өөрчилсний дараа YOLO11n-pose загварт оруулж биеийн 17 цэгийн координат (x, y, confidence) — нийт 51 онцлогийг гаргаж авсан. Нэгэн зэрэг MediaPipe HandLandmarker загвараар хоёр гарын 21 цэг тус бүрийн гурван хэмжээст координат (x, y, z) — нийт 126 онцлогийг гаргаж авсан. Ингэснээр нэг дээжинд 177 онцлог бий болсон.

Жолооч болон зорчигчийг ялгахын тулд: (1) frame-ийн дээд 70%-ийн мужид байгаа хүнийг л сонгох, (2) жолоочийн суудлын байршилд хамгийн ойрхон хүнийг confidence болон байршлаар нь дүгнэн сонгох алгоритмыг ашигласан. Биеийн онцлогийг мөрний болон ташааны дундаж цэгийн хоорондын зайг суурь болгон хэвийн болгосон (body-centric normalisation).

## 4. ЗАГВАРЫН АРХИТЕКТУР БА СУРГАЛТ

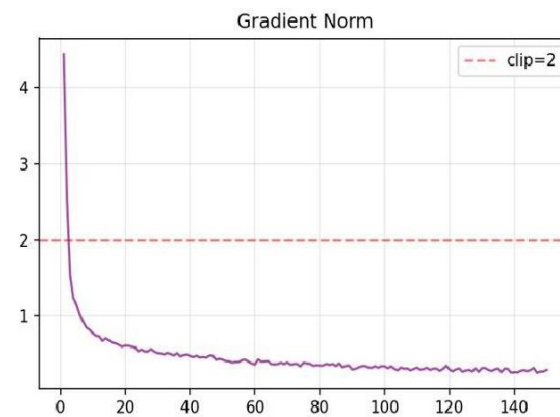
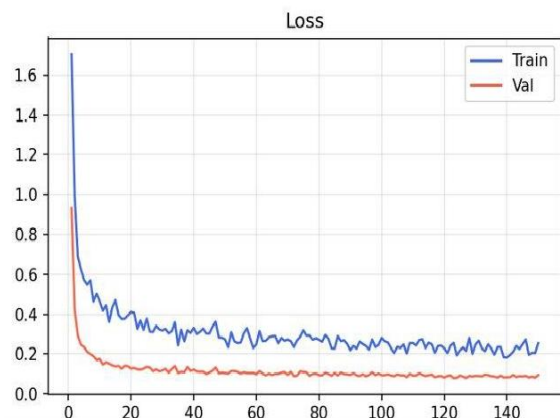
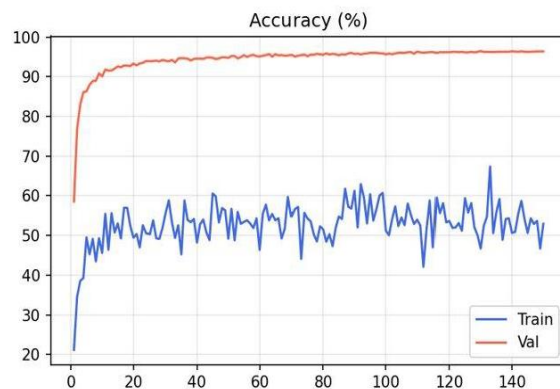
### 4.1 Анхаарлын MLP архитектур

Ангилал загварт Анхаарлын MLP (Attention-MLP) архитектурыг ашигласан. Оролтын 177 онцлогийг эхлээд AttentionGate-аар боловсруулж, ач холбогдолтой онцлогийг тодруулна. Дараа нь Residual блок бүхий 512→256→128 нейронтой гүнзгий MLP сүлжээгээр дамжуулан эцэст нь 10 ангилалд хуваана.

### 4.2 Сургалтын арга

Сургалтанд Focal Loss ( $\gamma=2.0$ , label smoothing=0.05), AdamW (lr=1e-3, weight decay=5e-5), OneCycleLR хуваарилагчийг ашигласан. Ангиллын тэнцвэргүй байдлыг засахын тулд WeightedRandomSampler болон ангиллын жингийн тохируулга хэрэгжүүлсэн.

Мэдээллийг баяжуулахын тулд Mixup ( $\alpha=0.2$ ) аргыг ашигласан. Зүүн/баруун гарын ангиллуудын хувьд хэвтээ тэнхлэгийн тусгалын үед ангиллын шошгыг зөв солих (label remapping) аргыг нэвтрүүлсэн (жишээ: c1 Texting-right ↔ c3 Texting-left). Мэдээллийн 70% сургалт, 10% баталгаажуулалт, 20% туршилтад хуваарилсан.



1-р зураг. Classifier сургалтын үр дүн: (дээрээс доош) Алдагдал, Нарийвчлал, Градиентийн норм

## 5. БОДИТ ЦАГИЙН ИЛРҮҮЛЭЛТИЙН СИСТЕМ

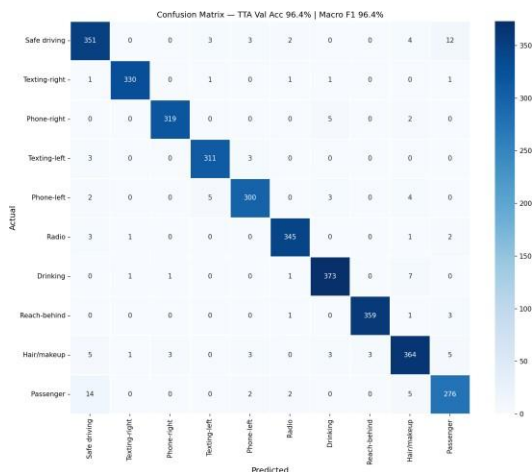
Сургалт хийсний дараах загварыг ONNX форматаар экспортлон бодит цагийн системд ашигласан. ONNX Runtime ашиглах нь PyTorch-тай харьцуулахад дүн боловсруулалтын хугацааг ~40% бууруулсан.

Систем нь дараах үндсэн бүрдлүүдээс тогтоно: (1) Зураг хүлээн авах — ESP32-CAM MJPEG stream эсвэл орон нутгийн камер; (2) Урьдчилан боловсруулалт — letterbox, хурц болгох шүүлтүүр; (3) Жолоочийг сонгох — YOLO + байршлын шүүлтүүр; (4) Онцлог гаргаж авах — 177 утга; (5) Ангилал — ONNX модель; (6) Жигдрүүлэлт — 8

фреймийн majority vote; (7) Анхааруулга — дуут болон дэлгэцийн анхааруулга.

Анхааруулгын системд Windows SAPI5 технологийг ашиглан монгол хэлний дуут анхааруулга нэвтрүүлсэн. Анхааруулга нь жолоочийг аюултай байрлалд 3 секунд болон түүнээс дээш үргэлжилсний дараа дуугарч, дахин дуугарахын тулд 10 секунд хүлээдэг.

### 6. ТУРШИЛТЫН ҮР ДҮН



2-р зураг. Confusion matrix

#### 6.1 Загварын гүйцэтгэл

Загварыг 150 эпохын турш сургасан. Хамгийн өндөр нарийвчлал нь 96.7%-д хүрсэн бол Test-Time Augmentation (TTA) ашигласан үед 96.4%-д хүрсэн. Макро F1 оноо 96.4%, тэнцвэржүүлсэн нарийвчлал 95.5% байна.

2-р хүснэгт. Загварын гүйцэтгэлийн үзүүлэлтүүд

Үзүүлэлт	Утга
Баталгаажуулалтын нарийвчлал	96.7%
TTA нарийвчлал	96.4%
Макро F1 оноо	96.4%
Тэнцвэржүүлсэн нарийвчлал	95.5%
Сургалтын параметрийн тоо	~1,450,000
Дүн боловсруулалтын хурд (CPU)	~12 FPS

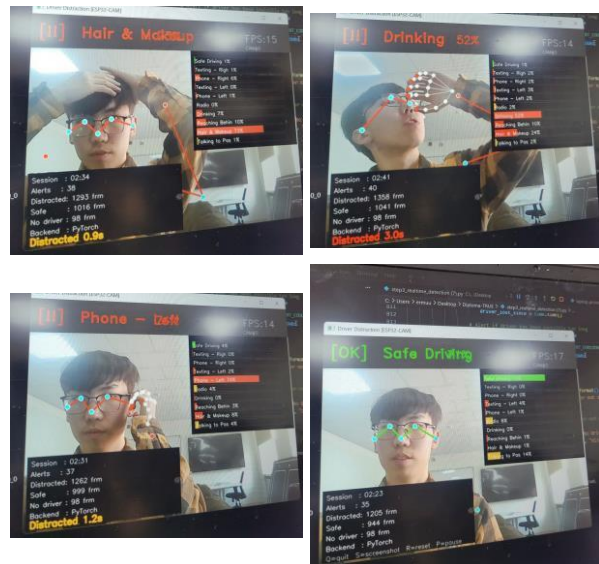
#### 6.2 Ангилал тус бүрийн үр дүн

Ангилал тус бүрийн гүйцэтгэлийг харвал c0 (аюулгүй жолоолох) 93.6%, c1 ба c3 (утасны text) 98.5%–98.1%, c2 ба c4 (утасны яриа) 97.9%–95.5% байна. Хамгийн бага нарийвчлал нь c8 (үс засах/нүүр будах) — 92.3% байсан бөгөөд энэ нь гарын байрлалын олон янзын байдалтай холбоотой гэж үзэж байна.

Аюултай ангиллуудын (c1–c4, c6–c8) нийт Макро F1 оноо 96.4% байна. Хуурамч эерэг (false positive) хувь 3.6% байсан нь бодит хэрэглэнд тохиромжтой түвшинд байна.

### 6.3 Бодит цагийн гүйцэтгэл

CPU дээр (Intel Core i5, ONNX Runtime) систем нь ~12 FPS хурдтай ажилладаг. CUDA-г дэмждэг GPU дээр ~35 FPS хүртэл хурдасдаг. ESP32-CAM-ийн MJPEG streaming ашиглахад сүлжээний саатлаас шалтгаалж ~12 FPS болдог. Анхааруулгын дуу нь тусдаа урсгалд ажиллах тул дэлгэцийн боловсруулалтад нөлөөлдөггүй.



3-р зураг. Бодит цагийн системийн дэлгэц

### ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаанд YOLO11n-pose болон MediaPipe гарын тэмдэгтийг хослуулан нийт 177 онцлогт (keypoint) тулгуурласан, Attention-MLP архитектур бүхий жолоочийн анхаарал сарниулалтыг илрүүлэх системийг боловсруулсан. Систем нь 10 ангиллын орчинд 96.7% баталгаажуулалтын нарийвчлал, 96.4% Макро F1 оноог хангаж байна.

Аргачлалын давуу тал нь: (1) зургийн шинж чанарт тулгуурлахын оронд биеийн байрлалын онцлогийг ашигласнаар орчны гэрэлтүүлгийн нөхцөлд тэсвэртэй болсон, (2) Mixup болон TTA аргыг ашигласнаар хязгаарлагдмал өгөгдлийн нөхцөлд сайн үр дүн гарсан, (3) монгол хэлний дуут анхааруулга нэвтрүүлсэн.

Цаашдын судалгаанд: ESP32-CAM дотор загварыг суулгах (edge deployment), нойрмоглолт болон ядаргааг нэмэлтээр илрүүлэх, олон камерын системийг турших, Raspberry Pi ашиглан компьютер болон Wi-Fi-ийн хэрэглээг арилгах зорилт тавьж байна.

### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Ultralytics. (2023). YOLO11: Real-Time Object Detection and Pose Estimation. GitHub. <https://github.com/ultralytics/ultralytics>

[2] Zhang, F., Bazarevsky, V., Vakunov, A., Tkachenka, A., Sung, G., Chang, C. L., & Grundmann, M. (2020).

- MediaPipe Hands: Төхөөрөмж дээрх бодит цагийн гарын мөрдөлт. arXiv:2006.10214.
- [3] State Farm. (2016). Жолоочийн анхаарал сарниулалтыг илрүүлэх өгөгдлийн багц. Kaggle. <https://www.kaggle.com/c/state-farm-distracted-driver-detection>
- [4] Дэлхийн эрүүл мэндийн байгууллага. (2023). Замын аюулгүй байдлын дэлхийн тайлан 2023. Женев: ДЭМБ.
- [5] Espressif Systems. (2023). ESP32-CAM техникийн тодорхойлолт. <https://www.espressif.com/en/products/modules/esp32>
- [6] Lin, T. Y., Goyal, P., Girshick, R., He, K., & Dollar, P. (2017). Нягт объект илрүүлэлтэд зориулсан фокусын алдагдал. ICCV, 2980–2988.
- [7] ONNX Runtime Contributors. (2023). ONNX Runtime: Өндөр гүйцэтгэлтэй машин сургалтын дүгнэлт. Microsoft. <https://onnxruntime.ai>

## ЦАГ ХУГАЦААНЫ ЦУВАА ХЭЛБЭРИЙН МЭДРЭГЧИЙН ӨГӨГДӨЛ ДЭЭРХ ГАЖУУДАЛ ТОДОРХОЙЛОХ БА ЗҮГШРҮҮЛЭХ НЬ

Нямын ГАНТӨМӨР<sup>1</sup>, Батаагын БАТЗОЛБОО<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл холбооны технологийн сургууль, Компьютерын ухааны тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [b231960002@must.edu.mn](mailto:b231960002@must.edu.mn)<sup>1</sup>

**Хураангуй:** Энэхүү судалгааны ажил нь цаг хугацааны цуваа хэлбэрийн мэдрэгчийн өгөгдөл дэх гажуудал (outliers) болон хоосон утгыг (missing values) тодорхойлох, тэдгээрийг оновчтой аргуудаар зүгшрүүлэн нөхөн сэргээх аргачлалуудыг харьцуулан судлах зорилготой. Бодит орчны мэдрэгчээс ирж буй өгөгдөл нь төхөөрөмжийн саатал, сүлжээний тасалдлаас үүдэн гүйцэтгэлд нөлөөлөх хэмжээний шуугиан гажуудал утгыг агуулдаг бөгөөд энэ нь уламжлалт машин сургалт болон гүн сургалтын загваруудын сургалтын явцыг удаашруулах болон таамаглалын нарийвчлалыг мэдэгдэхүйц хэмжээнд бууруулдаг. Судалгааны хүрээнд цэвэр өгөгдөл дээр зохиомлоор гажуудал үүсгэх (Anomaly Injection) байдлаар, илрүүлэлтийн алгоритмууд (IQR, STL, Isolation Forest) болон зүгшрүүлэх, ойролцоолох аргуудыг (Linear Interpolation, Central Moving Average, Exponentially Weighted Moving Average, Iterative Central Moving Average, Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial, Akima Interpolation, Spline Interpolation, K-Nearest Neighbors) дараалсан үе шаттайгаар үнэлэв. Туршилтын үр дүнг ангиллын нарийвчлал (Accuracy, Precision, F1-score), регрессийн алдаа (MSE, MAE, R<sup>2</sup>), болон машин сургалтын таамаглалын загварын гүйцэтгэл гэсэн 3 үе шаттайгаар хэмжсэн бөгөөд энэхүү урьдчилсан боловсруулалтын санал болгож буй архитектур нь эрчим хүчний ачааллын урьдчилсан таамаглалын загварын (Forecasting) алдааг мэдэгдэхүйц бууруулж чадаж байгааг баталлаа.

**Түлхүүр үг:** IQR, STL, Isolation Forest, Time series, Outlier detection, Data imputation

### I. УДИРТГАЛ (10PT, BOLD)

Машин сургалт болон гүн сургалтын загваруудын таамаглалын нарийвчлал нь сургалтад ашиглаж буй өгөгдлийн чанараас шууд хамаардаг. Цаг уурын станц, ухаалаг тоолуур, болон IoT (Internet of Things) мэдрэгчүүдээс бодит орчинд цуглуулсан цаг хугацааны цуваа хэлбэрийн өгөгдөл нь уламжлалт хүснэгтэн өгөгдлөөс ялгаатай нь цаг хугацааны тасралтгүй хамаарал, улирлын чанартай (seasonality) мөчлөгүүдийг агуулдаг. Гэвч бодит орчны физик нөхцөл байдлаас шалтгаалан эдгээр өгөгдөл нь ихэвчлэн бүрэн бус, шуугиан ихтэй (noisy) байх нь түгээмэл байдаг.

Мэдрэгчийн техникийн саатал, сүлжээний пакет дамжуулалтын алдагдал, эсвэл хүрээлэн буй орчны эрс тэс нөлөөллөөс шалтгаалан цуглуулсан өгөгдөлд дараах нийтлэг асуудлууд үүсдэг:

1. **Дутуу утга (Missing values):** Мэдрэгч унтрах эсвэл өгөгдөл дамжуулах үед тасалдал гарснаас үүдэн цаг хугацааны дараалалд хоосон зайнууд үүсэх.
2. **Гажуудал ба хэт гаж утга (Outliers/Anomalies):** Хэвийн тархалтаас огцом зөрсөн, физик боломжит хязгаараас давсан утгууд санамсаргүйгээр бүртгэгдэх.
3. **Санамсаргүй шуугиан (Gaussian Noise):** Хэмжилтийн төхөөрөмжийн өөрийнх нь нарийвчлалын алдаанаас үүдэлтэй бичил хэлбэлзлүүд.

Эдгээр алдаатай, гажуудсан өгөгдлийг урьдчилан боловсруулахгүйгээр шууд сургалтад (жишээлбэл LinearRegression, LSTM, GRU зэрэг гүн сургалтын загварт) ашиглах нь загвар цаг хугацааны жинхэнэ зүй тогтлыг бус, харин алдаатай "шуугиан"-ыг цээжлэн сурах өндөр эрсдэлд хүргэдэг бөгөөд энэ

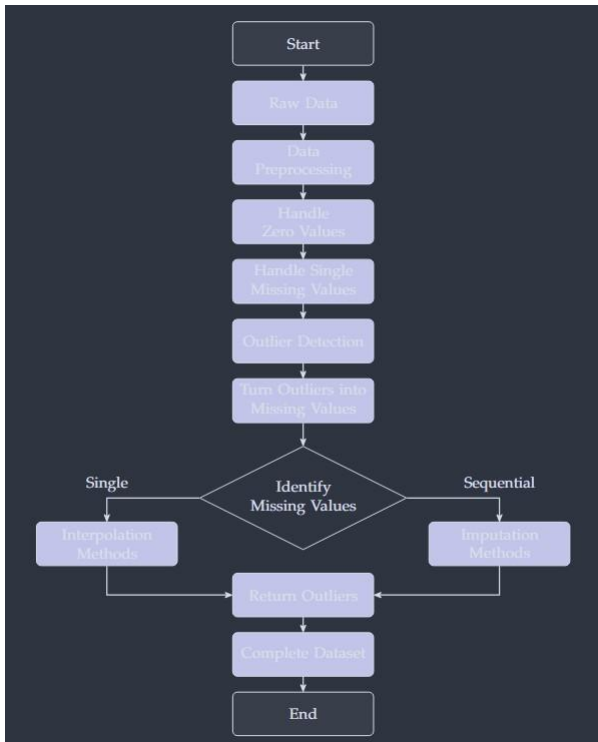
нь эцсийн таамаглалын алдааг мэдэгдэхүйц хэмжээгээр өсгөдөг байна.

Тиймээс цаг хугацааны цувааны өгөгдлийн урьдчилсан боловсруулалт (Data Preprocessing) нь зүгээр нэг нэмэлт алхам бус, таамаглалын загвар хөгжүүлэх хамгийн суурь бөгөөд чухал үе шат юм. Энэхүү урьдчилсан боловсруулалт нь өгөгдлийн гажуудлыг автоматаар илрүүлэх, дутуу утгыг нөхөн сэргээх (Imputation), болон өгөгдлийн ерөнхий хандлагыг зүгшрүүлэх (Smoothing) гэсэн харилцан уялдаатай цогц процессуудаас бүрдэнэ.

Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь цаг хугацааны цувааны өгөгдөл дэх гажуудлыг оновчтой тодорхойлох статистик (IQR), задралын (STL), болон машин сургалтын (Isolation Forest) аргуудыг системтэйгээр харьцуулах, мөн илрүүлсэн гажуудлыг бодит утгатай хамгийн ойролцоо байдлаар нөхөн сэргээж зүгшрүүлэх (Central Moving Average, Linear Interpolation гэх мэт) математик аргачлалуудын гүйцэтгэлийг үнэлэхэд оршино. Ингэснээр мэдрэгчийн өгөгдлийг цэвэрлэх хамгийн оновчтой аргачлалыг тодорхойлж, дараагийн шатны урьдчилан таамаглах загваруудын (Forecasting models) үр ашгийг нэмэгдүүлэх боломжийг бүрдүүлэх юм.

### II. ИЖИЛ ТӨСТЭЙ АЖЛУУД

Цаг хугацааны цуваа, тэр дундаа хүрээлэн буй орчны цаг уур болон эрчим хүчний мэдрэгчийн өгөгдөл дэх гажуудлыг (outliers) илрүүлэх, дутуу утгыг (missing values) нөхөн сэргээх талын судалгааны ажлуудаас дурдахад.



1-р зураг. Ижил төстэй ажлын гүйцэтгэлийн схем

Энэхүү ажлын хүрээнд тодорхойлсон "Гажуудал илрүүлэх Ангилах Зүгшрүүлэх" гэсэн хосолмол (Hybrid) аргачлал нь AlSalehy болон Bailey (2025) [1] нарын хийсэн суурь судалгаанд тулгуурласан бөгөөд бусад ажлуудтай хэрхэн уялдаж буйг 1 – р зураг дээрх үйл ажиллагааны диаграм дээр үндэслэн харьцуулбал.

1. Гажуудал илрүүлэлтийн суурь аргачлал болон Урьдчилсан боловсруулалт Ухаалаг хот болон эрчим хүчний хэрэглээний таамаглал хийхэд өгөгдлийн чанар хамгийн чухал байдаг. AlSalehy болон Bailey [1] нь мэдрэгчийн өгөгдлийн чанарыг сайжруулахын тулд гажуудлыг эхлээд илрүүлж устгаад, зориудаар хоосон утга (NaN) болон хувиргасны дараа логик маск ашиглан ангилж нөхөх шаг дараалсан архитектурыг санал болгосон. Энэхүү урсгал нь бидний судалгааны ерөнхий бүтэцтэй нийцэж байна. Энэхүү үе шатанд ашиглах алгоритмуудын хувьд барилгын эрчим хүчний зарцуулалтыг таамаглах судалгаанд [2] IQR (Interquartile Range) болон Isolation Forest нь цаг хугацааны цуваан дахь хэт гаж утгуудыг илрүүлэх хамгийн найдвартай аргууд болохыг баталсан. Түүнчлэн, IoT мэдрэгчийн өгөгдлийн хэвийн бус савлагааг устгахгүйгээр шууд нөхөн сэргээлт хийх нь математик загваруудыг төөрөгдүүлдэг болохыг судлаачид [3] давхар баталсан нь бидний урьдчилсан боловсруулалтын алхмыг зөвтгөж байна.

2. Тасалдлын шинж чанар болон Төрөлжсөн ангилал (Single vs. Sequential) Дутуу утгын урт, хэлбэрээс хамаарч өөр өөр аргачлал ашиглах нь AlSalehy [1]-ийн судалгааны гол цөм юм. Цаг хугацааны цувааны гажуудлыг энгийн дан цэгийн

(single/point) болон дараалсан (sequential/collective) хэмээн ангилах чиглэлээр хийгдсэн томоохон судалгаанд [4] эдгээр нь математик болон физик утгын хувьд өөр өөр шинж чанартайг тодорхойлж, логикоор салгах хандлагыг дэмжсэн байдаг. Бидний судалгаа энэхүү концепцод тулгуурлан тасалдлуудыг ялгаж, тус бүрд нь тохирсон зорилгот зүгшрүүлэлт хийх аргачлалыг хэрэгжүүлсэн.

3. Зүгшрүүлэх математик алгоритмуудын харьцуулалт (CMA болон РСНIP) Уламжлалт гүйдэг дундаж (Moving Average) нь богино хугацааны буюу дан тасалдлыг маш сайн нөхдөг ч, урт хугацааны дараалсан тасалдал дээр "хэт зүгшрүүлэх" (excessive smoothing) буюу өгөгдлийн нарийн хэлбэлзлийг устгах сул талтайг үндсэн судалгаанд [1] онцолсон байдаг. Энэхүү дүгнэлтийг цаг агаарын цувааны хоосон утгыг нөхөх аргуудын сүүлийн 10 жилийн чиг хандлагын судалгаа [5] мөн баталдаг. Урт хугацааны дараалсан тасалдлыг шийдвэрлэхийн тулд AlSalehy [1] болон бусад судлаачид [6] РСНIP (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial) интерполяци болон KNN (K-Nearest Neighbors) ашиглах нь хамгийн оновчтой болохыг нотолсон бөгөөд эдгээр арга нь өгөгдлийн муруйн байгалийн шинж чанарыг хадгалж, эцсийн машин сургалтын загварын алдааг мэдэгдэхүйц бууруулдаг байна.

### III. ӨГӨГДЛИЙН БАГЦ

Гажуудлыг тодорхойлох болон зүгшрүүлэх аргуудыг математик үндэслэлтэйгээр харьцуулахын тулд ямар нэгэн байгалийн шуугиангүй, цэвэр "Benchmark" өгөгдлийн багцуудыг сонгон ашигласан. Ингэснээр туршилтын явцад оруулсан зохиомол алдаагаа буцаан илрүүлж байгаа эсэхийг баталгаажуулах боломжтой болно.

Tetuan City эрчим хүчний хэрэглээний өгөгдөл: Энэхүү өгөгдлийн багц нь 10 минутын давтамжтайгаар бүртгэгдсэн температурын хэмжүүр, агаарын чийгшил, салхины хурд зэрэг цаг уурын үзүүлэлтүүдээс гадна тухайн хотын 3 өөр бүсийн эрчим хүчний бодит хэрэглээний (Zone Power Consumption) хэмжээг агуулсан болно. Энэхүү нарийвчилсан давтамжтай өгөгдөл нь цаг хугацааны цувааны хэлбэлзлийг судлахад нэн тохиромжтой юм.

	DateTime	Temperature	Humidity	general diff.Fuse Flows	diff.Fuse Flows	Zone 1 Power Consumption	Zone 2 Power Consumption	Zone 3 Power Consumption
0	2017-01-01 00:00:00	6.559	73.8	0.051	0.119	34055.69620	16128.87338	20240.96386
1	2017-01-01 00:10:00	6.414	74.5	0.070	0.085	29814.68354	19375.07399	20131.08434
2	2017-01-01 00:20:00	6.313	74.5	0.062	0.100	29128.19127	19006.68893	19668.43373
3	2017-01-01 00:30:00	6.121	75.0	0.091	0.096	28228.86076	18361.09422	18899.27711
4	2017-01-01 00:40:00	5.921	75.7	0.048	0.085	27335.69620	17872.34043	18442.40964

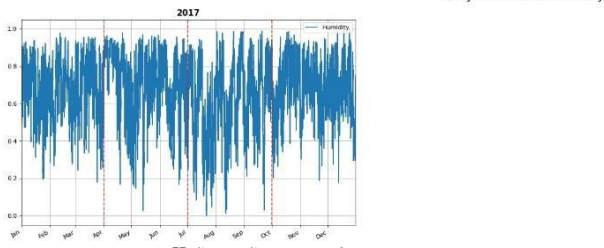
2-р зураг. Өгөгдлийн багцийн баганууд болон түүний утгуудын жишээ

### IV. АРГАЧЛАЛ

Бид энэхүү судалгаандаа цаг хугацааны цувааны өгөгдөл, тэр дундаа эрчим хүчний зарцуулалт болон цаг уурын мэдрэгчийн өгөгдөл дэх гажуудлыг илрүүлэх, хоосон утгыг нөхөн сэргээх олон шатлалт, хосолмол (Hybrid) архитектурыг санал болгож байна. Энэхүү арга зүй нь өгөгдлийн урьдчилсан



4-р зураг. 1 – р бүсийн эрчим хүчний хэрэглээний маштаблсан утгын тархалт



5-р зураг. Чийгшлийн маштаблсан утгын тархалт

Зураг 3 – 5 дахь графикуудад харуулснаар өгөгдлийн багцад хийсвэр гажуудал оруулахаас өмнөх тархалтыг харуулж байна.

Хийсвэр утгыг өгөгдөлд оруулах класс хэрэгжилтийн байгуулагч функцаар дараах параметруудийг дамжуулах юм.

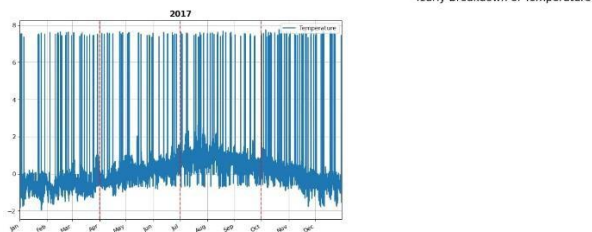
2-Р ХҮСНЭГТ

№	Параметрийн нэр	Тоон утга
1	miss_val_percent	0.1
2	outlier_percent	0.05
3	outlier_strength	4
4	num_block	10

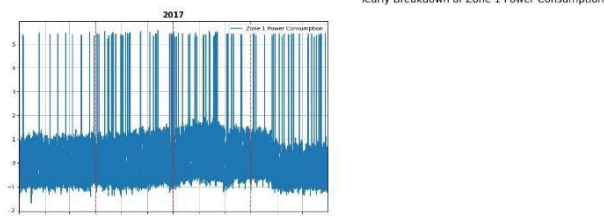
б. Параметруудийн утгын хүснэгт

Энд miss\_val\_percent, outlier\_percent, outlier strength параметрууд болон түүний тоон туга нь тухайн өгөгдөлд хэдэн хувьд нь дараах төрлийн гажуудлыг санамсаргүй байдлаар оруулахыг тодорхойлж байгаа юм.

Харин num\_block нь тухайн өгөгдөл дараалсан байдлаар хоосон утга оруулахдаа хэр урт байдлаар оруулахыг илэрхийлнэ.

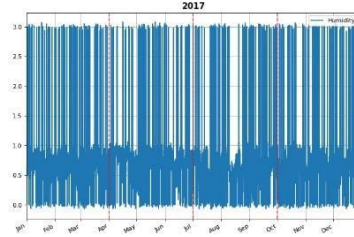


6-р зураг. Хийсвэр гажуудал оруулсны дараах температурын утгын тархалт



7-р зураг. Хийсвэр гажуудал оруулсны дараах . 1 – р бүсийн эрчим хүчний хэрэглээний утгын тархалт

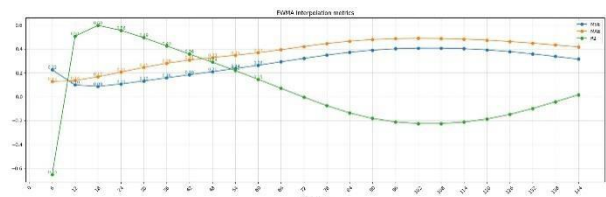
Yearly Breakdown of Humidity



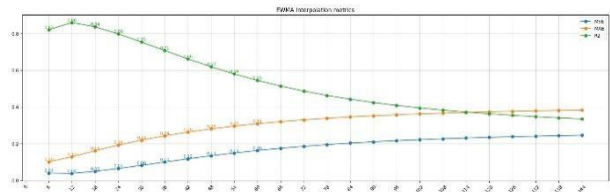
8-р зураг. Хийсвэр гажуудал оруулсны дараах чийгшлийн утгын тархалт

Зураг 6 – 8 дахь графикуудад харуулснаар өгөгдлийн багцад хийсвэр гажуудал утгуудыг оруулсны дараах тархалтыг харуулж байна.

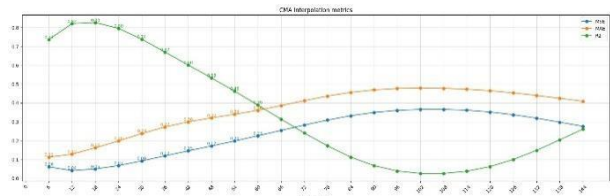
### В. Хоосон утгыг нөхөх аргын үр дүн



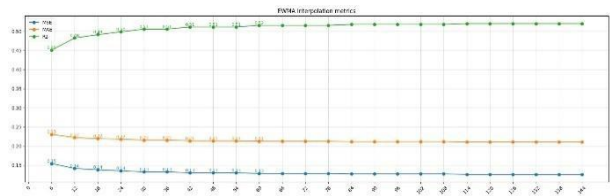
9-р зураг. ISMA аргаар дан болон дараалсан хоосон утгыг зүгшрүүлсний дараах бодит утгатай харьцуулсан үнэлгээ



10-р зураг. EWMA аргаар дан болон дараалсан хоосон утгыг зүгшрүүлсний дараах бодит утгатай харьцуулсан үнэлгээ



10-р зураг. SMA аргаар дан болон дараалсан хоосон утгыг зүгшрүүлсний дараах бодит утгатай харьцуулсан үнэлгээ



11-р зураг. KNN аргаар дан болон дараалсан хоосон утгыг зүгшрүүлсний дараах бодит утгатай харьцуулсан үнэлгээ

3-Р ХҮСНЭГТ

Арга	MSE	MAE	R <sup>2</sup>
Linear interpolation	0.2519004	0.1314165	-0.578
MA(window_size=12)	0.04	0.13	0.82
CMA(window_size=12)	0.04	0.13	0.82
<b>EWMA(window_size=12)</b>	<b>0.04</b>	<b>0.13</b>	<b>0.86</b>
ICMA(window_size=18)	0.09	0.17	0.60
PCHIP	0.27935	0.13736	-0.6942
AKIMA	0.2811	0.1492	-0.6972
SPLINE	0.28	0.1491	-0.6972
KNN(n_neighbors=60)	0.13	0.21	0.52

Үнэлгээний харьцуулалтын хүснэгт

Туршилтын үр дүнгээс харахад цаг хугацааны цувааны тасалдлын уртаас (дан болон дараалсан) хамааран алгоритмуудын гүйцэтгэл эрс ялгаатай байлаа. Энэ нь өгөгдлийн тасалдлыг логикоор ангилж, зорилтог аргаар зүгшрүүлэх бидний санал болгосон хосолмол (Hybrid) архитектурын ач холбогдлыг давхар баталж байна.

**1. Хамгийн сайн гүйцэтгэлтэй арга (EWMA)** Хүснэгтээс харахад EWMA () буюу Экспоненциал жигнэсэн гүйдэг дундаж арга нь хамгийн бага алдаатай (MSE = 0.04, MAE = 0.13), хамгийн өндөр тайлбарлах чадвартай ( = 0.86) буюу үнэмлэхүй шилдэг үр дүнг үзүүлсэн байна. Энэ нь цаг агаар болон эрчим хүчний цаг хугацааны цувааны хувьд өнгөрсөн үеийн бүх утгыг ижил хэмжээнд авах бус, харин *хамгийн сүүлийн үеийн утгуудад илүү өндөр жин өгч тооцдог* EWMA алгоритмын математик давуу тал бодит өгөгдөл дээр бүрэн батлагдаж байгааг харуулж байна.

**2. Уламжлалт гулсах дундаж аргууд (MA, CMA) MA болон CMA** алгоритмууд цонхны хэмжээ байх үед хоёулаа ижил түвшний маш сайн гүйцэтгэлтэй ( = 0.82) байна. Энэ нь бидний өмнө дэвшүүлсэн "Дан хоосон утга буюу богино хугацааны тасалдлыг гүйдэг дундаж аргууд маш өндөр нарийвчлалтайгаар гүүрлэн нөхөж чаддаг" гэх онолыг баталж байна.

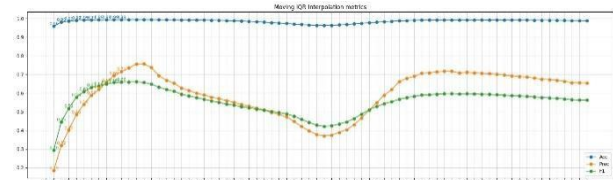
**3. Нарийвчилсан интерполяциудын аргууд (PCHIP, AKIMA, SPLINE)** Энэ хүснэгтийн хамгийн сонирхолтой бөгөөд судалгааны мэтгэлцээнд (Discussion) оруулах чухал хэсэг нь эдгээр аргуудын сөрөг оноо юм (-0.578-аас -0.697).

- Муруй байгуулагч эдгээр аргууд нь дараалсан урт тасалдал (жишээ нь 4 цагийн блок) дээр зохиомол хэлбэлзэл үүсгэх буюу хэтрүүлэн үнэлэх (overshooting) эрсдэлтэй байдаг нь энэхүү сөрөг оноогоор батлагдаж байна.
- Гэсэн хэдий ч, энэхүү гурван аргыг хооронд нь харьцуулахад бидний сонгосон PCHIP арга нь хамгийн бага алдаатай (MSE = 0.279) байгаа нь муруйн хязгаарыг давж савладаггүй монотон шинж чанартай нь холбоотой юм.

**4. Машин сургалтад суурилсан арга (KNN) KNN ()** алгоритм нь дундаж түвшний гүйцэтгэлтэй (R<sup>2</sup> = 0.52) байна. Хэдийгээр

интерполяцийн аргуудаас илүү сайн ажилласан ч, зөвхөн орон зайн зайд тулгуурладаг тул EWMA шиг цаг хугацааны шууд хамаарлыг (temporal dependency) сайн барьж чадаагүй байна.

*С. Гажуудал утгуудыг зүгшрүүлэх аргуудын үр дүн*



12-р зураг. MIQR аргаар гажуудал утгыг тодорхойлсон үр дүн

4-Р ХҮСНЭГТ

Арга	Accuracy	Precision	F1-score
IQR	0.9856	0.624	0.53
<b>MIQR(window_size=72)</b>	<b>0.9864</b>	<b>0.7654</b>	<b>0.6548</b>
Isolation Forest	0.9547	0.16311	0.24781

Үнэлгээний харьцуулалтын хүснэгт

Хүснэгт 4. – д гажуудал илрүүлэх алгоритмуудын үнэлгээний харьцуулалт. Хугацааны цувааны хэлбэлзэлд динамикаар дасан зохицдог MIQR алгоритм нь хөдөлгөөнгүй босго утга ашигладаг IQR болон Isolation Forest аргуудаас илүү өндөр F1-score үзүүлсэн байна.

**1. Хамгийн сайн гүйцэтгэл: Moving IQR (MIQR)** Хүснэгтээс харахад MIQR буюу Гүйдэг Интераквартиль далайцын арга нь 98.64%-ийн нарийвчлалтай (Accuracy) ажилласнаас гадна, Precision (0.7654) болон F1-score (0.6548) үзүүлэлтээрээ бусад хоёр аргаасаа үнэмлэхүй давуу үр дүнтэй гарсан байна. Энэ нь цаг хугацааны цувааны хувьд өгөгдлийн орон нутгийн (local) хэлбэлзэл, улирлын чанартай савлагааг дагаж динамикаар босго утгаа (threshold) өөрчилдөг MIQR аргын давуу талыг математикийн хувьд бүрэн баталж байна. (Жич: Та хүснэгтийнхээ window\_size= хэсэгт өмнөх графикаас харсан хамгийн өндөр оноо авсан цонхны хэмжээгээ буюу 66-г нөхөж бичээрэй).

**2. Уламжлалт IQR аргын хязгаарлагдмал байдал** Уламжлалт IQR арга нь нарийвчлалын хувьд өндөр (0.9856) байгаа хэдий ч Precision (0.624) болон F1-score (0.53) нь MIQR-аас харьцангуй бага байна. Үүний шалтгаан нь уламжлалт IQR нь нийт өгөгдлийн багцын хувьд зөвхөн нэг л статик босго утга ашигладаг тул өдрийн цагийн хэвийн өндөр хэрэглээг "гажуудал" гэж андуурч хуурамч эерэг (False Positive) алдааг ихээр гаргадагтай холбоотой юм.

**3. Isolation Forest алгоритмын сул тал** Машин сургалтын Isolation Forest алгоритмын Accuracy нь 0.9547 байгаа хэдий ч Precision (0.163) болон F1-score (0.247) нь маш бага гарсан байна. Цаг хугацааны цувааны өгөгдөл нь цаг хугацаанаас хамаарсан хүчтэй зүй тогтолтой байдаг тул хугацааны хоцрогдол (lag features) зэрэг нэмэлт

шинж чанаруудыг (feature engineering) үүсгэж өгөхгүйгээр уламжлалт Isolation Forest-ийг шууд ашиглах нь нарийн шуугианыг (noise) хэвийн бус гажуудлаас ялгаж чадахгүй, маш олон хэвийн утгыг алдаатайгаар устгах эрсдэлтэй болохыг энэхүү үр дүн харуулж байна.

D. Гажуудал утгын зугшируулалтийн үр дүн

5-р ХҮСНЭГТ

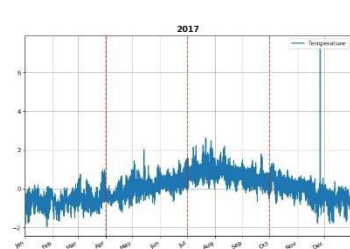
Арга	MSE	MAE	R <sup>2</sup>
EWMA(window_size=12)	0.00642	0.0508	0.9670
ICMA(window_size=18)	0.00633	0.0537	0.9524
PCHIP	0.00832	0.0631	0.9641
AKIMA	0.00795	0.0593	0.9573
SPLINE	0.00616	0.0542	0.9542
KNN(n_neighbors=60)	0.00831	0.0651	0.96203

Үнэлгээний харьцуулалтын хүснэгт

**1. Хамгийн сайн гүйцэтгэл: EWMA (w=12)**  
Шинэчилсэн хүснэгтээс харахад EWMA (Экспоненциал жигнэсэн гүйдэг дундаж) арга нь хувьсах хэмжигдэхүүний тайлбарлах чадварын хувьд хамгийн өндөр буюу = **0.9670**, мөн дундаж үнэмлэхүй алдаа хамгийн бага (MAE = **0.0508**) үзүүлэлттэй гарч тэргүүлсэн байна. Гажуудал (outliers) нь ихэвчлэн урт хугацааны мэдрэгчийн унтралт (block missing) гэхээсээ илүүтэйгээр богино хугацааны огцом савлагаа (spike) хэлбэрээр илэрдэг. Иймд устгагдсан гаж утгын оронд ойрын хөршүүдэд илүү өндөр жин өгч тооцдог EWMA алгоритм нь физик утгаараа төгс зохицож, унаган трендийг 96.7%-ийн нарийвчлалтайгаар буцаан сэргээж чадсан байна.

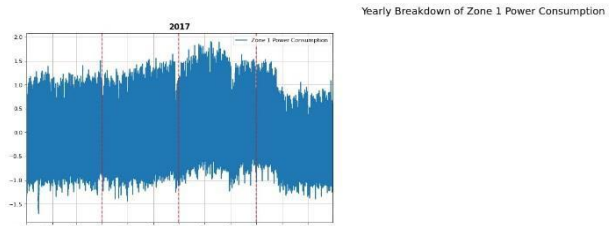
**2. Хамгийн бага дундаж квадрат алдаа: SPLINE болон ICMA** Хэдийгээр EWMA нийт тайлбарлах чадвараар тэргүүлсэн ч, Дундаж квадрат алдаа (MSE)-ны хувьд аргууд маш бага алдаатай гарсан байна. Энэ нь куб сплайн болон давталттай гүйдэг дундаж аргууд нь математик тооцооллын хувьд хоосон зайд хэт их савлагаа үүсгэхгүйгээр, алдааны дисперсийг маш сайн дарж чаддаг болохыг харуулж байна.

**3. Хосолмол (Hybrid) архитектурын үр ашиг**  
Энэхүү хүснэгтийн хамгийн чухал ололт нь туршигдсан бүх алгоритмуудын оноо **0.95-аас дээш (95%+)** гарсан явдал юм. Хэвийн бус гаж утгуудыг Isolation Forest болон MIQR ашиглан устгаж NaN утгаар цэвэрлэсний дараа зорилтот интерполяци хийх нь анхны мэдрэгчийн цэвэр өгөгдлийг бараг алдаагүй (near-perfect) нөхөн сэргээж чаддаг болохыг энэхүү үр дүн хөдлөшгүйгээр баталж байна.

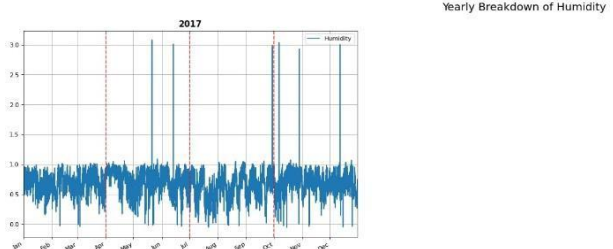


Yearly Breakdown of Temperature

14-р зураг. Гажуудал утгыг зугшируулсний дараах температурын утга



15-р зураг. Гажуудал утгыг зугшируулсний дараах 1-р бүсийн эрчим хүчний хэрэглээний утга



16-р зураг. Гажуудал утгыг зугшируулсний дараах чийгшиллийн утга

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажилд хүрээлэн буй орчны хяналт болон эрчим хүчний систем дэх цаг хугацааны цувааны өгөгдлийн чанарыг сайжруулах олон шатлалт, хосолмол (Hybrid) архитектурыг санал болгож, математик үнэлгээнүүдээр баталгаажууллаа. Мэдрэгчээс ирж буй түүхий өгөгдөл дэх гажуудлыг илрүүлэх, хоосон утгыг тасалдлын уртаар нь ангилж зорилтот интерполяци хийх нь цаашдын машин сургалтын таамаглалын нарийвчлалыг хэрхэн сайжруулдгийг дараах байдлаар нэгтгэн дүгнэж байна:

- Динамик гажуудал илрүүлэлт:** Цаг хугацааны цувааны орон нутгийн (local) хэлбэлзэлд дасан зохицдоггүй статик аргуудаас (уламжлалт IQR, Isolation Forest) илүүтэйгээр, Moving IQR (MIQR) алгоритм нь гажуудлыг хамгийн өндөр нарийвчлалтайгаар () илрүүлж, хуурамч эерэг алдааг (False Positive) амжилттай бууруулж чадлаа.
- Зорилтот нөхөн сэргээлт ба "Хэт зүгшрүүлэлт"-ээс сэргийлэх нь:** Туршилтын үр дүнгээс харахад бүх төрлийн тасалдлыг нэг ижил алгоритмаар шийдвэрлэх боломжгүй нь нотлогдов. Гажуудлыг устгасны дараа үүссэн богино зайн хоосон утгыг нөхөхөд ойрын хөршүүдэд өндөр жин өгдөг EWMA алгоритм () үнэмлэхүй шилдэг гүйцэтгэл үзүүлсэн. Харин системийн унтралтаас үүдэлтэй урт хугацааны дараалсан тасалдал (sequential gaps) дээр гүйдэг дундаж аргууд нь өгөгдлийг "хэт хавтгайруулах" (excessive smoothing) эрсдэлтэй байдаг тул, муруйн монотон шинж чанарыг хадгалж, хэт савлагаа үүсгэдэггүй PCHIP алгоритмыг ашиглах нь хамгийн оновчтой бөгөөд

математикийн хувьд тогтвортой шийдэл болохыг баталлаа.

3. **Хосолмол архитектурын ач холбогдол:** Зөвхөн дан ганц интерполяци ашиглахын оронд илрүүлэх ангилах зорилгот нөхөн сэргээлт хийх энэхүү шаг дараалсан пайплайн нь унаган өгөгдлийн трендийг 96%-иас дээш нарийвчлалтайгаар сэргээж байна.

Цаашид энэхүү боловсруулсан арга зүйг илүү өргөн цар хүрээнд ашиглаж, цаг уурын олон хэмжээст өгөгдөлд тулгуурлан эрчим хүчний хэрэглээг урьдчилан таамаглах нарийвчилсан төслүүдэд суурь боловсруулалтын архитектур болгон нэвтрүүлэх бүрэн боломжтой юм. Энэ нь шуугиантай, алдаатай мэдрэгчийн өгөгдлийг цэвэрлэх замаар таамаглагч загваруудын (Linear Regression, LSTM гэх мэт) эцсийн алдааг бодитоор бууруулах чухал ач холбогдолтой.

### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

Загвар хэв нь эшлэлүүдийг дөрвөлжин хаалтад оруулж дугаарлана [3]. Хаалтын ард цэг тавина [4]. Ном зүйн дугаарыг тэмдэглэхдээ [5] гэж хэрэглэх ба мөн зохиогчийн нэрийг дурдан эш татах боломжтой.

Зүүлтийн (footnote) дугаарыг тусад нь томоор тавина. Зүүлтийг хамаарах баганын доод хэсэгт байрлуулна. Хураангуй болон ном зүйд зүүлт хийхгүй. Хүснэгтийн хувьд зүүлтийг үсгээр тэмдэглэнэ.

Хэрэв зургаа болон түүнээс олон зохиогчтой бол бүх зохиогчийн нэрийг бич, гэх зэрэг (et al.) гэдэг үгийг хэрэглэж болохгүй. Хэвлэгдэж байгаагүй, хэвлүүлэхээр ирүүлсэн өгүүллээс авсан эшлэлийг “хэвлэгдээгүй” гэж тэмдэглэнэ [6]. Хэвлэгдэх зөвшөөрөлтэй өгүүллэлийг “хэвлэлтэд” гэж тэмдэглэнэ [7]. Гарчгийн зөвхөн эхний үгийг, мөн оноосон нэр болон тэмдгүүдийг томоор бичнэ.

Эшлэлийн дарааллын тухайд зохиогчийн нэрийг цагаан толгойн дарааллаар жагсаах бөгөөд эхлээд монгол хэл дээрх эшлэлээ дараа нь гадаад хэл дээрх эшлэлийг дурдах нь зүйтэй [8].

- [1] AlSalehy, A.S.; Bailey, M. Improving Time Series Data Quality: Identifying Outliers and Handling Missing Values in a Multilocation Gas and Weather Dataset. *Smart Cities* 2025, 8, 82. <https://doi.org/10.3390/smartcities8030082>
- [2] M. M. Rathore *et al.*, "Data Quality Evaluation, Outlier Detection and Missing Data Imputation Methods for IoT in Smart Cities," *ResearchGate*, 2021.
- [3] Y. Zhao *et al.*, "Data Preprocessing Techniques for Machine Learning Towards Improving Building Energy Performance: A Systematic Review," *Energies (MDPI)*, vol. 19, no. 6, p. 1561, 2026.
- [4] K. Lai *et al.*, "Revisiting Time Series Outlier Detection: Definitions and Benchmarks," in *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2021.
- [5] J. C. Martinez-Gomez *et al.*, "Missing data imputation of climate time series: A review," *PeerJ Computer Science*, 2025.
- [6] A. Gomez *et al.*, "Imputation of Missing Data in Smooth Pursuit Eye Movements Using a Self-Attention-based Deep Learning Approach," *arXiv preprint arXiv:2506.00545*, 2025. E. de Bézenac *et al.*, "Normalizing Kalman Filters for Multivariate Time Series Analysis," *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2020.
- [7] A. Trindade. "ElectricityLoadDiagrams20112014," UCI Machine Learning Repository, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24432/C58C86>.
- [8] Adarsh Pal Singh, Vivek Jain, Sachin Chaudhari, Frank Alexander Kraemer, Stefan Werner and Vishal Garg, "Machine Learning-Based Occupancy Estimation Using Multivariate Sensor Nodes," in 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2018. G. Eason, B. Noble, and I. N. Sneddon, "On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions," *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, vol. A247, pp. 529–551, April 1955. (*references*)
- [9] Hamsath Mohammed Khan, Riyas. (2021). Hourly energy demand generation and weather Electrical demand, generation by type, prices and weather in Spain. 10.13140/RG.2.2.18693.12006.

## “MISSING ALERT”: ХИЙМЭЛ ОЮУНД СУУРИЛСАН ХЯНАЛТЫН СИСТЕМ

Сүрэнжавын АЗЖАРГАЛ, Очирын ОЮУНЖАРГАЛ, Бямбадоржийн ЗОЛЗАЯА

<sup>1,2,3</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Мэдээллийн технологийн тэнхим

*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: B232270052@must.edu.mn<sup>1</sup>*

**Хураангуй:** Сүүлийн жилүүдэд хулгайн гэмт хэргийн тоо улам нэмэгдэж байна. Энэ нь хяналт хамгаалалт сул байгааг илтгэхээс гадна, зөрчил гарсан үед авч хэрэгжүүлдэг хариу үйлдэл удаан, үр дүнгүй байгааг харуулж байна. Музей, түүхэн дурсгалт газар зэрэг үнэт соёлын өв хөрөнгө хадгалдаг байгууллагууд өндөр төсөвтэй мэргэжлийн хяналтын системтэй байдаг. Харин сургууль болон хувийн байгууллагуудын хяналтын систем нь камер суурилуулснаар хязгаарлагдах бөгөөд зөрчил гарсан тохиолдолд хэдэн өдрийн бичлэгийг гараар ухаж шалгадаг тул шуурхай хариу үйлдэл авах боломжгүй байдаг. Энэ нь цаг хугацаа алдах төдийгүй санхүүгийн болон эд хөрөнгийн эрсдэлийг улам нэмэгдүүлдэг. Иймд хяналтыг сайжруулж, эрсдэлийг урьдчилан сэргийлэх хэрэгцээ шаардлага тулгарч байна. Энэхүү судалгааны зорилго нь хиймэл оюунд суурилсан лабораторийн хяналтын системийг боловсруулж, лабораторийн тоног төхөөрөмжийг зөвшөөрөлгүй алга болохоос урьдчилан сэргийлэхэд оршино. Лабораторийн объектыг илрүүлэх загварын хувьд Background subtraction болон Object detection аргуудыг харьцуулан үнэлэв. Туршилтын үр дүнгээс харахад, Background subtraction арга нь гэрлийн өөрчлөлтөд мэдрэг, тухайн объектын худал илрүүлэлтийн тоо их байсан харин YoloV8 загварын нарийвчлал (90.5%) гүйцэтгэл үзүүлж, бодит цагийн дүрс боловсруулалтад илүү үр дүнтэй илрүүлж байв. Мөн илрүүлэлтийн гүйцэтгэлийг сайжруулах зорилгоор SAHI (Slicing Aided Hyper Inference) болон SuperResolution алгоритм ESPCN (Efficient Sub-pixel Convolutional Neural Network) аргуудыг нэмэн хэрэгжүүлэв. Туршилтын үр дүнд SAHI (96.45%) болон ESPCN (94.17%) нэмэлтээр хэрэгжүүлсэн үед энгийн үеэс илүү сайн үзүүлэлттэй гарсан. Мөн лабораторийн тоног төхөөрөмжийн тоо зорилтот хэмжээнд хүрээгүй тохиолдолд систем нь хариуцагч ажилтанд мессеж, имэйл, мобайл аппликэйшнээр дамжуулан автоматаар мэдэгдэл илгээдэг. Энэхүү судалгаа нь зөвхөн сургуулийн лабораторийн орчноор хязгаарлагдахгүй, музей, хувийн байгууллага, хувь хүний үнэт эд хөрөнгө зэрэг хяналт шаардлагатай ямар ч орчинд хямд зардлаар хяналт, аюулгүй байдлыг сайжруулж, яаралтай арга хэмжээ авах боломжийг бүрдүүлэх ач холбогдолтой юм.

*Түлхүүр үг: YoloV8, Background subtraction, SAHI, Super Resolution, ESPCN, Object detection, Notification*

### 1. УДИРТГАЛ

Монгол улсад 2025 онд нийт 47480 гэмт хэрэг бүртгэгдсэн ба түүнээс хулгайн гэмт хэрэг 7017 бүртгэгдэж нийт бүртгэгдсэн гэмт хэргийн 14.8 хувийг эзэлж байгаа бол хулгайн гэмт хэргийн илрүүлэлт 35.7 хувьтай байна [1]. Иймээс эд хөрөнгийн алдагдлыг богино хугацаанд илрүүлэх автоматжсан шийдэл боловсруулах нь нийгмийн тулгамдсан асуудлын нэг болж байна. Энэхүү асуудлыг бид сургуулийн лабораторийн орчинд шийдэхийг зорьсон болно.

Орчин үеийн боловсролын байгууллагууд дахь компьютерын лабораториуд нь өндөр өртөг бүхий техник хэрэгслээр тоноглогдсон байдаг ч тэдгээрийн аюулгүй байдал болон эд хөрөнгийн бүрэн бүтэн байдлыг тогтмол хянах нь хүн хүч, цаг хугацаа шаардсан ажил хэвээр байна. Мөн лабораторийн орчинд олон хүн нэгэн зэрэг ашиглах нөхцөлд эдгээр төхөөрөмжүүдийн алдагдал, шилжилтийг гараар хянах нь хүндрэлтэй байдаг.

Иймд хүний хяналт тавих үйлдлийг орлох, алдагдаж буй объектыг олж танин, шуурхай мэдэгдэх ухаалаг системийг хөгжүүлэх нь нийгмийн

болон эдийн засгийн тулгамдсан асуудлыг шийдвэрлэх чухал алхам юм.

Орчин үеийн технологийн дэвшлийг ашиглан алдагдсан объект илрүүлэх (Missing Object Detection) чиглэлээр олон судалгааны ажил хийгдсэн бөгөөд ихэвчлэн камерын бичлэг дээр тулгуурлан хөдөлгөөн, объектын өөрчлөлтийг илрүүлэх аргуудыг ашигласан байна. Үүнд:

1. Background subtraction
2. Объект илрүүлэх загвар

Уламжлалт аргуудын нэг болох **background subtraction** нь орчны суурь дүрс болон тухайн үеийн дүрсийг харьцуулан өөрчлөлтийг илрүүлэх зарчмаар ажилладаг. Жишээлбэл, “Robust Detection of Abandoned and Removed Objects in Complex Surveillance Videos” судалгаанд энэхүү аргыг ашигласан бөгөөд бодит орчинд туршихад өдрийн нөхцөлд худал илрүүлэлт 20.8% байсан бол оройн нөхцөлд 66.7% хүртэл өссөн нь гэрэл, сүүдэр болон орчны өөрчлөлтөөс ихээхэн хамааралтай болохыг харуулсан байна [2]. Мөн [3]-д судалгаанд background modeling болон foreground segmentation аргуудыг ашиглан видео бичлэгээс хөдөлгөөнгүй удаан хугацаанд байрласан объектыг илрүүлэх арга

санал болгосон бөгөөд объектын хөдөлгөөн болон хугацааны мэдээллийг хамтад нь ашигладаг.

Харин хоёр дахь арга буюу объект таних загвар ашигладаг системүүд нь орчныг автоматаар хянаж, компьютерын харааны загварын тусламжтайгаар объектуудыг илрүүлдэг. Жишээлбэл, [4]-д судалгаанд ConvLSTM болон YOLO загварыг ашиглан шинжилж, тухайн биет хөдөлгөөнгүй удаан хугацаанд байсан эсэхийг шинжлэн биетийн байршлыг тодорхойлдог. Энэхүү шийдэл нь гэрлийн өөрчлөлт болон объектын хөдөлгөөнд зохицох чадвар сайтайгаараа давуу талтай юм. Түүнчлэн “A New Method for Real Time Abandoned Object Detection and Owner Tracking” судалгаанд объектын илрүүлэлт болон tracking алгоритмыг хослуулан ашиглаж, тухайн объектыг орхисон эзнийг дагаж хянах шийдлийг дэвшүүлсэн [5].

Эдгээр судалгаанууд нь камерын бичлэг дээр суурилсан объектын өөрчлөлт, хөдөлгөөн болон хугацааны мэдээллийг ашиглан орхигдсон эсвэл алга болсон объектыг илрүүлэх боломжтойг харуулж байна. Гэвч одоогийн байдлаар дээр дурдагдсан аргууд нь бодит амьдрал дээр хэрэгжихэд учир дутагдалтай байна. Жишээлбэл, уламжлалт background subtraction арга нь объектын хэмжээнээс хамааран хол байгаа жижиг объектуудыг танилт хийхдээ арийн дэвсгэрээс ялгахгүй байх тохиолдол их гардаг. Харин объект илрүүлэх загварт суурилсан судалгаануудын ихэнх нь орхигдсон объект (abandoned object)-ыг илрүүлэхэд төвлөрсөн байдаг бөгөөд алга болсон объектыг (missing object) тодорхойлох асуудлыг хангалттай авч үзээгүй байна.

Иймээс тодорхой орчинд байх ёстой объектын тоо, байршлыг хянаж алдагдлыг илрүүлэх системийг объект илрүүлэх загварыг ашиглан лабораторийн орчинд хэрэгжүүлэхийг зорив.

## II. АШИГЛАСАН АРГА

Энэхүү систем нь таван үндсэн үе шаттайгаар ажилладаг бөгөөд эдгээрийг дараах байдлаар тодорхойлж болно.

1. Камерын дүрс унших
2. Тоног төхөөрөмжийн зорилтот тоо хэмжээг тохируулах
3. Зорилтот тоо хэмжээнээс дутсан эсэхийг шалгах
4. Тоног төхөөрөмж алга болсны дараах үеийн зургийг баримтжуулан хадгалах
5. Хариуцагч ажилтанд мэдэгдэл илгээх



1-р зураг. Системийн боловсруулалт хийх дараалал

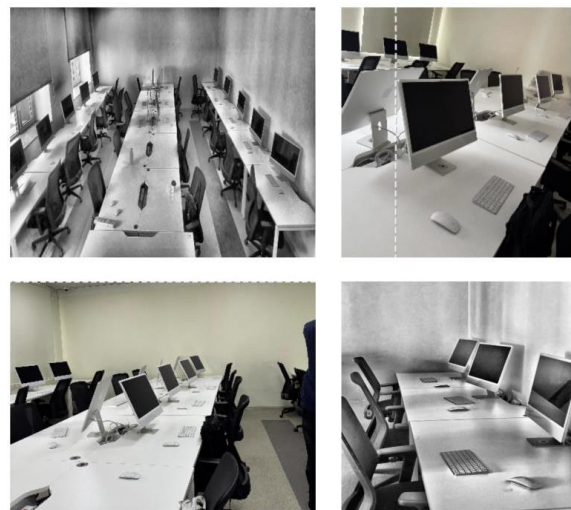
### A. Өгөгдлийн багц

Бид судалгааны ажилдаа дараах өгөгдлийн багцуудыг бэлтгэж ашигласан болно. Үүнд:

#### 1. Сургалтын өгөгдлийн багц

Лабораторийн орчинд бид 515 зураг бүхий өгөгдлийг бэлтгэсэн бөгөөд эдгээр нь компьютер, хулгана, гар зэрэг объектоос бүрдэнэ. Доорх өгөгдлийн баяжуулалтын аргуудыг ашигласны үр дүнд нийт зурагны тоо 1245 болж нэмэгдсэн.

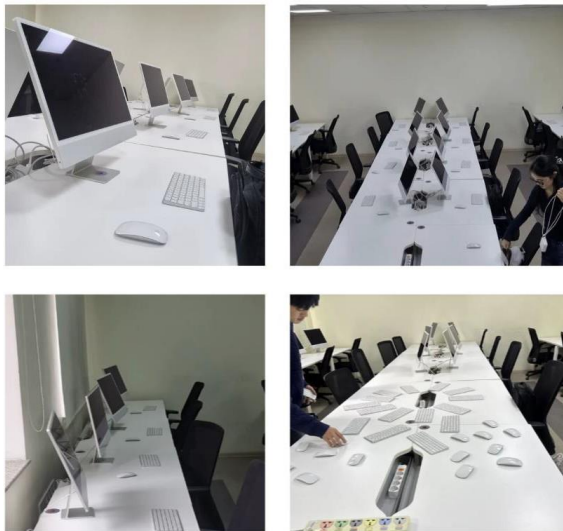
- ✓ Бүдгэрүүлэх
- ✓ Саарал болгох
- ✓ Шуугиан нэмэх
- ✓ Эргүүлэх
- ✓ Тайрах



2-р зураг. Сургалтын өгөгдлийн багц

#### 2. Тестийн өгөгдлийн багц

Компьютер, хулгана, гар зэрэг объектоос бүрдсэн 100 зурган өгөгдөл юм.



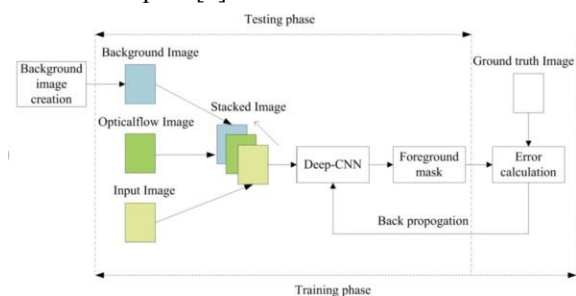
3-р зураг. Тестийн өгөгдлийн багц

### В. Тоног төхөөрөмж илрүүлэх

Бид судалгаандаа дараах алга болсон объект илрүүлэлтийн загварыг харьцуулан судалсан.

#### 1. Background Subtraction

Background Subtraction нь видео фрэймийн дарааллаас хөдөлж буй объектыг ялган авах (foreground segmentation) арга юм. Энэ арга нь background буюу суурь хөдөлгөөнгүй орчныг тогтоож, оролтын шинэ фрэймээс хөдөлж буй хэсгийг илрүүлэх зарчмаар ажилладаг. Хэрэв хоёр зургийн пикселийн зөрүү тодорхой хэмжээнээс (threshold) их байвал тэр хэсгийг хөдөлж буй объект гэж үзнэ [6].

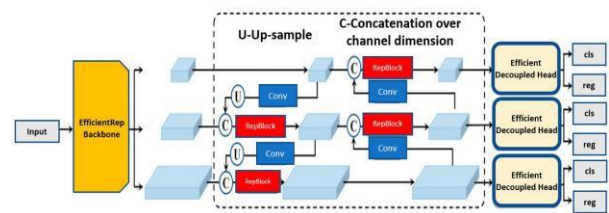


4-р зураг. Background Subtraction архитектур

#### 2. YOLOv8

YOLOv8 нь Ultralytics-аас гаргасан хамгийн түгээмэл хэрэглэгдэж буй YOLO загвар бөгөөд anchor-free илрүүлэлтийн аргачлалтай. YOLO нь ганцхан үе шаттай (single-shot) алгоритм бөгөөд зөвхөн нэг мэдрэлийн сүлжээг ашиглан оролтын зургийг бүхэлд нь боловсруулж объектыг таньдаг тул бодит цагийн объект илрүүлэлт хийхэд тохиромжтой. Мөн feature extraction-ийн шинэ C2f module, илүү үр ашигтай loss function болох TaskAlignedAssigner, мөн multi-scale training

аргуудыг ашиглан илрүүлэлтийн хурд, нарийвчлал хоёуланг нь сайжруулсан [7].



5-р зураг. YOLOv8 архитектур

### С. Нэмэлт сайжруулалт

#### 1. SAHI (Slicing Aid Hyper Inference)

SAHI нь өндөр нягтралтай зураг дээрх жижиг биетүүдийг илрүүлэх зориулалттай нээлттэй эхийн сан юм. Ердийн алгоритмууд том зураг дээрх жижиг объектуудыг орхих тохиолдол их байдаг бол SAHI нь зургийг жижиг хэсгүүдэд хуваан боловсруулснаар энэ асуудлыг шийддэг [8].

SAHI нь дараах 3 үндсэн алхмаар ажиллана.

- Хуваах: Эх зургийг тодорхой хэмжээтэй, хоорондоо бага зэрэг давхцалтай (overlap) жижиг хэсгүүдэд хуваана.
- Таамаглах: Хуваасан хэсэг бүр дээр сонгосон загвараа (YOLO, Detectron2) ашиглан объект илрүүлэлтийг гүйцэтгэнэ.
- Нэгтгэх: Бүх жижиг хэсгүүдээс гарсан үр дүнгүүдийг буцааж нэгтгэн, давхардсан илрүүлэлтүүдийг NMS (Non-Maximum Suppression) ашиглан цэгцэлнэ.



6-р зураг. Slicing Aid Hyper Inference

#### 2. ESPCN (Efficient Sub-pixel Convolutional Neural Network)

ESPCN нь бага нягтралтай зургийг өндөр нягтралтай зураг болгон хувиргахдаа тооцооллын ачааллыг эрс багасгаж, хурдыг нэмэгдүүлсэн гүн сургалтын загвар юм. SRCNN зэрэг загварууд зургийг сүлжээнд оруулахаас өмнө хэмжээг нь томруулдаг байсан бол ESPCN нь дараах аргыг ашигладаг [9].

- Low-Resolution Feature Extraction: Зургийг эхлээд бага нягтралтай хэлбэрээр нь convolution-оор боловсруулж онцлог шинжүүдийг гаргаж авна.
- Sub-Pixel Convolution Layer: Давхаргын хамгийн төгсгөлд олон тооны бага

нягтралтай зургийг нэгтгэн, пикселүүдийг нь дахин байршуулах замаар өндөр нягтралтай зургийг үүсгэдэг.

**D. Алга болсон объект илрүүлэх ба мэдэгдэл илгээх**

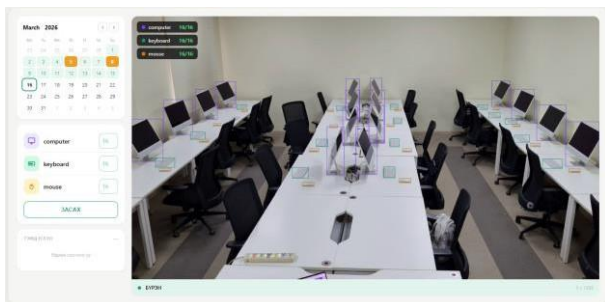
Системийн үйл ажиллагаа нь дараах гурван үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгээс бүрдэнэ. Үүнд 1) Хүн илрүүлэх арга 2) Систем интерфейс 3) Мэдэгдэл илгээх

**1. Хүн илрүүлэх**

Лабораторийн орчин нь байнгын хөл хөдөлгөөнтэй байдаг учраас тухайн үеүдэд объектын илрүүлэлт хийж тоолох нь тохиромжгүй байсан. Иймээс систем нь 2 төлөвт байдлаар ажиллах буюу хүн илэрч байхад missing object detection унтраалттай байх ба тодорхой хугацаанд хүн илрээгүй бол missing object detection ажиллана гэсэн төлөвтэй байна. Тухайн орчинд хүн байгаа эсэхийг танихдаа YoloV8 person классыг ашиглан илрүүлнэ.

**2. Систем интерфейс**

Объектын илрүүлэлтийг хийж тоолж эхлэхээс өмнө лаборант тухайн тоног төхөөрөмжийн анхны тоон утгыг системд оруулж өгнө.



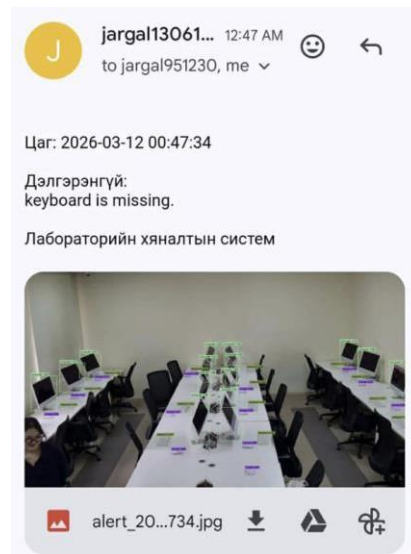
7-р зураг. Системийн анхны утга тохируулах интерфэйс

**3. Мэдэгдэл илгээх**

Мэдэгдэл илгээхдээ объектын тоо анхны тоон утганаас дутсан үед систем нь нэг удаа илгээнэ. Мэдэгдэл илгээсний дараа давтан илгээхгүй ба анхны утгыг сүүлийн төлөвийн утгаар шинэчлэн дахин объект алга болсон тохиолдолд мэдэгдэл илгээнэ. Ингэхдээ доорх гурван аргаар илгээж болно.

**a. E-Mail**

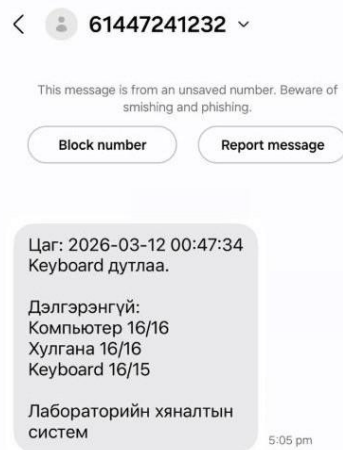
Тухайн үеийн дүрс болон огноо, цагийн мэдээлэл, анхааруулах зурвас бүхий мэйл хариуцсан ажилтанд илгээгдэнэ.



8-р зураг. Имэйлээр мэдэгдэл илгээх арга

**b. Мессеж**

Энэхүү арга нь аюул илэрсэн үед автоматаар ClickSend API-г ашиглан бүртгэлтэй гар утас руу SMS мэдэгдэл илгээдэг. Энэхүү API нь cloud-based SMS үйлчилгээ бөгөөд HTTP хүсэлтээр дамжуулан илгээх боломжтой тул найдвартай, шуурхай ажиллагаатай. Уг арга нь тухайн хариуцсан ажилтан интернэтэд холбогдоогүй үед ч ирдгээрээ давуу талтай ба анхааруулах зурвас, огноо, цагийн мэдээлэл бүхий мессеж илгээгдэнэ [10].

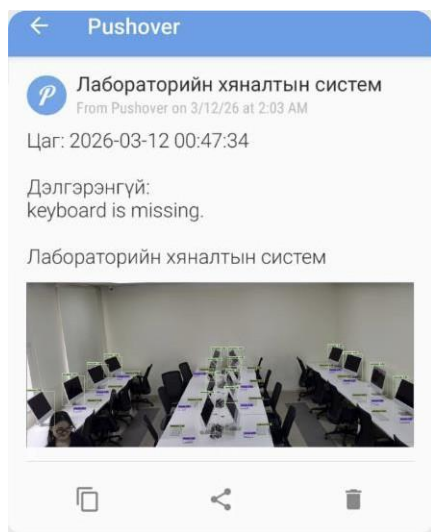


9-р зураг. Мессежээр мэдэгдэл илгээх арга

**c. Application**

Мөн хариуцсан ажилтанд гар утасны аппликейшнээр SOS дохио илгээдэг. Энэхүү мэдэгдэл нь яаралтай нөхцөлд зориулсан бөгөөд гар утсанд чанга дуу гаргаж, богино хугацаанд чичирхийлснээр ажилтны анхаарлыг татдаг. Ингэхдээ Pushover API-г ашиглан систем нь серверээс хэрэглэгчийн token болон user key-г дамжуулж мэдэгдэл илгээдэг. Илгээгдсэн мэдэгдэл

нь хэрэглэгчийн төхөөрөмж дээр real-time push notification хэлбэрээр гарч ирдэг [11].



10-р зураг. Application-р мэдэгдэл илгээх арга

### III. ТЛИШРУТ, ҮР ДҮН

#### 1. Тоног төхөөрөмж таних загвар

##### а. Аргуудын харьцуулалт

Системийн эхний шатанд бид лабораторын орчин дахь объектуудыг (хулгана, гар, компьютер) илрүүлэх зорилготой ба ингэхдээ 2 аргыг туршсан. Үүнд background subtraction болон объект таних YOLOv8 загвар орно.

Эхний background subtraction аргыг ашиглан фрэйм хоорондын өөрчлөлтийг ялгаж гаргасан үр дүнд энэхүү арга нь объектын байрлал өөрчлөгдөх үед илрүүлэх боломжтой байсан боловч гэрлийн өөрчлөлт, сүүдэр болон орчны хөдөлгөөнөөс шалтгаалан худал илрүүлэлт их гарсан. Туршилтыг лабораторийн орчинд оюутан хулгана болон гар авч гарч буй бичлэг дээр хийсэн. Зураг 12-д буруу илрүүлсэн объектыг цэнхэр өнгөөр зөв илрүүлэлтийг ногоон өнгөөр тэмдэглэсэн.



11-р зураг. Объект алга болохоос өмнө

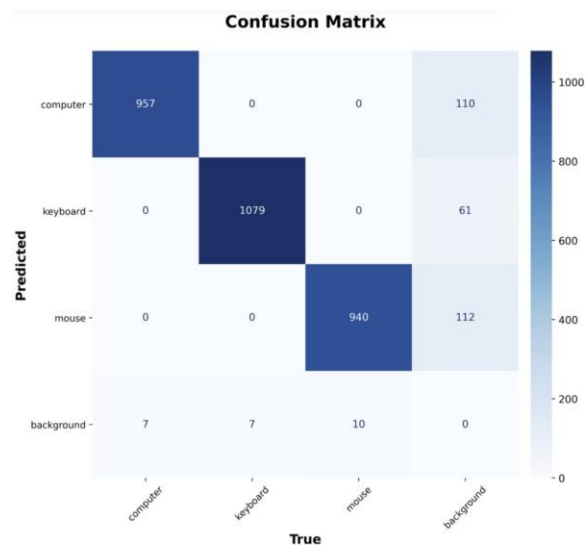


12-р зураг. Объект алга болсны дараа

Иймээс энэ арга нь лабораторийн бодит орчинд тогтвортой ажиллахад хангалтгүй байсан гэж үзсэн тул дараагийн арга болох объект таних аргыг туршсан.

Объект таних аргыг ашиглахдаа сургалтын өгөгдлийн 1245 зураг бүхий багцыг ашиглан YOLOv8 загварыг fine-tune хийсэн ба үүний үр дүнд тестийн дундаж нарийвчлал (90.5%) байв. Тоног төхөөрөмж тус бүр дээр компьютер (89.1%), гар (94.07%), хулгана (88.5%). Жижиг объект буюу хулгана дээр таних танилт хангалтгүй байв.

$$\text{Нарийвчлал} = \frac{\text{Нийт зөв таамагласан тохиолдол}}{\text{Нийт таамагласан тохиолдол}}$$



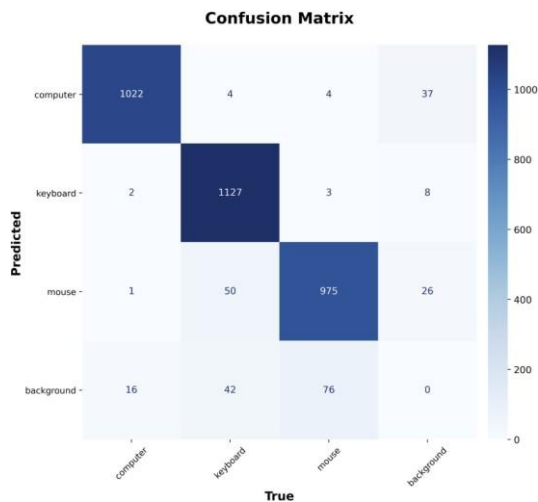
13-р зураг. 1245 өгөгдөл бүхий загварын төөрөгдлийн матриц

##### б. Нэмэлт сайжруулалт

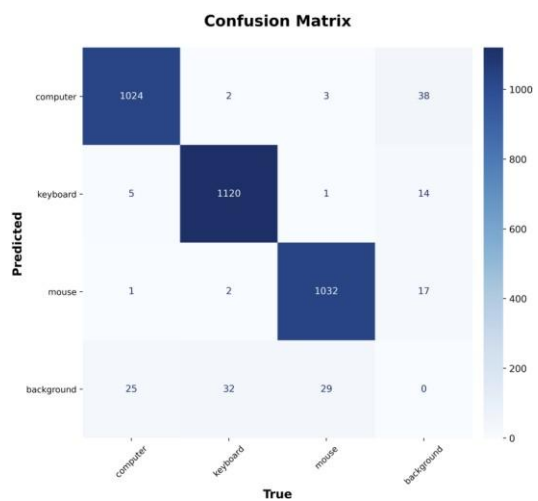
Дээрх сургасан объект таних YOLOv8 загварыг лабораторийн бичлэг дээр туршихад хол байрласан жижиг объектуудын танилт хангалтгүй байна гэж дүгнэсэн ба энэхүү танилтыг сайжруулах зорилгоор SAHI (Sliced Aided Hyper Inference) болон гэсэн ESPCN (Efficient Sub-pixel Convolutional Neural Network) хоёр аргыг туршсан.

##### 1. SAHI (Slicing Aid Hyper Inference) харьцуулалт

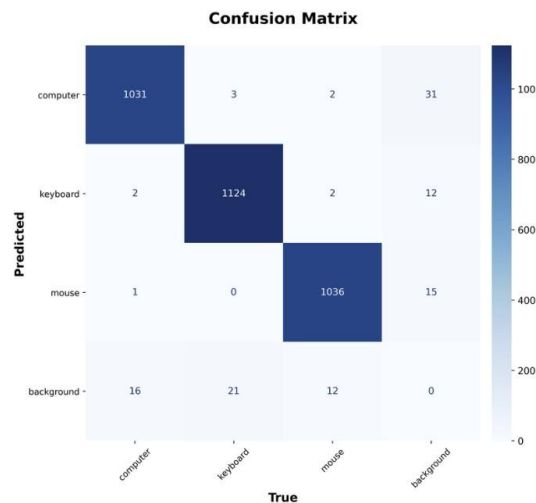
Зургийн хэмжээ	320X320	640X640	720X720
Нарийвчлал	92.07%	94.94%	96.49%



14-р зураг. Зургийн хэмжээ: (320X320) төөрөгдлийн матриц



15-р зураг. Зургийн хэмжээ: (640X640) төөрөгдлийн матриц

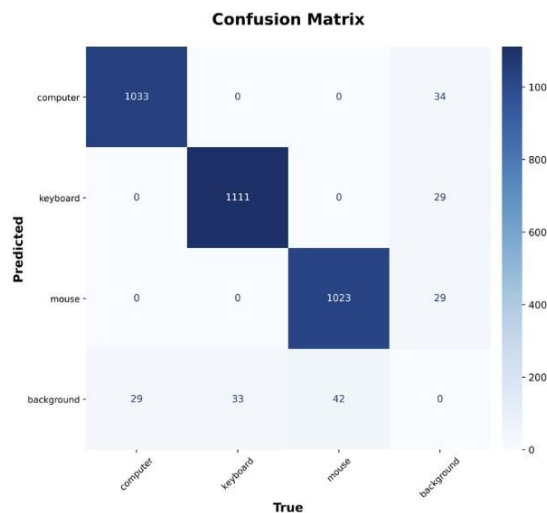


16-р зураг. Зургийн хэмжээ: (720X720) төөрөгдлийн матриц

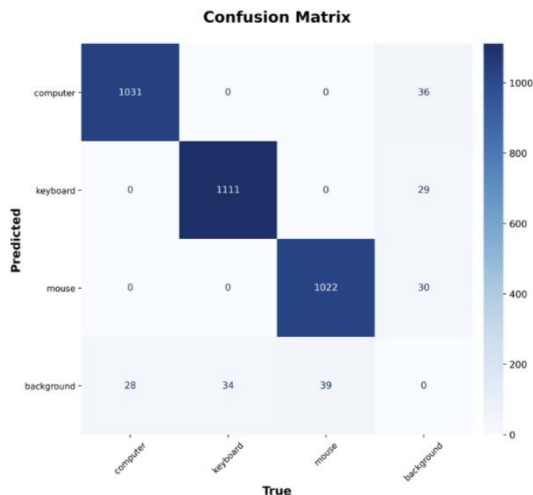
SAH1 ашиглан хийсэн туршилтын үр дүн нь зургийн хэмжээнээс хамааран 320X320 үед (92.07%), 640X640 үед (94.94%), 720X720 үед (96.49%) нарийвчлалтай болсон байна. Хулганы нарийвчлал 97.09% болж сайжрав.

2. ESPCN (Efficient Sub-pixel Convolutional Neural Network) харьцуулалт

Зургийн хэмжээ	2 дахин	4 дахин
Нарийвчлал	94.17%	94.16%



17-р зураг. Зургийн хэмжээ : 2560X2560 (ESPCN\_X2) төөрөгдлийн матриц



18-р зураг. Зургийн хэмжээ : 5120X5120 (ESPCN\_X4) төөрөгдлийн матриц

Super resolution ашиглан хийсэн туршилтын үр дүнд зургийн хэмжээг 2 дахин ихэсгэсэн буюу 2560X2560 хэмжээтэй үед туршилтын нарийвчлал 94.17%, 4 дахин ихэсгэсэн буюу 5120X5120 хэмжээтэй үед туршилтын нарийвчлал 94.16% болсон байна.

Арга	SAHI (720X720)	ESPCN_X2
Хулгана	97.09%	93.67%
Гар	96.89%	94.63%
Компьютер	95.37%	94.15%
Дундаж	96.45%	94.17%

Эдгээр нэмэлт сайжруулалтын үр дүнг нэгтгэн дүгнэж үзэхэд, бичлэгийн танилтыг хамгийн их сайжруулсан арга нь 720x720 хэмжээтэй SAHI арга байсан тул бид уг аргыг сонгон хэрэгжүүлэв.

**ДҮГНЭЛТ**

Энэхүү судалгааны ажлаар хиймэл оюунд суурилсан лабораторийн хяналтын системийг боловсруулж, лабораторийн тоног төхөөрөмжийг зөвшөөрөлгүй алга болохоос урьдчилан сэргийлэх системийн шийдлийг санал болголоо.

Судалгаанд объект илрүүлэлтийн загвар, жижиг объектын илрүүлэлтийг сайжруулах аргуудыг харьцуулан хамгийн оновчтой загварыг сонгов.

Тоног төхөөрөмж таних алхмын хувьд Background substraction, объект таних загвар гэх үндсэн 2 аргыг ашиглан туршилт хийж харьцуулсны үндсэн дээр объект таних (Yolov8) загвар нь лабораторийн орчны

100 зурган өгөгдөл туршиход 90.5% нарийвчлалтайгаар гэрлийн өөрчлөлт болон хөдөлгөөний өөрчлөлтөд илүү тогтвортой үр дүн үзүүлсэн байна.

**Гүйцэтгэлийг сайжруулах аргуудын үр дүн:**

Сайжруулалтын SAHI болон ESPCN аргын хувьд хоёулаа загварын гүйцэтгэлийг 5.84%, 3.52% - иар сайжруулж байна. Үүнээс сайжруулсан аргуудаа харьцуулахад эхний буюу жижиг хэсгүүдэд хувааж танилт хийх аргын (SAHI) нарийвчлал илүү байсан.

Мэдэгдлийг зөвхөн нэг аргаар буюу мессежээр илгээх уян хатан байдлыг бууруулж байсан ба нэмэлтээр email хаяг болон мобайл аппликэйшн ашиглан илгээх нь мэдэгдлийг анзаарахгүй өнгөрөх эрсдэлийг бууруулж, найдвартай байдлыг нэмэгдүүлсэн.

Судалгааны үр дүнгээс харахад YoloV8 загвар нь гэрлийн өөрчлөлт болон объектын хөдөлгөөнд илүү тогтвортой илрүүлэлт хийж байсан хэдий ч жижиг объект дээр илрүүлэлт хийх чадвар сул байсан. Иймээс нэмэлт сайжруулалт аргуудыг ашигласнаар загварыг гүйцэтгэлийг сайжруулж үр дүнтэй ажиллах боломжтойг харуулсан.

Судалгаанд сургуулийн лабораторийн өрөөг туршилтын орчин болгон сонгож, объект илрүүлэлтэд суурилсан хяналтын системийн аргачлалыг хэрэгжүүлсэн.

Уг систем нь зөвхөн лабораториос гадна музей, үнэт эдлэлийн дэлгүүр зэрэг хяналт шаардлагатай ямар ч орчинд ашиглах боломжтой бөгөөд байгууллага, хувь хүний эд хөрөнгийн технологийн шийдэл юм.

**АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ**

- [1] Ц. Е. Г. У. с. хэлтэс, 6 2 2026. [Холбогдсон]. Available:<https://www.facebook.com/MongolianCrimePrevention/posts/1328049082693748/>. [Нэвтэрсэн 15 3 2026].
- [2] YingLi Tian, Rogerio Feris, Haowei Liu, Arun Humpapur, Ming-Ting Sun, “Robust Detection of Abandoned and Removed Objects in Complex Surveillance Videos,” 2010.
- [3] Elena Luna, Juan Carlos San Miguel, Diego Ortego, José María Martínez, “Abandoned Object Detection in Video-Surveillance,” 2018.
- [4] A. M. Qasim, “Abandoned Object Detection and Classification using Deep Embedded Vision,” 2024.
- [5] Silvia Ferrando, Gianluca Gera, Massimo Massa, Carlo Regazzoni, “A New Method for Real Time

- Abandoned Object Detection and Owner Tracking”.
- [6] “Background Subtraction in an Image using Concept of Running Average,” geeksforgeeks, 11 8 2025. [Холбогдсон]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/python/background-subtraction-in-an-image-using-concept-of-running-average/>. [Нэвтэрсэн 16 1 2026].
- [7] F. Jacob Solawetz, “What is YOLOv8? A Complete Guide,” Roboflow, 23 10 2024. [Холбогдсон]. Available: <https://blog.roboflow.com/what-is-yolov8/>. [Нэвтэрсэн 26 1 2026].
- [8] J. Gallagher, “<https://blog.roboflow.com/how-to-use-sahi-to-detect-small-objects/>,” Roboflow, 31 8 2023. [Холбогдсон]. Available: <https://blog.roboflow.com/how-to-use-sahi-to-detect-small-objects/>. [Нэвтэрсэн 5 2 2026].
- [9] Z. Cen, “An Overview of ESPCN: An Efficient Sub-pixel Convolutional Neural Network,” Medium, 17 4 2020. [Холбогдсон]. Available: <https://medium.com/@zhuocen93/an-overview-of-espncn-an-efficient-sub-pixel-convolutional-neural-network-b76d0a6c875e>. [Нэвтэрсэн 6 2 2026].
- [10] “The business SMS service for expanding companies,” ClickSend, [Холбогдсон]. Available: <https://www.clicksend.com/en/sms/>. [Нэвтэрсэн 20 2 2026].
- [11] “Push a Notification,” Pushover, [Холбогдсон]. Available: <https://pushover.net/>.

# РАДАРЫН ХӨНДЛӨН ОГТЛОЛЫН КОЭФФИЦИЕНТЫГ БУУРУУЛАХ МЕТА-ГАДАРГУУГИЙН ЗАГВАРЧЛАЛ

Дашбаатарын АНУДАРЬ<sup>1</sup>, Баттулгын УНДАРМАА<sup>1</sup>, Дашгянцаны САНЖСҮРЭН<sup>1</sup>,  
Баярсайханы ПҮРЭВЦЭРЭН<sup>1</sup>, Пүрэвдоржийн УУГАНБАЯР<sup>1а</sup>

<sup>1</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл холбооны технологийн сургууль, Холбооны инженерчлэлийн  
ТЭНХИМ

*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: anudaridashbaatar@gmail.com<sup>1</sup>*

**Хураангуй**— Энэхүү судалгаанд радарын хөндлөн огтлолын коэффициентийг (Radar Cross Section, RCS) бууруулах зорилгоор мета-гадаргуугийн нэгж элементийн загварчлал болон цахилгаан соронзон симуляцийн судалгааг гүйцэтгэлээ. Мета-гадаргуу нь цахилгаан соронзон долгионы фаз болон тархалтыг удирдах боломжтой хиймэл бүтэц бөгөөд долгионыг шингээх болон сарниулах механизмуудаар дамжуулан буцах чиглэл дэх энергийн хэмжээг бууруулах боломжийг бүрдүүлдэг. Судалгаанд шингээх болон сарниулах шинж чанартай хоёр төрлийн нэгж элементийн геометр загварыг боловсруулж, тэдгээрийн ойлтын коэффициент болон фазын шилжилтийг CST Studio Suite программ ашиглан тодорхойлсон.

Симуляцийн үр дүнгээс харахад шингээх нэгж элемент нь 6 GHz орчимд фазын шилжилт 175° болж, долгионы энергийн ихэнх хэсгийг бүтэц дотор шингээж байгааг харуулсан. Харин сарниулах нэгж элемент нь 11.6 GHz давтамжид фазын шилжилт 73.43° болж, долгионыг олон чиглэлд тараан сарниулах нөхцөлийг бүрдүүлж байгааг тогтоосон. Эдгээр механизмын нөлөөгөөр радар руу буцах дохионы энерги мэдэгдэхүйц буурч, улмаар RCS багасах боломжтой болохыг харуулж байна.

**Түлхүүр үг**— нэгж элемент, direction of arrival, фазын шилжилт, долгион сарнил, долгион шингээлт

## I. УДИРТГАЛ

Радарын системүүд нь объект илрүүлэх, байршил тогтоох, тандалт хийх зэрэг олон төрлийн хэрэглээнд өргөн ашиглагддаг. Радарын илрүүлэлтийн үр ашиг нь радарын хөндлөн огтлолын коэффициентоос ихээхэн хамаарадаг бөгөөд энэ нь объект дээр ойлсон цахилгаан соронзон долгион радарын хүлээн авагч руу буцах хэмжээг тодорхойлдог. Иймээс радарын хөндлөн огтлолын коэффициентийг бууруулах нь радарын илрүүлэлтийг багасгах чухал арга юм. Уламжлалт аргуудад долгион шингээх материал болон объектын геометр хэлбэрийг өөрчлөх зэрэг аргачлалууд ашиглагддаг боловч эдгээр нь их жинтэй, өндөр өртөгтэй, мөн нарийн давтамжийн зурваст ажиллах зэрэг хязгаарлалтуудтай байдаг.

Сүүлийн жилүүдэд цахилгаан соронзон долгионы тархалтыг удирдах боломжтой мета-гадаргуу технологи эрчимтэй хөгжиж байна. Энэхүү судалгаанд мета-гадаргуугийн нэгж элементийн геометр загварыг боловсруулж, түүний цахилгаан соронзон шинж чанарыг симуляцийн аргаар судлан радарын хөндлөн огтлолын коэффициентийг бууруулах боломжийг үнэлсэн.

## II. МЕТА-ГАДАРГУУГИЙН ОНОЛ БА ҮНДСЭН ОЙЛГОЛТУУД

### A. Мета-гадаргуугийн бүтэц ажиллах зарчим

Мета-гадаргуу нь цахилгаан соронзон долгионы фаз, далайц болон тархалтын чиглэлийг удирдах боломжтой сөрөг индекстэй материал юм. Энэ гадаргуу нь долгионы уртаас бага хэмжээтэй

давтагдсан нэгж элементүүдээс бүрдэнэ. Нэгж элементүүдийн геометр хэлбэр, хэмжээ болон материалын параметрууд нь мета-гадаргуугийн цахилгаан соронзон долгионтой хэрхэн харилцан үйлчлэлж байгааг тодорхойлдог.

Цахилгаан соронзон долгион мета-гадаргуу дээр тусах үед гадаргуу дээр байрлах нэгж элементүүдэд индукцийн гүйдэл үүсч, улмаар тодорхой тусгалын фазын шилжилт үүсдэг [1]. Энэ үзэгдэл нь мета-гадаргуугийн болон орчны импедансын харилцан үйлчлэлээр тодорхойлогддог. Ойлтын шинж чанарыг дараах ойлтын коэффициентээр илэрхийлж болно.

$$\Gamma = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \quad (1)$$

энд  $Z_s$  нь мета-гадаргуугийн импеданс,  $Z_0$  нь чөлөөт орчны импеданс юм [1],[4].

Мета-гадаргуугийн гадаргуу дээр фазын шилжилтийг тодорхой байдлаар зохион байгуулснаар фазын градиент үүсдэг. Энэ үед ойлсон долгионы тархалтын чиглэл дараах Generalized Snell's Law хуулиар тодорхойлогдоно.

$$\sin(\theta_r) - \sin(\theta_i) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\phi}{dx} \quad (2)$$

Энд  $\theta_r$  нь тусах долгионы өнцөг,  $\theta_i$  нь ойлсон долгионы өнцөг, харин  $\frac{d\phi}{dx}$  нь гадаргуугийн фазын градиент юм. Ийм фазын шилжилтийн нөлөөгөөр ойлсон долгион нэг чиглэлд төвлөрөн буцахын оронд олон чиглэлд таран сарнидаг [5],[6].

Мета-гадаргуугийн шингээлтийн шинж чанарыг тодорхойлохдоо ойлтын болон дамжууллын коэффициентүүдийг ашиглан дараах байдлаар илэрхийлнэ.

$$A(\omega_0) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (3)$$

Энд  $S_{11}$  нь ойлтын коэффициент,  $S_{21}$  нь дамжуулалтын коэффициентийг илэрхийлнэ. Судалгаанд ашигласан бүтэц нь доод талдаа тасралтгүй металл давхаргатай тул долгионы дамжуулалт бараг байхгүй ( $S_{21} \approx 0$ ) гэж үзэж болно [11]. Иймээс шингээлтийн илэрхийлэл дараах байдлаар хялбарчлагдана.

$$A(\omega_0) = 1 - |S_{11}|^2 \quad (4)$$

Төгс шингээлт үүсэх үндсэн нөхцөл нь мета-гадаргуугийн харьцангуй импедансыг агаарын импеданстай ( $Z_0 \approx 377\Omega$ ) тааруулах (impedance matching) явдал юм. Импеданс тааруулалт хийгдсэнээр  $|S_{11}|$  хамгийн бага утгадаа хүрч, шингээлт дээд хэмжээндээ буюу 90-99%-д хүрэх боломжтой болдог [9], [11].

Радарын системд объектын илрүүлэлт нь буцах чиглэлд сарнисан долгионы энергиэ шууд хамаардаг. Иймээс мета-гадаргуугийн фазын шилжилтийг удирдсанаар долгионыг олон чиглэлд ойлгож сарниулах замаар радарын хүлээн авах систем рүү очих долгионы хэмжээг багасгах боломжтой бөгөөд үүний үр дүнд радарын хөндлөн огтлолын коэффициент буурах нөхцөл бүрддэг.

### B. Direction of Arrival

Direction of Arrival (DoA) нь хүлээн авагч системд ирж буй цахилгаан соронзон долгионы ирэх чиглэлийг тодорхойлох арга юм. Энэ арга нь радар, утасгүй холбоо, дохио боловсруулах, навигац болон объект илрүүлэх системүүдэд өргөн хэрэглэгддэг. DoA тодорхойлох үндсэн зорилго нь хүлээн авсан дохионы фазын шилжилт, хугацааны зөрүү эсвэл амплитудын өөрчлөлтийг ашиглан долгионы ирэх өнцгийг тооцоолох явдал юм [7].

Уламжлалт DoA тодорхойлох аргууд нь ихэвчлэн антены массив систем дээр суурилдаг. Ийм системд олон антен ашиглан ирж буй долгионы фазын шилжилтийг хэмжих замаар долгионы тархалтын чиглэлийг тодорхойлдог. Хэрэв хоёр антен хоорондын зай  $d$ , долгионы урт  $\lambda$ , ирж буй долгионы ирэх өнцөг  $\theta$  бол хоёр антенд үүсэх фазын зөрүү дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad (5)$$

Энэ хамаарлыг ашиглан ирж буй долгионы чиглэлийг тодорхойлох боломжтой. Хэрэв антены массив дахь элементүүдийн хоорондын фазын шилжилтийг хэмжвэл долгионы ирэх өнцгийг тооцоолох боломж бүрдэнэ [7],[8].

Сүүлийн жилүүдэд мета-гадаргууг ашиглан DoA тодорхойлох шинэ аргууд хөгжиж байна. Мета-гадаргуу нь цахилгаан соронзон долгионы фаз болон тархалтыг удирдах боломжтой тул ирж буй долгионы чиглэлийг тодорхойлох шинэ төрлийн пассив системүүдийг хэрэгжүүлэх боломжийг олгодог. Ийм аргаар мета-гадаргуугийн элементүүдийн фазын шилжилтийг ашиглан ирж буй долгионы тархалтын чиглэлийг тодорхойлох боломжтой [8].

### III. МЕТА-ГАДАРГУУГИЙН НЭГЖ ЭЛЕМЕНТИЙН ЗАГВАРЧЛАЛ

Долгионыг шингээх болон сарниулах мета-гадаргуугийн бүтэц нь нэгж элементүүдээс бүрдэх бөгөөд геометр бүтэц, материал болон хэмжээсүүдийг Зураг 2-т үзүүлэв. Нэгж элемент нь цахилгаан соронзон долгионтой харилцан үйлчлэлцэхдээ эквивалент RLC хэлхээ мэт ажилладаг бөгөөд түүний геометр нь цахилгаан болон соронзон резонанс үүсгэх нөхцөлийг тодорхойлдог. Ийм төрлийн бүтэцэд металл замууд нь индукц (L), металл элементүүдийн хоорондох завсрууд нь багтаамж (C), материалын алдагдал нь эсэргүүцэл (R)-ийг тодорхойлдог. Нэгж элементийн хэмжээ нь ажиллах давтамжийн долгионы уртаас шууд хамаарах бөгөөд долгионы уртаас бага байх ихэвчлэн  $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10}$  орчим байдаг [2],[3]. Ийм хэмжээ нь мета-гадаргууг долгионы фазын тархалтыг үр дүнтэй удирдах нөхцөлийг хангадаг [3].

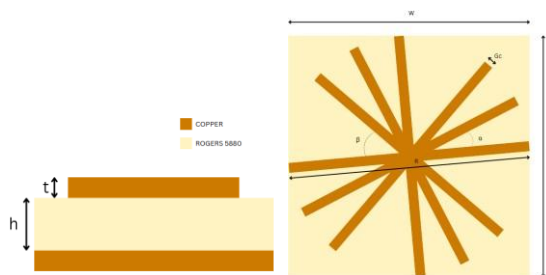
Нэгж элемент нь металл резонатор, диэлектрик субстрат болон металл гэсэн гурван давхаргат бүтэцтэй.

Дээд болон доод талын металл давхаргууд нь өндөр дамжуулах чадвартай ( $\sigma=5.8 \times 10^7$  S/m) зэс (Copper) материалаар хийгдсэн [9],[10] ба металл давхаргын зузаан  $t = 0.05$  мм байна. Шингээх элементийн хувьд диэлектрик субстратын материалаар Rogers RO4003C материалыг ашигласан бөгөөд уг материал нь бичил долгионы мужид бага алдагдалтай ( $\tan\delta=0.0027$ ), тогтвортой диэлектрик шинж чанартай ( $\epsilon_r=3.55$ ) тул өндөр давтамжийн төхөөрөмжүүдэд өргөн хэрэглэгддэг [9].

Харин сарниулах элементийн субстратын материалаар Rogers 5880 материалыг сонгосон нь  $\epsilon_r=2.2$  гэсэн диэлектрик тогтмолтой бөгөөд  $\tan\delta=0.0009$  гэсэн маш бага алдагдлын тангенстай

материал юм. Өмнө дурдсан Rogers RO4003C материалтай харьцуулахад Rogers 5880 нь илүү бага диэлектрик тогтмолтой тул ижил хэмжээтэй нэгж элементийн хувьд резонансын давтамж нь харьцангуй өндөр гардаг [10].

Нэгж элементийн нийт хэмжээ  $W = L = 12$  мм. Металл резонатор нь цагираг болон хуваагдсан сектор хэлбэрийн геометртэй бөгөөд энэ бүтэц нь цахилгаан болон соронзон резонанс үүсгэх нөхцөлийг бүрдүүлдэг. Геометрийн параметруудийг Хүснэгт 1-д нэгтгэн үзүүлсэн.



Зураг. 1 Ойлгогч мета-гадаргуугийн нэгж элементийн бүтэц, материал ба геометрийн параметрууд.

Сарниулах нэгж элементийн геометрийг төвдөө тэгш хэмтэй бүтэц бүхий олон салаа бүтэцтэйгээр сонгосон нь долгионы фазын шилжилтийг удирдах зорилготой. Энэхүү хэлбэр нь олон төрлийн гүйдлийн урсгалын зам үүсгэж, өөр өөр фазын шилжилт бий болгох боломжийг олгодог.

Салаануудын урт, өнцөг болон байрлал нь эквивалент индукц болон багтаамжийг өөрчилж, фазын шилжилтийн утгыг нарийн тохируулах нөхцөлийг бүрдүүлдэг. Үүний үр дүнд гадаргуу дээр фазын шилжилт үүсч, ойлтын долгион нэг чиглэлд төвлөрөхгүй, харин олон чиглэлд тарж сарнидаг.



Зураг. 2 Шингээгч мета-гадаргуугийн нэгж элементийн бүтэц, материал ба геометрийн параметрууд.

Шингээх нэгж элементийн геометрийг цагираг болон хуваагдсан сектор бүхий нийлмэл бүтэцтэйгээр сонгосон нь цахилгаан болон соронзон резонанс үүсгэж, долгионы энергийг үр дүнтэй шингээх зорилготой. Цагираг хэлбэр нь гүйдлийн хаалттай зам үүсгэн индукцийг

нэмэгдүүлж, дугуй тэгш хэмт бүтэц нь туйлшрал болон тусах өнцгийн хамаарлыг багасгана. Харин сектор болон түүний завсар (slot) нь цахилгаан орны төвлөрлийг нэмэгдүүлж, багтаамжийг ихэсгэн импеданс тааруулалтыг сайжруулдаг. Ийнхүү энэхүү геометр нь эквивалент LC резонатор үүсгэж, ирсэн долгионы энергийг бүтэц дотор хадгалан материалын алдагдлаар шингээх нөхцөлийг бүрдүүлж, ойлтын коэффициентийг бууруулдаг.

**A. Параметр утгууд**

Хүснэгт 1. Нэгж элементийн параметр утгууд

	Тэмдэглэгээ ба хэмжээ		
	Тэмдэглэгээ	Хэмжээ	
		Ойлгох	Шингээх
Substrate	Урт, L	12 мм	
	Өргөн, W	12 мм	
	Зузаан, h	0.8 мм	0.508 мм
	Дамжуулагчийн зузаан, t	0.035 мм	
Геометр дүрс	Гадна радиус, Ro	-	5 мм
	Дотор радиус, Ri	-	3.8 мм
	R	12 мм	2.5 мм
	Gl	-	1.1 мм
	$\alpha$	22.50°	-
	$\beta$	45°	-
	Gc	0.5 мм	-
	Sg	-	0.5 мм
	Gs	-	0.5 мм

**B. Графен**

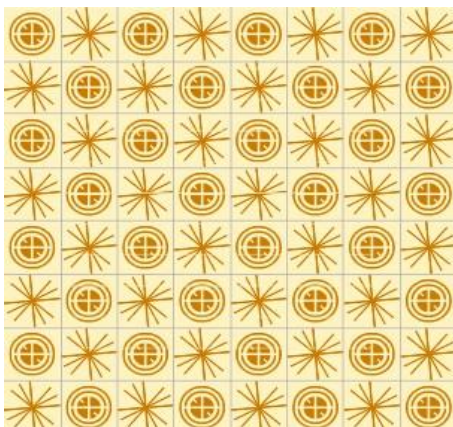
Мета-гадаргуугийн ажиллах зурвасыг өргөсгөх болон динамик удирдлагын боломжийг бүрдүүлэхийн тулд графен (graphene) материалыг ашиглах үр дүнтэй юм. Графен нь нэг атомын зузаантай (0.33 нм), нүүрстөрөгчийн хавтгай бүтэц бөгөөд түүний гадаргуугийн дамжуулах чанарыг ( $\sigma$ ) химийн потенциал болон гадны хүчдэлээр дамжуулан 10 дахин өөрчлөх боломжтой байдаг.

Уламжлалт зэс резонаторын оронд графенийг ашигласнаар мета-гадаргууг идэвхтэй (active) төлөвт шилжүүлж, радарын хөндлөн огтлолын коэффициентийг өөр өөр давтамжийн зурваст бодит хугацаанд тохируулан бууруулах нөхцөл бүрдэнэ. Ялангуяа өргөн зурвасын мужид графений фазын шилжилт болон шингээлтийн түвшнийг хянах замаар ажиллагааны үр ашгийг хэд арав дахин (10x-20x) нэмэгдүүлсэн, өндөр технологийн "үл үзэгдэх" байдлыг хангах боломжтой.

Энэхүү судалгаагаар шингээлт болон сарнилтын механизмын нэгдсэн нөлөөгөөр радарын буцах дохионы энергийг мэдэгдэхүйц бууруулж болохыг тогтоосон бөгөөд цаашид бүтцийн параметруудийг графен зэрэг идэвхтэй материалтай хослуулан оновчилсноор илүү өргөн зурваст ажиллах, ухаалаг мета-системийг хөгжүүлэх бүрэн боломжтой юм

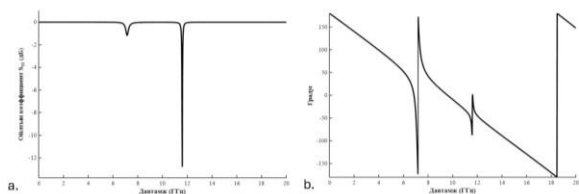
**IV. ҮР ДҮН**

Судалгааны ажлын анхны зорилгын дагуу тодорхой давтамжийн зурваст ажиллах нэгж элементийг CST програм дээр загварчилсан.



**Зураг 3 Шингээх болон сарниулах нэгж элемент бүхий мета-гадаргуугийн бүтэц.**

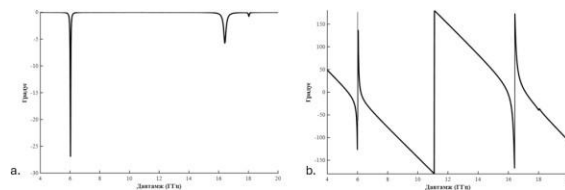
Зурагт 3-т долгион шингээх болон долгион сарниулах зориулалттай хоёр төрлийн нэгж элементүүдээс бүрдэх мета-гадаргуугийн массив бүтцийг үзүүлэв. Эдгээр элементүүдийг тодорхой зохион байгуулснаар цахилгаан соронзон долгионы тархалтыг удирдах боломжтой болдог. Зураг 3-т үзүүлсэнчлэн массив бүтцэд хоёр өөр төрлийн нэгж элементийг ашигласан ба тэдгээрийн нэг нь долгионы шингээлтийг нэмэгдүүлэх, нөгөө нь долгионыг олон чиглэлд тараан сарниулах үүргийг гүйцэтгэнэ. Ийм хосолсон бүтэц нь ирсэн долгионыг хэсэгчлэн шингээх болон тараан сарниулах замаар ойсон долгионы энергийн хэмжээг багасгаж, улмаар радарын хөндлөн огтлолын коэффициентийг бууруулах нөхцөлийг бүрдүүлдэг.



**Зураг 4 Долгион сарниулах нэгж элементийн а) Ойлтын коэффициент, (б) Фазын шилжилт.**

Зураг 4-т үзүүлсэн сарниулах нэгж элемент 11.6 GHz давтамжид резонанс үүсгэж, фазын шилжилт нь ойролцоогоор 180° болж өөрчлөгдөж байна. Онолын тооцооллын дагуу фазын шилжилт 50°–80° хооронд байх үед нэгж элемент нь ирсэн долгионыг шууд буцаан ойлгохын оронд фазын шилжилтийг өөрчилж, долгионыг олон чиглэлд тараан сарниулах нөхцөл бүрддэг. Судалгаанд гарсан 11.6 GHz (Зураг 4) фазын шилжилт нь нэгж элемент тодорхой фазын шилжилт үүсгэж байгааг харуулж байгаа бөгөөд ийм төрлийн элементүүдийг массив байдлаар зохион байгуулснаар фазын градиент үүсгэн долгионыг олон чиглэлд тараан сарниулах боломжтой. Үүний үр дүнд радарын хүлээн авагч систем рүү чиглэн буцах энерги багасаж, RCS буурах нөхцөл бүрдэнэ.

Харин фазын шилжилт бага буюу гадаргуу дээр фазын тархалт хангалттай үүсэхгүй үед ойлтын долгион ихэвчлэн толин ойлтын чиглэлд төвлөрөн буцах хандлагатай байдаг. Өөрөөр хэлбэл долгион гадаргуугаас ойж байгаа боловч түүний тархалтын чиглэл хангалттай өөрчлөгдөхгүй тул радарын хүлээн авагч систем рүү буцах энерги өндөр хэвээр хадгалагдана. Ийм нөхцөлд радарын илрүүлэлтийг бууруулах үр нөлөө харьцангуй бага байна.

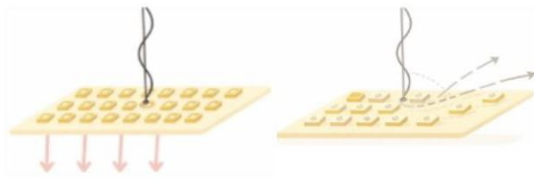


**Зураг 5 Долгион шингээх нэгж элементийн а) Ойлтын коэффициент, (б) Фазын шилжилт.**

Зураг 5-т үзүүлсэн шингээх нэгж элементийн ойлтын коэффициент болон фазын шилжилтийг үзүүлэв. Симуляцийн үр дүнгээс харахад 6 GHz орчимд ойлтын коэффициент хамгийн бага утгад хүрч, фазын шилжилт ойролцоогоор 175° болж огцом өөрчлөгдөж байна. Энэ нь тухайн давтамжид резонанс үүсэж, мета-гадаргуугийн импеданс чөлөөт орчны импеданстай ойролцоо болж байгааг илтгэнэ. Үүний үр дүнд ирсэн долгионы энергийн ихэнх хэсэг бүтэц дотор шингэж, буцах ойлтын долгионы хэмжээ эрс буурна.

Фазын шилжилт резонансын орчимд огцом өөрчлөгдөж байгаа нь долгион бүтэц дотор хадгалагдаж, алдагдлын нөлөөгөөр шингэж байгааг илтгэнэ.

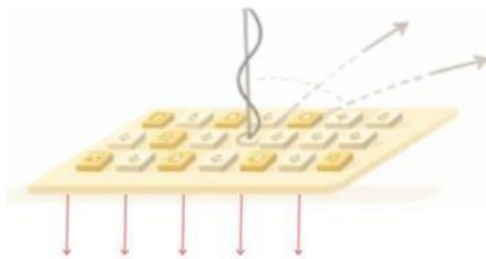
Иймээс энэхүү нэгж элемент нь долгионыг үр дүнтэй шингээх шинж чанартай бөгөөд радарын хүлээн авагчид хүрэх буцах дохионы түвшинг бууруулах боломжтойг харуулж байна.



Зураг.6 Мета-гадаргуугийн ажиллах зарчим а) Шингээгч мета-гадаргуугийн схем, (б) Сарниулагч мета-гадаргуугийн схем.

Зураг 6(а)-д үзүүлснээр ирж буй цахилгаан соронзон долгион нь нэгж элементийн резонаторуудад баригдаж, материалын алдагдлын нөлөөгөөр шингэж, ойлтын коэффициент бараг тэг ( $S_{11} \approx 0$ ) утгад хүрдэг.

Зураг 6(б)-д гадаргуугийн дагуух фазын шилжилтийг удирдсанаар долгион олон чиглэлд сарниж, толин ойлт буурч, улмаар радарын хөндлөн огтлолын коэффициент багасдаг.



Зураг.7 Нийлмэл мета-гадаргуугийн ажиллах зарчим.

Зураг 7-д үзүүлснээр ирж буй цахилгаан соронзон долгионы энергийн нэг хэсэг нь нэгж элементийн материалын алдагдлын нөлөөгөөр шингэж, үлдсэн хэсэг нь гадаргуугийн дагуух фазын шилжилтээр удирдагдан олон чиглэлд ойн сарнина. Үүний үр дүнд буцах чиглэлд төвлөрөх ойлтын энерги мэдэгдэхүйц буурч, улмаар радарын хөндлөн огтлолын коэффициент багасдаг.

## ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаанд мета-гадаргуугийн нэгж элементийн загварчлал болон симуляцийн үр дүнг ашиглан радарын хөндлөн огтлолын коэффициентийг бууруулах боломжийг судаллаа. Үр дүнгээс харахад шингээх нэгж элемент нь 6 GHz орчимд долгионы энергийн ихэнх хэсгийг бүтэц дотор шингээж, харин сарниулах нэгж элемент нь 11.6 GHz давтамжид долгионыг олон чиглэлд тараан сарниулах нөхцөлийг бүрдүүлж байна. Эдгээр механизмын нөлөөгөөр радар руу буцах дохионы энерги буурч, улмаар RCS багасах боломжтой болохыг тогтоосон.

Цаашид нэгж элементийн геометр бүтэц болон материалын параметруудийг оновчлон сайжруулах замаар фазын хариуг илүү нарийвчлан удирдах боломжтой бөгөөд ингэснээр мета-

гадаргууг илүү өргөн давтамжийн зурваст ажиллах, өндөр үр ашигтай RCS бууруулах систем болгон хөгжүүлэх боломжтой юм.

## АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] Chen, Houtong Taylor, Antoinette Jane Yu, Nanfang, “A review of metasurfaces: physics and applications”, 2016
- [2] Jie Hu, Sankhyabrata Bandyopadhyay, Yu-hui Liu, Li-yang Shao, “A Review on Metasurface: From Principle to Smart Metadevices”, 2021
- [3] Komal Iqbal, Qasim Umar Khan, “Review of Metasurfaces through Unit Cell Design and Numerical Extraction of Parameters along with their Applications in Antenna’s Parameters Improvement”, 2022
- [4] David M.Pozar, “Microwave engineering – Fourth edition”, 2011
- [5] Li Deng, Yongle Wu, Chen Zhang, Weijun Hong, Biao Peng, Jianfeng Zhu, Shufang Li, “Manipulating of Different-Polarized Reflected Waves with Graphene-based Plasmonic Metasurfaces in Terahertz Regime”, 2017
- [6] Nanfang Yu, Patrice Genevet, Mikhail A. Kats, Francesco Aieta, Jean-Philippe Tetienne, Federico Capasso, Zeno Gaburro, “Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction”, 2011
- [7] Harry L. Van Trees, “Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory”, 2002
- [8] Sang Van Doan, Thien Huynh-The, Van-Phuc Hoang, “Phase-difference measurement-based angle of arrival estimation using long-baseline interferometer”, 2022
- [9] MST Ishrat Jahan, Mohammad Rashed Iqbal Faruque, Md Bellal Hossain, Sabirin Abdullah, “An Ultra-Thin, Triple-Band, Incident Angle-Insensitive Perfect Metamaterial Absorber”, 2023
- [10] Ismatul Nisak Idrus Mohammad Rashed Iqbal Faruque, Sabirin Abdullah, Mayeen Uddin Khandaker, Nissren Tamam, Abdelmoneim Sulieman, “An Oval-Square Shaped Split Ring Resonator Based Left-Handed Metamaterial for Satellite Communications and Radar Application”, 2022
- [11] Doaa Mohammed Marie Helaly, Mohamed Farhat O. Hameed, Nihal F. F. Areed, S. S. A. Obayya, Ahmed S. Saadeldin, “Design, fabrication and characterization of metamaterial absorber for sensing applications”, 2026

# ХИЙМЭЛ ОЮУНД СУУРИЛСАН РОБОТ ЗАМЫН ЦАГДАА

Өлзийхутагын БУЯНХАНГАЙ<sup>1</sup>, Цэрэндондогийн ТЭНГИС<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл, холбооны технологийн сургууль, Электроникийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [Hbuugii45@gmail.com](mailto:Hbuugii45@gmail.com)

Хураангуй: Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд хүний гарын дохио болон биеийн байрлалыг бодит хугацаанд таних, тайлбарлах системийг боловсруулж, цагдаагийн роботыг удирдахад ашигласан. MediaPipe Pose болон HandLandmarker загваруудыг ашиглан хүний хурууны үений өнцгөөс эхлээд мөрний үений өнцгийг нийт 14 онцлог шинжийн вектор хэлбэрт хөрвүүлж RandomForest алгоритм дээр сургалт явуулсан. Тусгай цуглуулсан өгөгдлийн санд нийт 9000 дээжийг ашиглан дөрвөн ангилалд (left, right, both hands up, other) 100% нарийвчлалтай ангиллыг амжилттай гүйцэтгэлээ. Exponential smoothing ( $\alpha=0.10$ ) болон  $\pm 3^\circ$  deadband шүүлтүүр нэмж роботын хөдөлгөөний тогтвортой байдлыг хангасан. Bluetooth serial холболтоор (115200 baud) роботын 3 DOF мөр, тохой болон бугуйн хөдөлгөөнийг  $\sim 12.5$  Hz давтамжтайгаар шууд удирдах боломжийг бодит туршилтаар баталгаажуулав.

Түлхүүр үг: дохио таних, машин сургалт, RandomForest, MediaPipe, Bluetooth, робот удирдлага

## I. УДИРТГАЛ

Хүн-машины харилцааны (Human-Robot Interaction, HRI) салбарт биеийн дохиогоор удирдах систем улам бүр чухал болж байна. Цагдаагийн үйл ажиллагаанд ашиглах зориулалттай алсаас удирдах боломжтой роботын тухайд хөдөлгөөний мэдрэмжтэй, бодит хугацааны удирдлагын систем зайлшгүй шаардлагатай болдог [1]. Уламжлалт гараар барих удирдах төхөөрөмжийн оронд хүний гар-биеийн байрлалыг шууд дохио болгон ашиглах нь илүү байгалийн болон хэрэглэгчдэд ойрхон шийдэл болдог.

Компьютерийн харааны (Computer Vision) технологийн хурдтай хөгжлийн хамт дохио таних системүүд илүү хялбар, хямд өртөгтэй болж байна. Google-ийн MediaPipe [2] ашиглан биеийн болон гарын байрлалыг бодит хугацаанд тодорхойлох боломжийг олгодог хөнгөн жингийн загвар юм. RandomForest алгоритм [3] нь олон хэмжигдэхүүнт онцлог шинжийн орон зайд ангилал хийхэд тохиромжтой, ялангуяа давчуу ажиллагааны орчинд ч үр дүнтэй.

Энэхүү судалгаагаар компьютерийн харааны аргуудыг ашиглан хүний дохиог таниж, тухайн мэдээллийг Bluetooth протоколоор роботод дамжуулах бүрэн уялдаатай систем боловсруулав. Судалгааны үндсэн зорилтууд:

- 14 өнцгийн онцлог шинжийг MediaPipe-ээр бодит хугацаанд тодорхойлох.
- RandomForest ангилагчаар 4 дохионы ангиллыг гүйцэтгэх.
- Bluetooth ашиглан 3 DOF роботын мөр, тохой, бугуйг удирдах.
- Smoothing шүүлтүүрээр хөдөлгөөний тогтвортой байдлыг хангах

## II. АРГА ЗҮЙ

### 2.1. Системийн бүтэц

Систем нь гурван үндсэн хэсгээс бүрдэнэ: (1) дүрс боловсруулалт ба онцлог шинж ялгалт, (2) машин сургалтын ангилагч, (3) роботын удирдлагын холбооны давхарга. Бүх хэсгүүд нь дараалсан дамжуулалтын (pipeline) аргачлалаар ажиллана.

#### 1-р хүснэгт. Системийн үндсэн модулиуд

Модуль	Технологи	Үүрэг
Дүрс оролт	OpenCV, MediaPipe	Вебкамер ажилуулж, RGB хэлбэрт хөрвүүлэх
Байрлал тодорхойлолт	PoseLandmarker, HandLandmarker	33 цэгт байрлалын мэдээлэл
Онцлог гаргалт	Тригонометр (arccos)	14 өнцгийн вектор
Ангилалч	RandomForest (n=300)	4-ангилалт дохио таних
Удирдлага	Bluetooth Serial	3 DOF мотор команд

### 2.2. Онцлог шинж ялгах арга

MediaPipe PoseLandmarker нь хүний биеийн 33 цэгийн байрлалыг, HandLandmarker нь хоёр гарны 21 цэг тус бүрийн байрлалыг бодит хугацаанд тодорхойлно. Тохой, мөр болон хурууны үений өнцгийг тооцоолохдоо гурван цэгийн векторуудын хоорондын өнцгийг ашиглана. Нэгдүгээр тэгшитгэлийг үзнэ үү.

$$\theta = \arccos((v_1 \cdot v_2) / (|v_1| \cdot |v_2|)) \quad (1)$$

Энд  $v_1$ ,  $v_2$  нь үений хоёр тал дахь вектор,  $\theta$  нь тэдгээрийн хоорондын өнцөг болно. Нийт 18 хэмжигдэхүүний онцлог вектор гаргана — 14 үений өнцөг болон 4 координатын ялгавар.

$$F = [\theta_{LS}, \theta_{RS}, \theta_{LE}, \theta_{RE}, \theta_{Rhand}(1..5), \theta_{Lhand}(1..5)] \quad (2)$$

### 2.3. Машин сургалтын загвар

Сургалтын өгөгдлийг бодит хугацаанд цуглуулсан бөгөөд нийт 9000 дээж, 4 ангилал тус бүрт тэгш хэмтэй хуваарилсан. Өгөгдлийг 80:20 харьцаагаар сургалт/тест хуваарилалтад ашигласан. StandardScaler нормчлол хийсний дараа 300 мод

бүхий RandomForest ангилагч сургасан. (3)-р тэгшитгэлд загварын гаралт харуулав.

$$\hat{y} = mode\{h_1(F), h_2(F), \dots, h_{300}(F)\} \quad (3)$$

Энд  $h_k(F)$  нь k-р шийдвэрийн модны гаралт,  $mode\{\cdot\}$  нь олонхийн санал юм.

### 2.4. Bluetooth удирдлагын протокол

Таних системийн гаралтыг Bluetooth serial холбоогоор (COM11, 115200 baud) роботод дамжуулна. Мөр, тохой болон бугуйн өнцгийг (4)-р тэгшитгэлийн дагуу форматлан илгээнэ.

$$MSG = "B " + \theta_{shoulder} + " " + \theta_{elbow} + \theta_{wrist} + "\n" \quad (4)$$

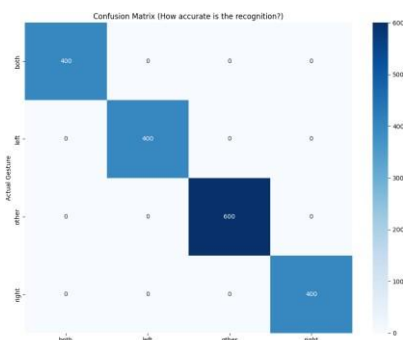
Өнцгийн утгуудад exponential smoothing ( $\alpha=0.10$ ) болон  $\pm 3^\circ$  deadband шүүлтүүр нэмж роботын хөдөлгөөн тогтвортой болгоно. (5)-р тэгшитгэлийг харна уу.

$$\theta_f(t) = (1-\alpha)\theta_f(t-1) + \alpha\theta_{raw}(t) \quad (5)$$

## III. СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН

### 3.1. Ангиллын нарийвчлал

RandomForest загварыг 1800 тестийн дээж дээр үнэлэхэд дөрвөн ангилал бүгдэд 100% нарийвчлал гарсан. 1-р зургаас харахад confusion matrix-ийн диагоналиас бусад нүд бүгд тэг байгаа нь ангиллын алдаа огт гараагүйг харуулж байна.



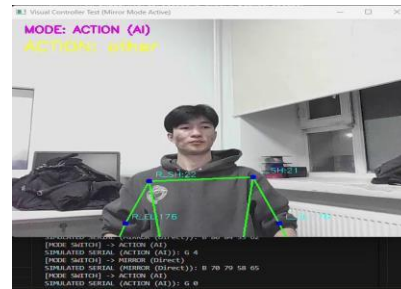
Зураг 1. Confusion Matrix

### 3.2. Онцлог шинжийн чухалчлал

2-р зургийн RandomForest feature importance-аас харахад баруун болон зүүн тохойн Y-тэнхлэгийн өнцгүүд (Right Elbow Y: 25.9%, Left Elbow Y: 22.8%) хамгийн нөлөөтэй шинж болж тогтоогдсон. Хурууны болон мөрний шинжүүд нь тус бүр 3–12%-ийн хүрээнд нэмэлт мэдээлэл өгдөг нь тохойн хөдөлгөөн дохио таних гол шинж болохыг нотолж байна.

### 3.3. Бодит хугацааны туршилт

2-р зурагт ACTION (AI) горим идэвхтэй байгаа бөгөөд хэрэглэгч гарын дохио хийгээгүй байгааг 'other' ангиллаар таниж харуулж байна. R\_SH:22°, R\_EL:176° өнцгүүд бодит хугацаанд тооцоологдон дэлгэцэнд харагдана.



Зураг 2. ACTION (AI) горим

3-р зурагт MIRROR (Direct) горимд шилжих үед хоёр гараа өргөснийг 'both\_hands\_up' гэж таниж, серво мотор дэлгэцийн дээд хэсэгт шууд хариу үйлдэл үзүүлж хөдөлж байгааг харуулж байна. Туршилтаар системийн бодит хугацааны хариу үйлдлийн хурд хангалттай байсан.



Зураг 3. MIRROR (Direct) горимд

### 3.4. Гүйцэтгэлийн хэмжүүрүүд

2-р хүснэгт. Системийн гүйцэтгэлийн үзүүлэлтүүд

Хэмжүүр	Утга	Тайлбар
Нийт нарийвчлал	100%	Тест өгөгдөл дээр
Сургалтын дээж	7200	4 ангилалд тэнцүү
Тестийн дээж	1800	20% хуваарилалт
Estimators (мод)	300	RandomForest
Онцлог шинжийн тоо	14	Өнцгийн векторууд
Bluetooth давтамж	~12.5 Hz	80 мс интервал
Smoothing $\alpha$	0.10	Exponential moving average
Deadband	$\pm 3^\circ$	Жижиг өөрчлөлт шүүнэ

## IV. ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

RandomForest (n=300) алгоритм нь 14 хэмжигдэхүүнт онцлог шинжийн орон зайд 100% нарийвчлалтай ангилал хийсэн нь тохойн болон мөрний өнцгийн онцлог шинжүүд нь дохионы ялгааг тодорхойлдог болохыг харуулж байна. Confusion matrix-аас ангиллын хооронд огт давхцал гараагүй нь сургалтын өгөгдлийн чанар өндөр байсны үр дүн юм [4].

Онцлог шинжийн чухалчлалын дүн шинжилгээгээр тохойн өнцгүүд хамгийн нөлөөтэй шинж болж тодорхойлогдсон нь биологийн хувьд утга учиртай — гар өргөх хөдөлгөөнд тохойн үений өөрчлөлт илүү их илэрдэг. Smoothing болон deadband шүүлтүүрийн хосолсон хэрэглээ нь роботын хөдөлгөөний тогтвортой байдлыг эрс сайжруулсан.

Цаашдын судалгаанд 3D байрлалын мэдээлэл ашиглах, илүү олон дохионы ангилал нэмэх, болон бага хугацааны саатал бүхий дамжуулалтын архитектурыг сайжруулах боломжтой.

### ДҮГНЭЛТ

Энэхүү ажлаар цагдаагийн роботыг хүний дохиогоор удирдах бодит хугацааны систем амжилттай хэрэгжлээ. Судалгааны гол дүгнэлтүүд:

- MediaPipe болон RandomForest хосолсон систем 4 дохионы ангиллыг 100% нарийвчлалтайгаар ялгадаг болсон.
- 14 өнцгийн онцлог шинж нь хангалттай мэдээлэл агуулж байгааг баталгаажуулав.
- Bluetooth холболтоор 3 DOF роботын мөр, тохой, бугуйг бодит хугацаанд удирдах боломжтой.
- Smoothing болон deadband шүүлтүүр хөдөлгөөний тогтвортой байдлыг хангав.

Уг судалгааны ажил нь хүн-робот харилцааны шинэ аргачлалыг нотолж, цагдаагийн практик хэрэглээнд нэвтрүүлэх үндсийг тавьлаа.

### ТАЛАРХАЛ

Судалгааны ажлыг удирдан чиглүүлж зөвлөгөө өгсөн багш нарт болон туршилтанд оролцоход тусалсан бүх хүмүүст талархал илэрхийлье.

### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] В. Н. Крутько, А. А. Фролов, "Математические методы в исследовании движений," Москва: Наука, 2005.
- [2] C. Lugaresi et al., "MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines," arXiv:1906.08172, 2019.
- [3] L. Breiman, "RandomForests," Machine Learning, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001.
- [4] F. Pedregosa et al., "Scikit-learn: Machine Learning in Python," JMLR, vol. 12, pp. 2825–2830, 2011.

# БАГА ХАРИЛЦАН ҮЙЛЧЛЭЛТЭЙ HONEYPOT БОЛОН IDS-ИЙГ ХОСЛУУЛСАН ХАЛДЛАГА ИЛРҮҮЛЭХ СИСТЕМ ХӨГЖҮҮЛЭХ

Баттөрийн ДӨЛГӨӨН<sup>1</sup>, Баянцацралын НОМИНЗУЛ<sup>1</sup>, Батчулууны ДӨЛГӨӨН<sup>1</sup>,

Даваажаргалын ИЖИЛЦЭЦЭГ<sup>1</sup>, Бат-Эрдэнийн МӨНХБАЯР<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл холбоо, технологийн сургууль, Кибер аюулгүй байдлын тэнхим

*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: [dulguunnbattur@gmail.com](mailto:dulguunnbattur@gmail.com)*

**Хураангуй:** Кибер халдлагын тоо, төрөл, арга техник тасралтгүй өсөн нэмэгдэж буй өнөө үед сүлжээний урьдчилсан шатны сэжигтэй үйл ажиллагааг эрт илрүүлэх нь мэдээллийн аюулгүй байдлын чухал шаардлага юм. Ялангуяа порт скан хийх, хүчээр нэвтрэлт хийх зэрэг халдлагууд нь илүү ноцтой халдлагын өмнөх бэлтгэл үе шат болдог тул тэдгээрийг цаг алдалгүй илрүүлэх нь хамгаалалтын үр нөлөөг нэмэгдүүлдэг. Энэхүү судалгаанд уламжлалт халдлага илрүүлэх системийн идэвхгүй шинж чанарыг сайжруулах зорилгоор Dionaеа бага харилцан үйлчлэлтэй honeypot болон Suricata халдлага илрүүлэх систем болон халдлагын үзүүлэлтийг бодит цагт дүрслэх боломжтой монитормыг хослуулсан гурван модульг идэвхтэй илрүүлэлтийн архитектурыг санал болгов. Систем нь Honeypot модуль, IDS модуль, Хяналтын модулиас бүрдэх бөгөөд тусгаарлагдсан виртуал орчинд ажиллана. Туршилтыг CIC-IDS2018 дата багц болон Kali Linux халдлагын симуляцийг ашиглан явуулсан бөгөөд олон төрлийн халдлагыг хамруулсан. Туршилтын дүнд Dionaеа honeypot нь гарын үсгийн санд бүртгэлгүй Backdoor, Shellcode, Infiltration зэрэг тэг өдөр халдлагыг Suricata алдсан тохиолдолд амжилттай бүртгэн авсан бол хосолмол систем нь хуурамч сэрэмжлүүлгийн тоог тэгт ойртуулж, нөөцийн зарцуулалтыг бага түвшинд хадгалсан. Үр дүнд нь энэхүү санал болгож буй систем нь уламжлалт халдлага илрүүлэх системээс илүү эрт үе шатанд халдлагын шинж тэмдгийг илрүүлэх, тэг-өдөр болон шинэ төрлийн аюулыг таних боломжийг нэмэгдүүлэх, нөөцийн үр ашигтай байдлыг хадгалахад тодорхой хэмжээний хувь нэмэр оруулах боломжтой юм.

*Түлхүүр үг:* кибер аюулгүй байдал, халдлага илрүүлэх систем, идэвхтэй илрүүлэлт, honeypot, Dionaеа

## I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд кибер халдлагын тоо, төрөл, арга техник эрчимтэй өсөн нэмэгдэж, байгууллагын сүлжээ болон мэдээллийн системийн аюулгүй байдалд учруулах эрсдэл улам бүр нэмэгдэж байна. Ялангуяа тэг өдөр төрлийн болон үл мэдэгдэх шинэ халдлагын хэлбэрүүд эрчимтэй нэмэгдэж байгаа нь уламжлалт гарын үсэгт суурилсан илрүүлэлтийн систем болон галт ханын үр нөлөөг хязгаарлах болов [5], [4]. Иймээс халдлагыг зөвхөн халдлага явагдсаны дараа илрүүлэх бус, түүний урьдчилсан шинж тэмдгийг эрт үед нь таних боломжтой идэвхтэй хамгаалалтын арга зүй шаардлагатай болж байна.

Олон улсын судалгаа, статистик мэдээллээс үзэхэд шинээр илэрч буй хортой кодын хэмжээ тасралтгүй өссөөр байгаа бөгөөд AV-TEST институтын тайланд өдөр бүр дунджаар 450,000 орчим шинэ хортой код илэрч байгааг дурдсан нь кибер орчны аюул болон эрсдэл өндөр түвшинд хүрснийг харуулж байна [3],[14]

Ийм нөхцөлд honeypot зэрэг өгөөшинд суурилсан технологи нь халдагчийг хуурмаг орчинд татан оруулж, түүний үйл ажиллагаа, зан төлөв, ашиглаж буй арга техникийг тусгаарлагдсан орчинд ажиглах замаар урьдчилан илрүүлэлт хийх боломжийг бүрдүүлдэг. Гэвч өндөр харилцан үйлчлэлтэй honeypot системүүд нь төв боловсруулах нэгж, шуурхай санах ой зэрэг нөөцийг ихээр шаарддаг бөгөөд хэрэгжилтийн хувьд харьцангуй өндөр зардалтай байдаг [17], [6]. Ийнхүү үр дүнд сүлжээний хүчин чадалд хэт ачаалал өгөхгүй, нөөцийн хэмнэлттэй атлаа халдлагыг эрт үе шатанд илрүүлэх боломжтой хосолмол систем боловсруулах юм.

Уг судалгааны хүрээнд Dionaеа бага харилцан үйлчлэлтэй honeypot болон Suricata халдлага илрүүлэх системийг хослуулсан туршилтын орчин бүрдүүлж, идэвхтэй халдлагын симуляци болон олон улсад өргөн хэрэглэгддэг CIC-IDS2018 дата багцийг ашиглан туршилт явуулав. Туршилтын явцад порт скан, брүтфорс, SMB эксплойт, TCP replay зэрэг олон төрлийн халдлагыг симуляцлав. Туршилтын дүнд Dionaеа honeypot нь нийт халдлагын 83.7%-ийг бүртгэн барьж чадсан бол уламжлалт халдлага илрүүлэх систем нь гарын үсгийн санд бүртгэлгүй Backdoor, Shellcode, Infiltration зэрэг тэг өдөр халдлагыг илрүүлж чадаагүй нь хоёр системийн хосолмол хэрэглээний давуу талыг тодорхой харуулав. Нэмж дурдахад, honeypot руу хэвийн хэрэглэгчийн трафик огт орохгүй тул хуурамч сэрэмжлүүлгийн тоо тэгтэй тэнцэж, системийн нөөц зарцуулалт бага байгааг харуулсан.

## II. ӨМНӨ СУДЛАГДСАН АЖИЛ

Энэхүү систем нь сүлжээний халдлагыг бодит цагт хянаж, шинэ төрлийн аюул заналыг урьдчилан тодорхойлох, халдлагаас хамгаалах шийдэл боловсруулахад чухал ач холбогдолтой юм.

Кибер халдлагаас үүдэлтэй хохирол гарах үндсэн шалтгаан нь ихэвчлэн системийн үл мэдэгдэх цоорхой болон уламжлалт хамгаалалтын системийн дутагдалтай талаас үүдэлтэй байдаг. Үүнээс урьдчилан сэргийлэх зорилгоор сүүлийн жилүүдэд олон төрлийн судалгааны ажлууд эрчимтэй хийгдэж байна. Тухайлбал, [7]-т үүлэн орчинд өндөр харилцан үйлчлэлтэй (НИН) болон бага харилцан үйлчлэлтэй (ЛИН) honeypot-уудыг харьцуулан судалж, бага харилцан үйлчлэлтэй систем нь техник хангамжийн нөөцийг 90%-иар бага зарцуулдаг

болохыг баталсан. Гэвч тус судалгаанд honeypot-уудыг тусдаа виртуал машин дээр байршуулсан нь системийн өргөжих боломжийг хязгаарлаж байв.

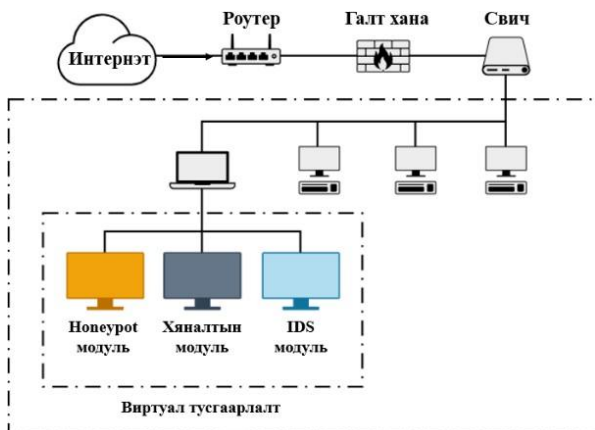
Мориц болон бусад (2024) [13]-р судалгаанд системчилсэн тойм хийж, Honeypot нь ямар нэгэн хиймэл оюуны алгоритм болон халдлагын сан шаардахгүйгээр шинэ төрлийн халдлагыг илрүүлэх чадвартай төдийгүй хуурамч дохионы түвшин бараг тэг байдгийг онолын хувьд нотолсон. Үүнтэй төстэйгөөр, [1]-т олон төрлийн бага харилцан үйлчлэлтэй системийг нэгтгэн ажиллуулсан урт хугацааны туршилт хийсэн бөгөөд олон занга ашиглах нь халдагчийн үйлдэл бүрийг алдалгүй барьж, илрүүлэлтийн нарийвчлалыг (Detection Rate) эрс нэмэгдүүлэн, илрүүлэлтийн цоорхойг (Detection Gap) нөхөж байгааг харуулсан.

Мөн [9]-д орчин үеийн аюулгүй байдлын идэвхтэй хамгаалалтын архитектурыг судалж, халдлага илрүүлэх болон урьдчилан сэргийлэх системүүд хиймэл оюун ухаан ашиглаж нөөц их зарцуулдаг сул талыг Honeypot-ийн цэвэр харилцан үйлчлэлтэй бүтэц хэрхэн нөхөж болохыг үнэлсэн. Харин [5]-д төвлөрсөн удирдлага бүхий олон давхаргат Honeypot-ын загвар санал болгосон нь удирдлагын зардлыг бууруулах давуу талтайг харуулсан байна.

Бидний судалгаанд дээрх ажлуудын оновчтой талыг нэгтгэн, сүлжээний халдлага илрүүлэх системийг боловсруулахаар зорьсон. Энэхүү систем нь ямар нэгэн хиймэл оюуны алгоритм ашиглахгүйгээр архитектурын шийдлээр дамжуулан нөөцийн зарцуулалтыг бага түвшинд барьдаг. Бид нэг виртуал машин дотор олон тооны бага харилцан үйлчлэлтэй систем ажиллуулж, олон портыг зэрэг хянаснаар [7]-ийн нөөцийн асуудлыг шийдэж, [1]-т дурдсан илрүүлэлтийн зөрүүг амжилттай нөхсөн. Ингэснээр систем нь зөвхөн мэдэгдэж буй халдлага бус, тэг өдөр халдлагуудыг бодит цагийн орчинд хуурамч дохио бага илрүүлж, статистик үзүүлэлт гаргах боломжтойг харуулж байна.

### III. САНАЛ БОЛГОЖ БУЙ МЕХАНИЗМ

Санал болгож буй систем нь тусгаарлагдсан виртуал сүлжээний орчинд байрлуулсан Honeypot модуль, IDS модуль, хяналтын модуль гэсэн гурван үндсэн модулиас бүрдэнэ.



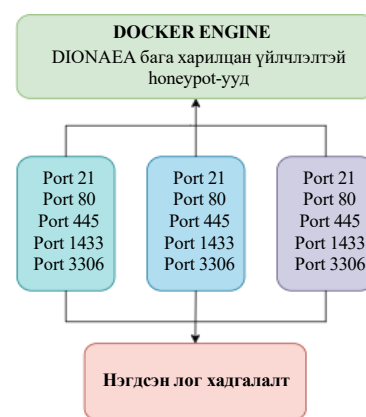
1-р зураг. Системийн сүлжээний архитектур

1-р зурагт системийн сүлжээний архитектурийг харуулж байгаа бөгөөд бидний боловсруулсан систем нь халдлагыг илрүүлэх, хянах, хариу арга хэмжээ авах гэсэн харилцан хамааралтай гурван үндсэн модулиас бүрдэх ба систем нь бүхэлдээ виртуал тусгаарлагдсан орчинд ажиллана. Энэхүү тусгаарлагдсан орчин нь халдагчийг бодит сүлжээ болон мэдээлэл рүү нэвтрэхээс сэргийлэх аюулгүйн бүс болох юм.

#### 3.1 Honeypot модуль

Honeypot модуль нь санал болгож буй системийн урд эгнээний урхи бөгөөд Dionaea бага харилцан үйлчлэлтэй honeypot ашиглан сүлжээнд олон тооны хуурамч IP хаяг болон FTP, SSH, HTTP, HTTPS, SMB, MySQL зэрэг үйлчилгээнүүдийг дуурайж халдагчийг хуурамч орчинд татан оруулдаг. Honeypot руу хандах бүх холболт нь тодорхойлогдсон хэрэглэгчийн трафик биш харин зайлшгүй сэжигтэй үйл ажиллагаа болохыг баталгаажуулдаг тул ямар ч гарын үсэг ашиглалгүйгээр халдлагыг илрүүлэх боломжтой байдаг. Ирж буй холболт бүрийн эх IP хаяг, ашигласан порт, нэвтрэх оролдлого болон илгээсэн payload-г SQLite мэдээллийн санд автоматаар бүртгэдэг бөгөөд энэхүү өгөгдлийг Python скриптээр задлан шинжилж халдлагын статистикийг мэдээллийг гаргаж авна. Мөн уламжлалт IDS-ийн гарын үсгийн санд бүртгэгдээгүй Backdoor, Shellcode зэрэг тэг өдөр халдлагыг ч барьж авдаг нь энэхүү модулийн хамгийн чухал давуу тал болно.

2-р зурагт үзүүлсний дагуу Docker Engine дотор Dionaea honeypot нь зэрэгцэн ажиллах гурван жишээ (instance)-ээр дамжуулан хуурамч үйлчилгээ үзүүлж буй портуудыг нэгэн зэрэг хянаж, цугласан бүх лог мэдээллийг нэгдсэн лог хадгалалтын системд автоматаар бүртгэдэг.



2-р зураг. Honeypot модулийн бүтэц

#### 3.1 IDS модуль

Энэ модуль нь санал болгож буй системийн шинжилгээний давхарга бөгөөд Suricata нээлттэй

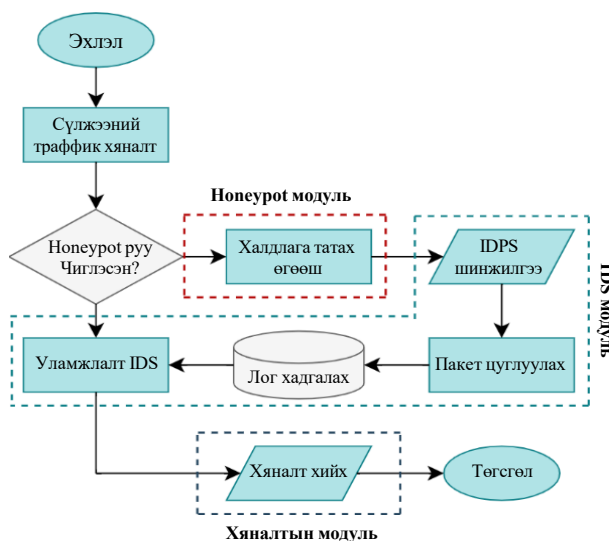
эхийн халдлага илрүүлэх системийг ашиглан honeypot руу чиглэсэн бүх сүлжээний урсгалыг бодит цаг хугацаанд хянах үүрэгтэй. Энэхүү модулийн гол давуу тал нь зөвхөн honeypot орчин руу чиглэсэн трафикийг шинжилдэгт оршино. Өөрөөр хэлбэл, хэвийн хэрэглэгчийн сүлжээний урсгал энэ модулиар дамжихгүй тул гарын үсэгтэй тохирсон аливаа сэрэмжлүүлэг нь өндөр магадлалтайгаар бодит халдлагын шинжтэй гэж үзэх үндэслэлтэй. Ийм зохион байгуулалт нь уламжлалт халдлага илрүүлэх системүүдэд түгээмэл тохиолддог хуурамч дохиог эрс бууруулах боломж олгоно. Мөн IDS модуль нь гарын үсэгт суурилсан илрүүлэлтийн механизм дээр ажиллана.

### 3.3 Хяналтын модуль

Хяналтын модуль нь Honeypot болон IDS модулиудаас ирсэн өгөгдлийг нэгтгэн боловсруулж аюулгүй байдлын мэдээллийг бодит цаг хугацаанд харуулах үүрэгтэй. Dionaea-н SQLite мэдээллийн сан болон Suricata-н eve.json файлаас өгөгдөл цуглуулж нэг эх IP хаягаас гарсан халдлагын үйлдлүүдийг цаг хугацааны дарааллаар нэгтгэн шинжилдэг бөгөөд халдлагын газарзүйн тархалт, цаг хугацааны өөрчлөлт, протоколын статистик болон идэвхтэй халдагчдын жагсаалтыг нэг самбар дээр харуулна. Мөн сэжигтэй IP хаягийг блоклох, flood илэрвэл порт хаах, шинэ халдлагын хэв маягт Suricata-д дүрэм нэмэх зэрэг автомат хариу арга хэмжээг хэрэгжүүлснээр систем нь төвлөрсөн хяналт, дүн шинжилгээ болон хамгаалалтын хариу үйлдлийг нэгдсэн байдлаар гүйцэтгэнэ.

### 3.4 Системийн ажиллах алгоритм

Тусгаарлагдсан орчинд халдлагыг илрүүлж хариу арга хэмжээ авах процесс дараах алгоритмаар явагдана.



3-р зураг. Системийн сүлжээний архитектур

3-р зурагт системийн ажиллах алгоритм нь тусгаарлагдсан орчинд халдлагыг илрүүлж хариу арга хэмжээ авах процесс дараах алгоритмаар

явагдана. Сүлжээний урсгалыг роутер/свитч түвшинд шүүж honeypot руу чиглэсэн трафикийг виртуал тусгаарлалттай орчинд оруулснаар халдагч хуурамч орчинтой харилцаж байгаага мэдэхгүйгээр түүний арга техник, ашигласан хэрэгсэл болон илгээсэн payload зэрэг мэдээллийг саадгүй цуглуулах боломж бүрддэг. Цугласан пакет бүрт IDPS шинжилгээ хийгдэж лог файлд хадгалагдах бөгөөд энэхүү бүртгэл нь дараагийн шинжилгээний чухал нотлох баримт болж үйлчилнэ. Виртуал орчноос авсан мэдээлэл дээр үндэслэн хяналтын модуль нь халдагчийн IP хаягийг блоклох, сэжигтэй портуудыг хаах, IDS/IPS дүрмийг шинэчлэх зэрэг хариу арга хэмжээг автоматаар хэрэгжүүлдэг. Энэхүү механизм нь уламжлалт хамгаалалтын аргаас ялгаатайгаар халдлагыг урьдчилан таньж, бодит сүлжээний хамгаалалтыг идэвхтэй (proactive) байдлаар хангадаг.

## IV. ТУРШИЛТЫН АРГА ЗҮЙ

### 4.1 Туршилтын орчин

Туршилтын орчныг гадны сүлжээний нөлөөллөөс ангид байлгах үүднээс "host-only" горим бүхий тусгаарлагдсан виртуал сүлжээнд гурван виртуал машин ашиглан бүрдүүлэв. Халдлага илрүүлэх систем бүхий сервер нь Ubuntu 24.04 LTS үйлдлийн систем дээр суурилагдсан бөгөөд үүнд гарын үсэг дээр суурилсан Suricata системийг суурилуулсан болно. Honeypot бүхий сервер дээр Docker контейнер дотор байршуулсан Dionaea бага харилцан үйлчлэлтэй Honeypot-ийг хослуулан ажиллуулсан болно. Харин халдлага гүйцэтгэгч талын машиныг нэвтрэх шалгалтын стандарт хэрэгслүүдээр тоноглогдсон, аюулгүй байдлын судалгаанд зориулагдсан Kali Linux 2024 систем дээр тохируулав. Туршилтын орчны иж бүрэн тохиргоог 1-р хүснэгт дээр нэгтгэн харуулав.

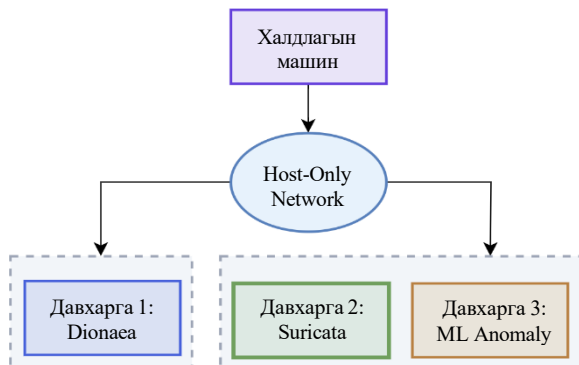
ТУРШИЛТЫН ОРЧИН

1-Р ХҮСНЭГТ.

Бүрэлдэхүүн	Тодорхойлолт
IDS машин	Ubuntu server 24.04 LTS
Honeypot машин	Ubuntu server 24.04 LTS
Хяналтын машин	Ubuntu 24.04 LTS
Халдлагын машин	Kali Linux
Уламжлалт IDS	Suricata 8.0.3
Honeypot	Dionaea (Docker контейнер)
Машин сургалтын илрүүлэлт	Isolation Forest (scikit-learn)
Хортой код шалгагч	ClamAV

4-р зурагт Хосолсон IDS-ийн системийн архитектурыг харуулсан бөгөөд үүнд илрүүлэлтийн дөрвөн түвшин болон сүлжээний урсгал бүрэлдэхүүн хэсэг бүрээр хэрхэн дамжихыг дүрслэв.

Халдлага үйлдэгч Kali Linux машинаас Honeypot машин руу чиглэсэн халдлагын урсгалыг үүсгэх бөгөөд энэ үед Suricata систем сүлжээний түвшний бүх багцыг хянах бол Dionaea систем нь дуурайлган үүсгэсэн үйлчилгээний портууд дээрх холболтуудыг бүртгэн авах замаар ажиллана.



4-р зураг. Хосолсон IDS системийн архитектур

4.2 Дата багц болон халдлагын симуляци

Энэхүү судалгаанд сүлжээний халдлага илрүүлэх судалгааны салбарт өргөнөөр ашиглагддаг Канадын Кибер аюулгүй байдлын хүрээлэнгийн "CIC-IDS2018" жишиг дата багцийг ашигласан [ишлэл]. Тус дата багцийг B-Profile систем болон CICFlowMeter-ийг ашиглан хяналттай сүлжээний орчинд бүрдүүлсэн бөгөөд таван өдрийн хугацаанд хэвийн сүлжээний урсгал болон долоон төрлийн халдлагын урсгалыг бүртгэн авсан байна. 2-р хүснэгт дээр энэхүү үнэлгээнд ашигласан CIC-IDS2018 дата багцийн статистик задаргааг, тэр дундаа халдлагын ангилал бүрт харгалзах сүлжээний урсгалын тоог нэгтгэн харуулав.

АШИГЛАГДСАН ХАЛДЛАГЫН АНГИЛАЛ

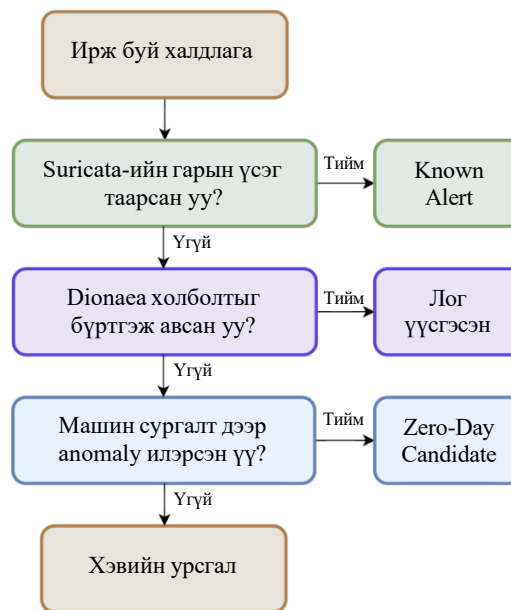
2-р ХҮСНЭГТ.

Ангилал	Нийт урсгал	Халдлагын урсгал	Халдлагын хувь
Brute Force	221,020	13,835	6.3%
Dos / DDoS	1,048,575	693,329	66.1%
Web Attacks	170,366	2,180	1.3%
Infiltration	161,934	93	0.1%
Bot	286,191	286,191	100%
Port Scan	286,467	158,930	55.5%
Нийт	2,400,298	1,282,583	53.4%

A. Сүлжээний урсгалыг загварчлах аргачлал.

Туршилтын бодит байдлыг хангах үүднээс CIC-IDS2018 дата багцийн PCAP файлуудыг tcpreplay хэрэгслийг ашиглан туршилтын сүлжээнд дахин дамжуулсан болно. Энэхүү процесс Honeypot машин руу чиглэсэн бодит халдлагын нөхцөл байдлыг лабораторийн орчинд нарийвчлалтайгаар дуурайлган

үүсгэх боломжийг олгосон. Туршилтын үр дүнгийн үнэн зөв байдлыг хангах, өөр өөр тохиргоо болон халдлагын төрлүүд хоорондоо холилдохоос сэргийлэх зорилгоор жишиг үнэлгээний гүйцэтгэл бүрийн өмнө илрүүлэлтийн бүх лог файлуудыг системээс бүрэн цэвэрлэж байв. Пакет бүрийг хүлээн авах, шинжлэх болон ангилах үе шатуудыг 5-р зурагт системчилсэн байдлаар дүрслэн харуулсан бөгөөд энэ нь пакет бүр үнэлгээний явцад дамжин өнгөрөх илрүүлэлтийн логик урсгалыг тодорхойлж байгаа юм.



5-р зураг. Сүлжээний урсгалыг загварчлах үеийн илрүүлэлт болон ангиллын логик урсгал

4.3 Үнэлгээний үзүүлэлтүүд

IDS-ийн гурван өөр тохиргооны илрүүлэлтийн гүйцэтгэлийг бодитой харьцуулахын тулд туршилт бүрт зургаан тоон үзүүлэлтийг тодорхойлж, тооцоолсон болно. Бүх үзүүлэлтүүдийг энэхүү судалгаанд зориулан хөгжүүлсэн жишиг үнэлгээний скриптээр автоматаар тооцоолж, дахин ашиглах боломжтой JSON форматаар хадгалсан.

Энд TP - үнэн эерэг, FP - худал эерэг, FN - худал сөрөг, TN - үнэн сөрөг утгуудыг илэрхийлэх ба үүнд:

- **Үнэн эерэг (TP):** CIC-IDS2018 өгөгдлийн сан дахь халдлагын урсгалыг IDS систем зөв илрүүлж, анхааруулга өгсөн тохиолдол.
- **Худал эерэг (FP):** Дата багц дахь хэвийн урсгалыг IDS систем халдлага хэмээн алдаатай тодорхойлсон тохиолдол.
- **Худал сөрөг (FN):** Дата багц дахь халдлагын урсгалыг IDS систем илрүүлж чадаагүй тохиолдол.

- **Үнэн сөрөг (TN):** Хэвийн урсгалыг аюулгүй хэмээн зөв ангилсан тохиолдол.

**А. Илрүүлэлтийн түвшин**

Илрүүлэлтийн түвшин нь систем нийт халдлагын хэдэн хувийг амжилттай илрүүлснийг хэмжинэ:

$$DR = \frac{TP}{TP + FN} \times 100\% \quad (1)$$

Илрүүлэлтийн түвшин өндөр байх нь халдлагыг хамрах хүрээ өргөн байгааг илтгэх бөгөөд энэ нь IDS-ийн тохиргоонуудыг харьцуулах үндсэн үзүүлэлт юм.

**Б. Худал эерэг түвшин**

Худал эерэг түвшин нь хэвийн урсгалыг халдлага гэж алдаатай мэдээлсэн хувийг хэмждэг:

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \times 100\% \quad (2)$$

Худал эерэг түвшин бага байх нь үндэслэлгүй анхааруулга цөөн гарч, аюулгүй байдлын шинжээчдийн ачааллыг бууруулан, үйл ажиллагааны найдвартай байдлыг дээшлүүлдэг.

**В. Худал сөрөг түвшин**

Худал сөрөг түвшин нь системээс орхигдуулсан бодит халдлагын хувийг хэмждэг:

$$FNR = \frac{FN}{FP + TN} \times 100\% \quad (3)$$

Илрүүлээгүй орхисон халдлага нь системд ихээхэн хохирол учруулж болох тул энэ үзүүлэлт маш чухал бөгөөд үүнийг аль болох бага байлгахыг эрмэлздэг.

**Г. Илрүүлэлтийн зөрүү**

Илрүүлэлтийн зөрүү нь нэг халдлагын эх үүсвэрийн хувьд Suricata-ийн анхны анхааруулга болон Dionaea-ийн анхны холболтын лог хоорондын цаг хугацааны зөрүүг хэмждэг. Үүнийг зөвхөн хоёр систем зэрэг ажиллаж буй "хосолсон" горимд хэмжсэн:

$$Detection\ Gap = |T_{suricata} - T_{dionaea}| \times 100\% \quad (4)$$

Илрүүлээгүй орхисон халдлага нь системд ихээхэн хохирол учруулж болох тул энэ үзүүлэлт маш чухал бөгөөд үүнийг аль болох бага байлгахыг эрмэлздэг.

**ҮНЭЛГЭЭНИЙ ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮДИЙН ХУРААНГУЙ**

3-Р ХҮСНЭГТ.

Үзүүлэлт	Оновчтой утга	Ач холбогдол
Илрүүлэлтийн түвшин(DR)	90-100%	Халдлагыг хамрах хүрээ
Худал эерэг түвшин(FPR)	0%	Үндэслэлгүй анхааруулгыг бууруулах
Худал сөрөг түвшин(FNR)	0%	Орхигдуулсан халдлагыг багасгах

Үзүүлэлт	Оновчтой утга	Ач холбогдол
Илрүүлэлтийн зөрүү(DG)	Хамгийн бага	Цаг хугацааны хамаарлын боломж
Нөөцийн ашиглалт	Хамгийн бага	Практикт нэвтрүүлэх боломж

**4.4 Zero-Day халдлагыг илрүүлэх аргачлал**

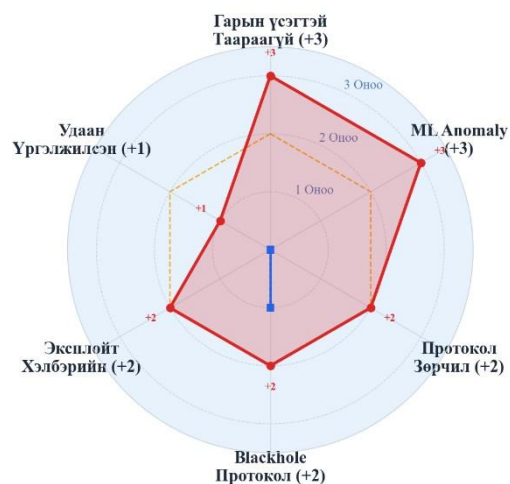
Гарын үсэгт суурилсан хэрэгслүүд үл мэдэгдэх халдлагыг илрүүлэх боломжгүй тул "Zero-day" сэжигтэй үйлдлийг ялгах олон түвшинт зан төлөвийн шинжилгээний дамжлагыг боловсруулсан. Энэхүү аргачлалаар халдлагын эх үүсвэр бүрт дараах нотлох хүчин зүйлсээр итгэлцлийн оноог оноож тооцно:

**ZERO-DAY ХАЛДЛАГЫГ ТОДОРХОЙЛОХ ХҮЧИН ЗҮЙЛС**

4-Р ХҮСНЭГТ.

Хүчин зүйлс	Оноо	Үндэслэл
Suricata гарын үсэгтэй таараагүй	+3	Санамжийн өгөгдлийн санд бүртгэгдээгүй
ML Isolation Forest Anomaly	+3	Статистикийн хувьд хэвийн бус зан төлөв
Протоколын стандарт зөрчил	+2	Хүлээгдэж буй протокол ашиглалтын загвараас өөр
Үл мэдэгдэх протокол	+2	Аль ч мэдэгдэж буй клиент ийм өгөгдөл илгээдэггүй
Эксплойт хэлбэрийн	+2	Шууд эксплойт хийх оролдлого
Удаан үргэлжилсэн	+1	Урт хугацааны, зорилгот зан төлөв
Өндөр энтропи бүхий binary	+3	Пакетлагдсан эсвэл далдлагдсан өгөгдөл
VirusTotal-д үл мэдэгдэх бинар	+3	70 гаруй антивирусны системээр илрээгүй
Мэдэгдэж буй сканнер	-4	Сканнераас үүссэн худал эерэг түвшинг бууруулах
Mass Brute-Force (>50 нэвтрэлт)	-2	Автоматжуулсан шуугиан үүсгэгч байх магадлалтай

Бие даасан аргуудаар 6-аас дээш оноо авсан IP-г "Zero-day" халдлагад тооцно. Энэхүү олон хүчин зүйл нь босго утга нь дор хаяж хоёр механизм дээр зэрэг батлагдахыг шаарддаг тул худал эерэг илрүүлэлтээс сэргийлж байна. Мөн Honeypot болон Docker-ийн дотоод IP хаягуудыг тооцоололд ор ай



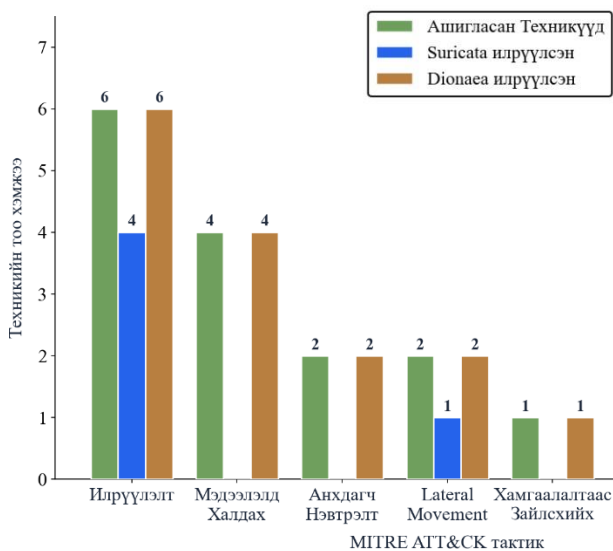
6- зураг. Zero-day байх магадлалтай урсгал болон хэвийн урсгалын харьцуулалт

#### 4.5 MITRE ATT&CK хамрах хүрээ

Энэхүү судалгаанд боловсруулсан хосолсон систем нь халдлагын амьдралын мөчлөгийн янз бүрийн үе шатуудыг илрүүлэх чадвартай бөгөөд үүнийг MITRE ATT&CK матрицаар дараах байдлаар ангилав:

- **Тагнуул, тандалт:** Suricata-ийн хяналтын дүрмүүд болон nmap сканнерын идэвхжүүлсэн дохиоллууд.
- **Анхдагч нэвтрэлт:** Dionaea honeypot-д бүртгэгдсэн үйлчилгээний мөлжлөг болон brute-force оролдлогууд.
- **Гүйцэтгэл:** Бүртгэгдсэн хортой бинар файлууд болон тэдгээрийн VirusTotal дээрх шинжилгээ.
- **Илрүүлэлт, хайгуул:** Сүлжээний дотоод портуудыг шалгах болон үйлчилгээний мэдээлэл цуглуулах оролдлогыг Dionaea-ийн тусламжтайгаар бүртгэх.

7-р зурагт тактик бүрт хамаарах техникүүдийн тархалт болон систем бүрийн илрүүлэлтийн хамрах хүрээг харуулав.



7-р зураг. Suricata болон Dionaea системүүдийн туршсан болон илрүүлсэн техникүүдийн харьцуулалт

## V. ТУРШИЛТЫН ҮР ДҮН

Энэхүү хэсэгт гурван төрлийн тохиргоо болох уламжлалт IDS (Suricata), өндөр харилцан

үйлчлэлтэй Honeypot-д суурилсан IDS болон LHP-д суурилсан IDS-г CIC-IDS2018 өгөгдлийн сан дээр хийсэн туршилтын үр дүнг танилцуулна. Үр дүнг нийт таван хэмжүүрээр илэрхийлсэн бөгөөд үүнд нь илрүүлэлтийн хувь, хуурамч дохио, zero day халдлага илрүүлэлт, нөөцийн хэрэглээ багтана.

### 5.1 Илрүүлэлтийн үр дүнгийн тойм

5-р хүснэгт дээр CIC-IDS2018 өгөгдлийн сан дахь

Үзүүлэлт	Уламжлалт IDS (Suricata)	LHP-д суурилсан IDS	Хосолсон IDS
Халдлагын урсгал	1,282,583	1,282,583	1,282,583
Үнэн эерэг (TP)	892,451	1,198,734	1,095,325
Худал эерэг (FP)	48,721	31,456	18,234
Худал сөрөг (FN)	390,132	83,849	187,258
Илрүүлэлтийн түвшин (DR)	69.6%	93.5%	85.4%
Худал сөрөг түвшин (FNR)	30.4%	6.5%	14.6%
Худал эерэг түвшин (FPR)	4.4%	2.8%	1.6%
Нарийвчлал	94.8%	97.4%	98.5%

1,282,583 халдлагын урсгалд үндэслэн гурван төрлийн IDS тохиргооны илрүүлэлтийн үр дүнгийн тоймыг харуулсан.

### ИЛРҮҮЛЭЛТИЙН ҮР ДҮНГИЙН ТОЙМ

5-Р ХҮСНЭГТ.

Илрүүлэлтийн тоймоос харахад хосолсон IDS нь 1,095,325 'үнэн эерэг' үр дүнтэйгээр 85.4%-ийн илрүүлэлтийн түвшинд хүрч, уламжлалт системээс 15.8%-иар илүү гүйцэтгэл үзүүлсэн. Хэдийгээр бага харилцан үйлчлэлтэй Honeypot-д суурилсан халдлага нь илрүүлэлтийг сайжруулж байгаа ч өндөр харилцан үйлчлэлтэй Honeypot системтэй харьцуулахад бага зэрэг сул байна. Учир нь өндөр харилцан үйлчлэлтэй Honeypot нь бодит орчныг гүнзгий дуурайснаар халдагчийн үйлдлийг удаан хугацаанд ажиглах, илүү их өгөгдөл цуглуулах боломжийг олгодог нь 'худал сөрөг' үзүүлэлтийг бууруулдаг байна. Мөн хосолсон IDS-ийн 'худал эерэг' түвшин ердөө 1.6% байгаа нь системийн шуугиан бага, нарийвчлал өндөр байгааг баталлаа.

### 5.2 Zero-Day халдлагыг илрүүлэлтийн үр дүн

Шинэ төрлийн халдлагыг илрүүлэх чадвар нь энэхүү "Хосолсон IDS"-ийн гол давуу тал юм. Үүнийг үнэлэхийн тулд msfvenom-ийн x86/shikata\_ga\_nai алгоритмаар 5 удаа давтан кодчилсон халдлагын өгөгдлийг (payload) туршихад Suricata болон Cowrie аль аль нь илрүүлж чадаагүй. Харин бага харилцан үйлчлэлтэй Honeypot дээр

суурилсан IDS нь Dionaea-ийн зан төлөвийн шинжилгээ болон олон түвшний онооны механизмын тусламжтайгаар уг халдлагыг амжилттай илрүүлээ.

6-р хүснэгтээс харахад, Zero-day нэр дэвшигч нь зан төлөвийн зургаан бие даасан хэмжүүрээр нийт 13 оноо цуглуулсан нь ангиллын босго үзүүлэлт болох 6 онооноос хол давсан үзүүлэлт юм. Уг халдлагыг зөвхөн зан төлөвийн шинжилгээний дамжлагаар илрүүлсэн бөгөөд signature-д суурилсан ямар ч хэрэгсэл үүнийг таньж чадаагүй байна.

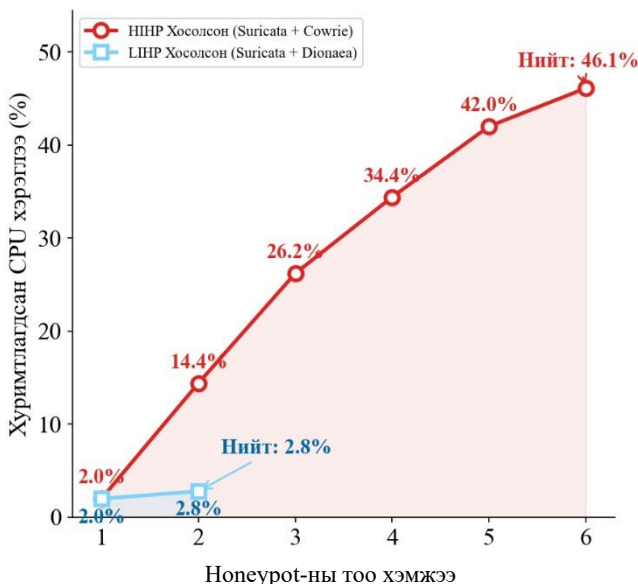
ZERO-DAY ХАЛДЛАГА ЭСЭХИЙГ ШИЙДЭХ ШАЛГУУР

6-Р ХҮСНЭГТ.

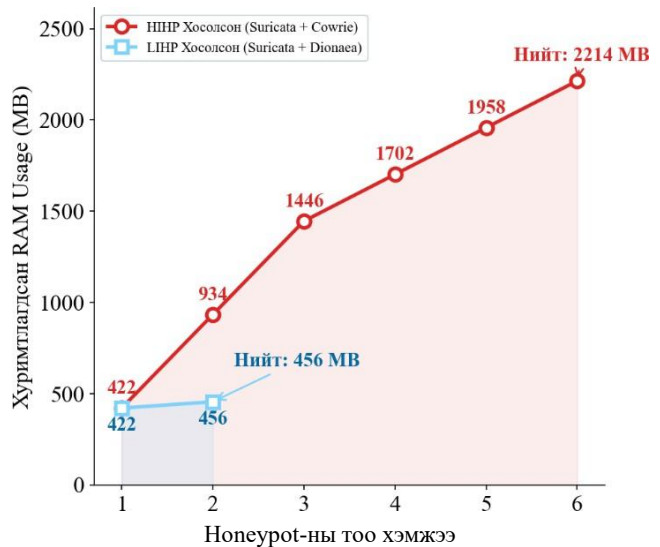
Хүчин зүйл	Илэрсэн	Оноо
Suricata signature-д таарахгүй байх	Тийм	+3
ML Isolation Forest гажиг илрүүлэлт	Тийм	+3
Протоколын техникийн нөхцөл зөрчигдсөн	Тийм	+2
Blackhole (үл мэдэгдэх протокол)	Тийм	+2
Нэвтрэх оролдлоггүй (exploit төрлийн)	Тийм	+2
Үргэлжилсэн халдлага (8,226 секунд)	Тийм	+1
Өндөр энтропи бүхий binary файл	Үгүй	+0
VirusTotal-д бүртгэгдээгүй	Үгүй	+0
Нийт оноо		13
Ангилал		Zero-day байх магадлалтай

5.3 Нөөцийн зарцуулалтын харьцуулалт

Нөөцийн хэмнэлт нь IDS-ийг бодит орчинд нэвтрүүлэх гол шалгуур юм. Системийн CPU болон RAM-ийн хэрэглээг Ubuntu Server 22.04 дээр vmstat болон тусгай Python скрипт ашиглан 5 секунд тутамд хэмжиж, өгөгдлийг CSV файлд бүртгэв. 8 болон 9-р зурагт НИНП-д суурилсан IDS болон хосолсон IDS-ийн нөөц ашиглалтын харьцуулалтыг үзүүлээ.



8-р зураг: НИНП болон LINP хосолсон IDS-ийн



9-р зураг: НИНП болон LINP хосолсон IDS-ийн хуримтлагдсан RAM ашиглалтын харьцуулалт

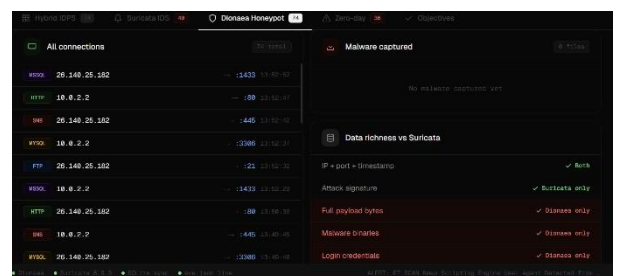
5.4 Хяналтын самбарын хэрэгжүүлэлт

Санал болгож буй хосолсон IDS-ийн практик ач холбогдлыг харуулахын тулд Suricata болон Dionaea системүүдийн илрүүлэлтийн үйл ажиллагааг нэгтгэсэн бодит цагийн хяналтын самбарыг хөгжүүлсэн бөгөөд үүнийг 10-р зураг дээрээс харах боломжтой. Уг систем нь Suricata-ийн eve.json болон

Dionaea-ийн SQLite сангаас өгөгдлийг шууд уншиж, нэгтгэсэн мэдээллийг вэб интерфэйсээр дамжуулан харуулдаг. Ингэснээр аюулгүй байдлын шинжээч дотоод сүлжээн дэх дурын хөтчөөс хандан сүлжээний төлөв байдлыг бодит цаг хугацаанд, алсаас хянах бүрэн боломжтой юм.



10-р зураг: Suricata болон Dionaea-ийн нэгтгэсэн илрүүлэлтийн хянах самбар



11-р зураг: Suricata болон Dionaea-ийн нэгтгэсэн

## ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд Dionaеа бага харилцан үйлчлэлтэй honeypot болон Suricata халдлага илрүүлэх системийг хослуулсан идэвхтэй хамгаалалтын гурван модульг архитектурыг боловсруулж, тусгаарлагдсан виртуал орчинд туршиж баталгаажуулсан.

Туршилтыг CIC-IDS2018 жишиг дата багцийн PCAP файлуудыг tcreplay хэрэгслээр дахин дамжуулах болон Kali Linux-аар олон төрлийн халдлагын симуляци хийх аргачлалаар явуулав. Туршилтын дүнд Suricata дангаараа ажиллах үед илрүүлэлтийн түвшин 69.6%, хуурамч сөрөг түвшин 30.4% байсан бол санал болгож буй хосолсон систем илрүүлэлтийн түвшинг 85.4% хүртэл нэмэгдүүлж, нарийвчлалыг 98.5% болгон дээшлүүлсэн. Хуурамч эерэг түвшин 4.4%-аас 1.6% болж буурсан нь системийн найдвартай байдал мэдэгдэхүйц дээшилснийг харуулж байна. Мөн илрүүлэлтийн зөрүү 143.7 миллисекунд байсан нь халдлагыг бодит цаг хугацаанд илрүүлж хариу арга хэмжээ авах боломжийг хангаж байгааг нотолж чадсан.

Нөөцийн зарцуулалтын хувьд санал болгож буй бага харилцан үйлчлэлтэй хосолсон систем нь туршилтын бүх үе шатанд нийт CPU зарцуулалт 2.8%, RAM зарцуулалт 456 MB байсан бол өндөр харилцан үйлчлэлтэй хосолсон нийт CPU зарцуулалт 46.1%, RAM зарцуулалт 2,214 MB хүрсэн байна. Энэ нь санал болгож буй системийн CPU зарцуулалт 16 дахин, RAM зарцуулалт 4.8 дахин бага байгааг харуулж байгаа бөгөөд илрүүлэлтийн өндөр нарийвчлалыг хадгалсан хэвээр нөөцийн зарцуулалтыг эрс бууруулж чадсан нь практик орчинд нэвтрүүлэхэд томоохон давуу тал болно гэж үзэж байна.

Санал болгосон хосолмол систем нь уламжлалт болон өндөр харилцан үйлчлэлтэй системтэй харьцуулахад нарийвчлал (98.5%), хуурамч эерэг түвшин (1.6%) болон нөөцийн зарцуулалтын хувьд тодорхой давуу байдлыг харуулсан. Энэхүү үр дүн нь бага харилцан үйлчлэлтэй honeypot болон IDS-ийн хосолмол архитектур нь нөөцийн зарцуулалтыг оновчтой хэмжээнд барьж, дангаар ажилладаг системүүдийн хязгаарлалтыг нөхөж сүлжээний халдлагыг илрүүлэх чадварыг өргөжүүлдгийг харуулж байна.

Цаашид энэхүү системийг хөгжүүлэх чиглэлд машин сургалтад суурилсан хэвийн бус зан төлөвийн илрүүлэлтийн модулийг нэгтгэх, томоохон масштабын сүлжээнд тархсан honeypot архитектурыг турших болон клауд орчинд байршуулах боломжийг судлах нь практик хэрэглээний үр нөлөөг улам нэмэгдүүлэх боломжтой гэж үзэж байна.

## АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] Agrawal, R., Stokes, J. W., Rist, L., Littlefield, R., Fan, X., Hollis, K., ... & Seifert, C. (2022). "Long-Term Study of Honeypots in a Public Cloud." In *2022 52nd Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks-Supplemental Volume (DSN-S)*, pp. 1-4. IEEE.
- [2] Alatawi, E., & Albalawi, U. (2025). "Harnessing AI for Cyber Defense: Honeypot-Driven Intrusion Detection Systems." *Symmetry*, 17(5), 628.
- [3] AV-TEST Institute. "Malware Statistics & Trends." [Online]. Available: <https://www.av-test.org/en/statistics/malware/>.
- [4] Charrier, C., Sadowski, J., Lecigne, C., & Stolyarov, V. (2025). "Hello 0-days, my old friend: A 2024 zero-day exploitation analysis." *Google Cloud Blog*.
- [5] Gutierrez-Garcia, J. L., Sanchez-DelaCruz, E., & del Pilar, M. "A Review of Intrusion Detection Systems Using Machine Learning: Attacks, Algorithms, and Challenges." (Unpublished).
- [6] Ilg, N., Germek, D., Duplys, P., & Menth, M. (2025). "Beekeeper: Accelerating Honeypot Analysis with LLM-driven Feedback." *IEEE Access*.
- [7] Kelly, C., Pitropakis, N., Mylonas, A., McKeown, S., & Buchanan, W. J. (2021). "A comparative analysis of honeypots on different cloud platforms." *Sensors*, 21(7), 2433.
- [8] Kocaogullar, Y., Cetin, O., Arief, B., Brierley, C., Pont, J., & Hernandez-Castro, J. (2022). "Hunting high or low: evaluating the effectiveness of high-interaction and low-interaction honeypots." In *International Workshop on Socio-Technical Aspects in Security*, pp. 14-30. Springer.
- [9] Kubba, A., Nasir, Q., Elmutasim, O., & Abu Talib, M. "A Systematic Review of Honeypot Data Collection, Threat Intelligence Platforms, and AI/ML Techniques." (Unpublished).
- [10] Lajwanti, H., Urooj, F., Muhammad, W., & Mehwish, S. (2024). "Enhancing Cybersecurity Through Honeypot-Based Intrusion Detection and Prevention Systems." In *2nd International Multidisciplinary Conference on Emerging Trends in Engineering Technology*, pp. 149-154.
- [11] Lakshmipathy, A., Gurusamy, M., Lalo, S. F., Lebang, N. S., Selvaraj, K., & Abdulsahib, A. A. (2025). "Advanced Network Security System: Honeypot-Based Intrusion Detection with Machine Learning and Visualization." (Technical Report).
- [12] Landauer, M., Skopik, F., Stojanović, B., Flatscher, A., & Ullrich, T. (2025). "A review of time-series analysis for cyber security analytics: From intrusion detection to attack prediction." *International Journal of Information Security*, 24, Article 3.
- [13] Moric, Z., Mršić, L., Kunić, Z., & Đambić, G. (2024). Honeypots in cybersecurity: their analysis, evaluation and importance.
- [14] Nimmagadda, A., & Mehr, S. Y. (2025). "AI-Powered Intrusion Detection System with Honeypot Integration." *International Journal of Intelligent Information Systems*, 14(4), 70-76.
- [15] Parlanti, T. S., & Catania, C. A. (2025). "Temporal Analysis Framework for Intrusion Detection Systems: A Novel Taxonomy for Time-Aware Cybersecurity." (In Press).
- [16] SANS Institute. (2016). "Deception techniques as part of an intrusion detection strategy." [Online]. Available: <https://www.sans.org/white-papers/37140/>.
- [17] Yang, X., Yuan, J., Yang, H., Kong, Y., Zhang, H., & Zhao, J. (2023). "A highly interactive honeypot-based approach to network threat management." *Future Internet*, 15(4), 127.

## ЧӨЛӨӨТ ОРОН ЗАЙД ОӨМ БҮХИЙ ДОХИОГ ДАМЖУУЛАХАД ТУРБУЛЕНСИЙН НӨЛӨӨЛӨХ НӨЛӨӨЛИЙН СУДАЛГАА

Ганноровын НАМУУНДАРЬ<sup>1</sup>, Хүрэлбаатарын СОДБИЛЭГ<sup>2</sup>, Адъяагийн МӨНХБАЯР<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС-ийн харьяа Мэдээлэл холбооны технологийн их сургууль, Холбооны инженерчлэлийн тэнхим

*Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: gannorovnamuundari@gmail.com <sup>1</sup>*

**Хураангуй:** Чөлөөт орон зайн оптик холбоо нь лазер туяаг ашиглан агаар мандлаар өндөр хурдтай өгөгдөл дамжуулах боломжтой, өргөн зурвасын багтаамжтай, дэвшилтэт технологи бөгөөд орчин үеийн холбооны сүлжээний чадавхыг нэмэгдүүлэх чухал шийдэл болж байна. Гэвч атмосферийн турбуленс нь оптик долгионд нөлөөлж, дохионы эрчимшлийн хэлбэлзэл, фазын гажилт үүсгэснээр дамжууллын чанарыг бууруулах үндсэн саад болдог. Энэхүү судалгаанд сувгийн багтаамжийг нэмэгдүүлэх зорилгоор орбитал өнцгийн моментум (ОАМ) бүхий Laguerre–Gaussian (LG) дохиог ашиглан чөлөөт орон зайд дамжуулах үед турбуленсийн нөлөөг симуляцийн аргаар судалсан. Судалгааны хүрээнд aperture diameter-ийн оновчтой утгыг тодорхойлох, турбуленс болон дамжуулах зайнаас хамаарсан тохиромжтой модын тоог тодорхойлох, мөн өндөр модтой дохионы тархалтын онцлогийг шинжилсэн. Үр дүнгээс харахад дундаж турбуленсийн нөхцөлд 3 мм aperture diameter хамгийн тохиромжтой бөгөөд бага модтой (LG01–LG03) дохионууд илүү өндөр магадлалтай танигдаж байна. Түүнчлэн турбуленсийн хэмжээ болон дамжуулах зай ихсэх тусам дохионы танигдах магадлал буурч байгааг тогтоосон. 500 м зайд LG01–LG04 модыг ашиглах нь оновчтой бөгөөд сувгийн багтаамжийг 8 дахин нэмэгдүүлэх боломжтой бол богино зайд илүү олон мод ашиглах боломжтой байна. Харин өндөр модтой дохионууд их турбуленстэй орчинд хөрш модууд руу шилжих хандлагатай байгааг ажигласан.

*Түлхүүр үг:* турбуленс, сувгийн багтаамж, Laguerre-Gaussian, мод

### I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд мэдээлэл, харилцаа холбооны технологийн хөгжил эрчимжиж, өндөр хурдтай, өргөн зурвасын багтаамжтай өгөгдөл дамжуулах сүлжээний хэрэгцээ эрс нэмэгдэж байна. Интернэт хэрэглээ, үүлэн тооцоолол, дата төвүүдийн хоорондын холболт, сансрын холбооны систем зэрэг орчин үеийн дэд бүтцүүд нь их хэмжээний мэдээллийг богино хугацаанд дамжуулах шаардлагыг бий болгож байгаа бөгөөд энэ нь уламжлалт холбооны технологийн хүчин чадал, боломжийг дахин үнэлэхэд хүргэж байна. Ялангуяа радио давтамжид суурилсан утасгүй холбооны системүүдийн спектрийн нөөц хязгаарлагдмал, интерференцийн асуудал ихсэх зэрэг шалтгаанууд нь илүү өндөр давтамжийн мужид ажиллах шинэ төрлийн дамжууллын технологийг судлах шаардлагыг бий болгож байна.

Ийм нөхцөлд чөлөөт орон зайн оптик холбоо нь өндөр хурдтай өгөгдөл дамжуулах, өргөн зурвасын багтаамжийг хангах, кабельгүй холболтыг хэрэгжүүлэх боломжтой дэвшилтэт технологийн нэг болж байна. Энэхүү технологи нь лазер эсвэл гэрлийн долгионыг ашиглан мэдээллийг агаар мандлаар дамжуулдаг бөгөөд оптик холбооны үндсэн зарчимд тулгуурласан утасгүй дамжууллын

систем юм. Чөлөөт орон зайн оптик холбоо нь хот доторх өндөр хурдны point-to-point холболт, дата төвүүдийн хоорондын өгөгдөл дамжуулалт, сансрын холбоо зэрэг олон салбарт өргөн хэрэглэгдэх боломжтой. Гэсэн хэдий ч энэхүү технологийн гүйцэтгэлд атмосферийн орчны нөлөөлөл нь дамжууллын чанарыг бууруулах гол хүчин зүйл болоод байна. Ялангуяа агаарын турбулент байдал, нь оптик долгионы тархалтад нөлөөлж, дохионы сулрал, фазын гажилт, эрчмийн хэлбэлзлийг үүсгэдэг.

Агаарын турбулент байдлыг хэмжихдээ  $C$  параметрыг авч үздэг ба хэрэв

$$C = 10^{-16} \sim 10^{-15} \text{ бол хүчтэй,}$$

$$C = 10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ бол дундаж,}$$

$$C = 10^{-14} \sim 10^{-13} \text{ бол сул турбуленстэй гэж үзнэ.}$$

Энэ нь чөлөөт орон зайн оптик холбооны системийн найдвартай ажиллагаанд сөргөөр нөлөөлөх хүчин зүйл болдог.

Нөгөө талаас, оптик холбооны системийн дамжуулах чадварыг нэмэгдүүлэх зорилгоор гэрлийн долгионы орбитал өнцөг импульсийн шинж чанарыг ашиглах судалгаа сүүлийн жилүүдэд эрчимтэй хөгжиж байна. Орбитал өнцөг импульс

бүхий лазерын туяанууд нь фазын мушгиралттай бүтэцтэй бөгөөд хоорондоо ортогональ горимуудыг ашиглан нэг физик сувгаар олон өгөгдлийн урсгалыг зэрэг дамжуулах боломжийг бүрдүүлдэг. Ийм шинж чанар нь оптик холбооны системийн сувгийн багтаамжийг мэдэгдэхүйц нэмэгдүүлэх боломжийг олгодог бөгөөд ирээдүйн өндөр багтаамжтай холбооны технологийн чухал судалгааны чиглэл болж байна. Иймээс чөлөөт орон зайн оптик холбооны системд атмосферийн турбулент орчны нөлөөллийг онолын болон загварчлалын түвшинд судлах нь чухал ач холбогдолтой юм.

## II. ЧӨЛӨӨТ ОРОН ЗАЙН ОПТИК ДАМЖУУЛАЛ

Чөлөөт орон зайн оптик холбоо нь харилцаа холбооны сүлжээнд өгөгдлийг агаараар буюу чөлөөт орон зайгаар лазер эсвэл гэрлийн долгион ашиглан дамжуулах утасгүй технологи юм. Энэхүү технологи нь шилэн кабелийн холбооны зарчимд тулгуурладаг боловч дамжуулах орчин нь шилэн кабель бус агаар мандал байдаг. FSO (Free Space Optic) систем нь өндөр зурвасын өргөн, лиценз шаарддаггүй спектр ашиглах давуу талтай бөгөөд богино болон дунд зайн өндөр хурдны холболтод өргөн хэрэглэгддэг.

Оптик холбооны системтэй дүйцэхүйц өндөр гүйцэтгэлтэйгээс гадна шилэн кабель татах шаардлага гарахгүй гэх зэрэг онцлог талуудтай.

## III. ОРБИТАЛ ӨНЦГИЙН МОМЕНТОТ (ОӨМ) ДОХИО

Уг судалгааны ажлын гол ойлголт болох орбитал өнцгийн моментум (ОӨМ) нь гэрлийн долгионы фазын мушгиралттай бүтэцтэй холбоотой физик шинж чанартай дохио юм. Энгийн лазер туяа шулуун фазтай байдаг бол ОӨМ агуулсан долгионы фаз нь мушгиа (helical wavefront) хэлбэртэй тархана. Энэ нь тухайн фотон бүр тодорхой хэмжээний өнцгийн импульс агуулна гэсэн ойлголт юм.

ОӨМ-тай долгионы цахилгаан орны фаз дараах хэлбэртэй илэрхийлэгдэнэ:

$$E(r, \phi, z) = A(r, z)e^{i\ell\phi} \quad (1)$$

Энд:

- $\ell$ -мушгиралтын зэрэг

- $\phi$ -өнцөг
- $\ell$ -бүхэл тоо (... , -2, -1, 0, 1, 2, ...)

Фотон бүрийн орбитал өнцгийн момент нь :

$$L = \ell\hbar \quad (2)$$

Энд:

$\hbar$  - планкийн тогтмол

FSO-д уламжлалт лазер дохио нэг сувгаар нэг өгөгдлийн урсгал дамжуулдаг. Тэгвэл Орбитал өнцгийн моментум бүхий дохио нь:

- Мод бүр ортогональ буюу мод бүр нь хоорондоо хөндлөн харилцан нөлөөгүй, нэг модны дохио нөгөө модын дохионд нөлөөлдөггүй.
- Нэг физик сувгаар олон өгөгдлийн урсгал дамжуулах боломжтой.
- тэдгээрийг хооронд нь саадгүйгээр зэрэг ашиглах боломжтой.

Үүнийг ашиглахад сувгийн багтаамж хязгааргүй мэт нэмэгдэх буюу ОӨМ нь сувгийн багтаамжийг нэмэгдүүлэх физик механизм юм.

### A. ОӨМ дохионы төрлүүд

ОӨМ дохионы төрөл бүр нь өөр өөр физик болон математик шинж чанартай бөгөөд тухайн хэрэглээнээс хамааран сонгогддог. Laguerre-Gaussian beam нь суурь загвар болж, харин Bessel, Airy зэрэг beam-үүд нь тархалтын өвөрмөц шинж чанараараа давуу талтай.

Laguerre-Gaussian дохионы математик илэрхийлэл:

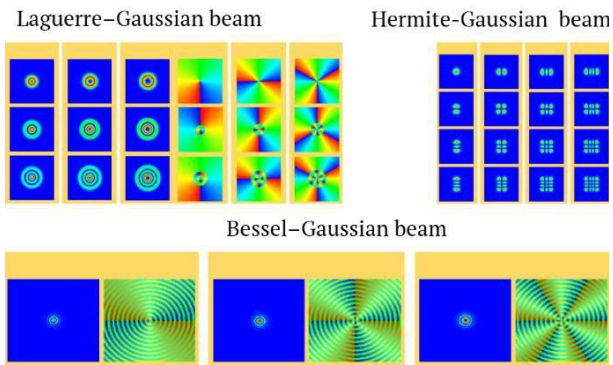
$$U_{LG} = (\rho, \phi, z) = R_{\rho m}(\rho, z)\exp(-im\phi) \quad (3)$$

Hermite-Gaussian дохионы математик илэрхийлэл:

$$U_{HG} = H_p(r, \phi) = H_p\left(\frac{\sqrt{2}}{w_{0x}}\right)\exp\left(-\frac{x^2}{w_{0x}^2}\right)\exp\left(j\frac{\pi x^2}{\lambda R_{0x}}\right) \times H_m\left(\frac{\sqrt{2}}{w_{0y}}\right)\exp\left(-\frac{y^2}{w_{0y}^2}\right)\exp\left(j\frac{\pi y^2}{\lambda R_{0y}}\right) \quad (4)$$

Bessel-Gaussian дохионы математик илэрхийлэл:

$$U_{BG}(\rho, \phi) = J_m(k_r \rho)\exp(im\phi)\exp\left(-\frac{\rho^2}{w_g^2}\right) \quad (5)$$



Зураг 1. ООМ дохионы төрлүүд [1]

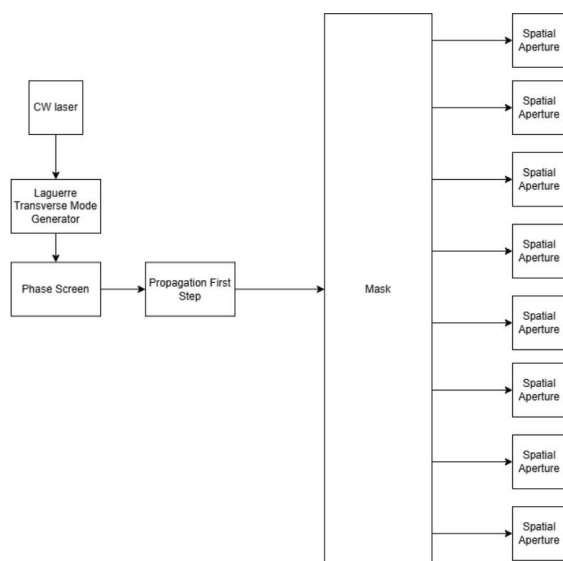
Зураг 1-т ООМ дохионы түгээмэл 3 төрөл болон тэдгээрийн эрчимшил, фазыг харууллаа.

#### IV. ГҮЙЦЭТГЭСЭН АЖИЛ

Уг судалгааны ажил нь дараах 3 зорилгын хүрээнд туршиж, үр дүнд суурилан дүгнэх зорилготой.

1. Aperture diameter -г оновчтой тодорхойлох.
2. Өндөр мод-той дохиог их турбуленстэй орчноор дамжуулах үед хүлээн авах талд хэрхэн таньж байгааг судлах.
3. Дараах тохиолдлуудад оновчтой мод-н тоог тодорхойлох:
  - Тогтмол зайд турбуленсээс хамааруулан.
  - Тогтмол турбуленстэй үед зайнаас хамааруулан.

Симуляцийн блок диаграмыг зураг 2-т харуулав.



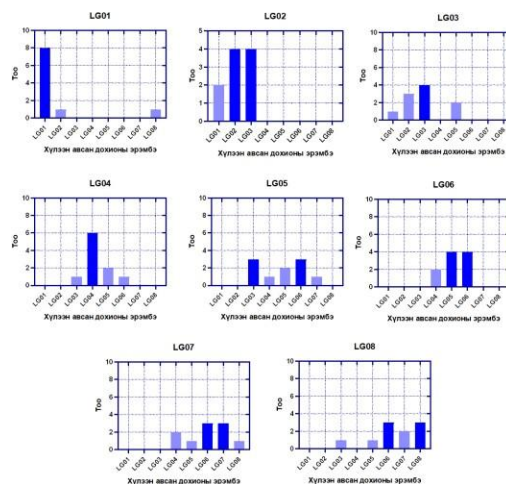
Зураг 2. Блок диаграм

#### V. ҮР ДҮН

##### 1. Aperture Diameter-г оновчтой тодорхойлох

$C = 1 \times 10^{-14}$  турбуленсийн параметертэй буюу дундаж турбуленстэй үед aperture diameter –г 2мм, 3мм, 4мм дээр тус бүр туршсан.

##### 1) 2000μm = 2мм үед



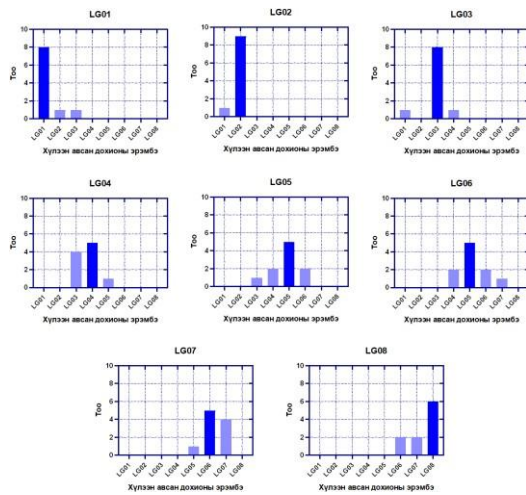
Зураг 3. 2мм үед

Зураг 3-т aperture diameter 2мм үеийн хүлээн авах талд LG дохионууд хэрхэн танигдсан болохыг үзүүлэв.

- Энэ үед LG01 дамжуулахад хүлээн авах талд зөв таних магадлал  $LG01 \rightarrow LG01$  (80%)
- LG02 дамжуулбал хүлээн авах талд LG02 гэж зөв таних магадлал 40% гэх мэтчилэн:  
 $LG03 \rightarrow LG03$ (40%)  $LG04 \rightarrow LG04$ (60%)  
 $LG05 \rightarrow LG05$ (20%)  $LG06 \rightarrow LG06$ (40%)  
 $LG07 \rightarrow LG07$ (30%)  $LG08 \rightarrow LG08$ (30%)

Үүнийг хангалтгүй үр дүн гэж үзнэ.

##### 2) 3000μm = 3мм үед



Зураг 4. 3мм үед

Зураг 4-д aperture diameter 3мм үеийн хүлээн авах талд LG дохионууд хэрхэн танигдсан болохыг үзүүлэв.

- Зураг 4-с үзвэл LG01 дамжуулахад хүлээн авах талд зөв таних магадлал LG01→LG01 (80%)
- LG02 дамжуулбал хүлээн авах талд LG02 гэж зөв таних магадлал 90% гэх мэт:  
 LG03→LG03(80%) LG04→LG04(50%)  
 LG05→LG05(50%) LG06→LG06(50%)  
 LG07→LG07(50%) LG08→LG08(60%)

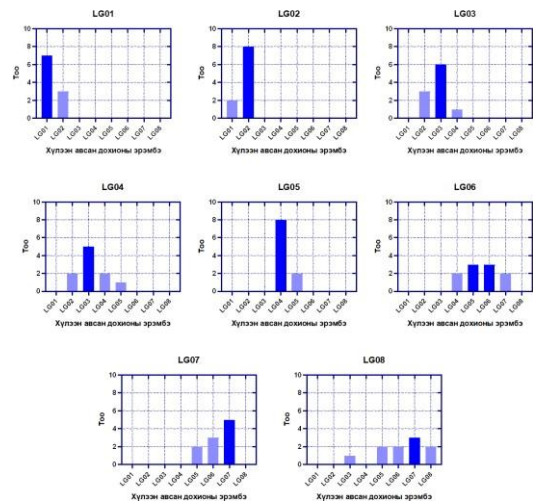
LG01, LG02, LG03 дохиог хүлээн авах талд амжилттай таньж чадаж байгаа учир 1,2,3 модын дохиог хэрэглэхийг зөвлөж байна. Уг модууд болон тэдгээрийн эсрэг фазтай модуудыг хэрэглэснээр сувгийн багтаамжийг 6 дахин нэмэгдүүлнэ:

$$m=0,1 \quad m=0,2 \quad m=0,3$$

$$m=0,-1 \quad m=0,-2 \quad m=0,-3$$

3) 4000μм = 4мм үед

Зураг 5-д aperture diameter 4мм үеийн хүлээн авах талд LG дохионууд хэрхэн танигдсан болохыг графикаар үзүүлэв.



Зураг 5. 4мм үед

- Энэ үед LG01 дамжуулахад хүлээн авах талд зөв таних магадлал LG01→LG01 (70%)

- LG02 дамжуулбал хүлээн авах талд LG02 гэж зөв таних магадлал 90% гэх мэтчилэн:

$$LG03 \rightarrow LG03(60\%) \quad LG04 \rightarrow LG04(50\%)$$

$$LG05 \rightarrow LG05(80\%) \quad LG06 \rightarrow LG06(30\%)$$

$$LG07 \rightarrow LG07(50\%) \quad LG08 \rightarrow LG08(30\%)$$

Үүнийг хангалттай үр дүн гэж үзэхэд дутагдалтай байна.

Дээрх 3 тохиолдлуудыг харьцуулбал 3мм-н aperture diameter хамгийн тохиромжтой гэдгийг тодорхойллоо.

2. Тогтмол зайд турбуленсын хэмжээнээс хамааруулан тохиромжтой мод-г тодорхойлох

Өгөгдөл:

$$l = const = 500\text{м}$$

$$C = 1 \times 10^{-15}$$

$$C = 4 \times 10^{-15}$$

$$C = 7 \times 10^{-15}$$

$$C = 10 \times 10^{-15}$$

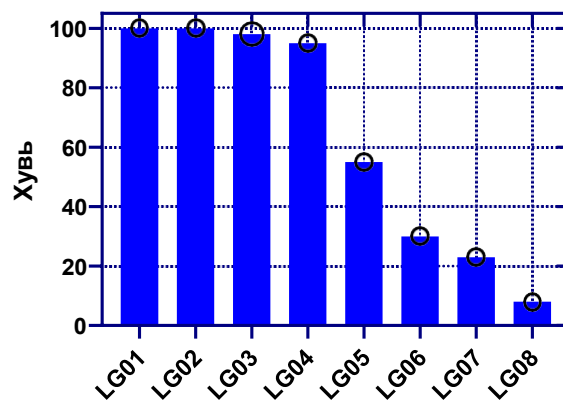
Хүснэгт 1 ба зураг 6-д тогтмол 500м-н зайтай, турбуленсийн хэмжээ өгөгдсөн утгуудын үед хүлээн авах талд LG дохиог хэдэн хувийн гүйцэтгэлтэй таньж байгааг харууллаа.

ЗАЙ ТУРБУЛЕНСЭЭС ХАМААРСАН ХАМААРЛЫН ХҮСНЭГТ

1-Р ХҮСНЭГТ

$l =$								
$const =$								
500м								
$C = 1 \times$								
$10^{-15}$								
$C = 4 \times$								
$10^{-15}$								
$C = 7 \times$								
$10^{-15}$								
$C =$								
$10 \times$								
$10^{-15}$								
Хүснэгт 1 ба зураг 6-д тогтмол 500м-н зайтай, турбуленсийн хэмжээ өгөгдсөн утгуудын үед хүлээн авах талд LG дохиог хэдэн хувийн гүйцэтгэлтэй таньж байгааг харууллаа.								
Зай Турбуленсээс Хамаарсан Хамаарлын	LG 01	LG 02	LG 03	LG 04	LG 05	LG 06	LG 07	LG 08

САН ХАМААРЛЫН ХҮСНЭГТ	1-Р ХҮСНЭГТ							
C/m								
1	100%	100%	100%	100%	10%	0%	0%	0%
4	100%	100%	100%	100%	80%	30%	30%	0%
7	100%	100%	100%	100%	70%	30%	30%	0%
10	100%	100%	90%	80%	60%	60%	30%	30%



Зураг 6. Зай турбуленсээс хамаарсан хамаарлын график

Графикаас үзвэл:

- турбуленс ихсэх тусам хүлээн авах талд дохио амжилттай танигдах магадлал багасч байна.
- 0-с 8 хүртэлх модын LG дохионууд нь хамгийн ихдээ хэд хүртэлх турбуленстэй орчинд амжилттай дамжих вэ гэдгийг харж болно:

LG01, LG02, LG03, LG04 дохионууд  $C = 1 \times 10^{-14}$  хүртэл турбуленстэй орчинд 100 хувийн гүйцэтгэлтэй дамжиж байгаагаас дүгнэвэл:

- 500м –н дамжууллын тохиолдолд дээрх 4 мод-г ашиглахыг зөвлөж байна. Ингэснээр сувгийн багтаамжийг 8 дахин нэмэгдүүлэх боломжтой.

3. Тогтмол турбуленстэй үед зайнаас хамааруулан тохиромжтой мод-2 тодорхойлох

Өгөгдөл:

$$C = 1 \times 10^{-14}$$

$$l = 250\text{м}$$

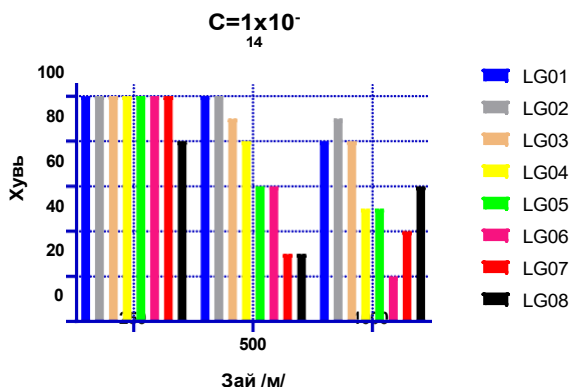
$$l = 500\text{м}$$

$$l = 1000\text{м}$$

ТУРБУЛЕНС ЗАЙНААС ХАМААРСАН ХАМААРЛЫН ХҮСНЭГТ

2-Р ХҮСНЭГТ

l/m	LG 01	LG 02	LG 03	LG 04	LG 05	LG 06	LG 07	LG 08
250	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	80%
500	100 %	100 %	90%	80%	60%	60%	30%	30%
1000	80%	90%	80%	50%	50%	20%	40%	60%



Зураг 7. Турбуленс зайнаас хамаарсан хамаарлын график

2-р хүснэгт болон 7-р зурагт турбуленсийн хэмжээ тогтмол  $C = 1 \times 10^{-14}$  үед 250м, 500м, 1000м-н зайд LG дохиог дамжуулахад хүлээн авах тал хэдэн хувийн гүйцэтгэлтэй таньж байгааг харууллаа.

Графикаас үзэхэд:

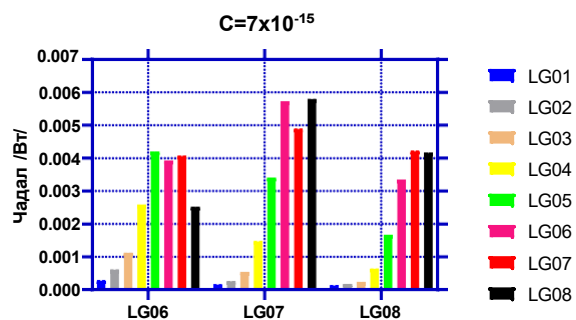
- Зай нь LG дохионы мод-с урвуу хамааралтай буюу зай ихсэх тусам хүлээн авах талд амжилттай танигдах магадлал буурч байна.
- 250м үед 0-с 8-р мод
- 500м үед 0-с 4-р мод

- 1000м үед 0-с 3-р модын LG дохио ашиглахыг зөвлөж байна. Ингэснээр сувгийн багтаамжийг 16, 8, 6 дахин нэмэгдүүлнэ.

4. Өндөр мод-той дохиог их турбуленстэй орчноор дамжуулах үед хүлээн авах талд хэрхэн таньж байгааг судлах

Өгөгдөл:

$$C = 7 \times 10^{-15}, l = 500\text{м}$$



Зураг 8. Хүлээн асан дохионы чадлын график

Зураг 8-д LG06, LG07, LG08 дохионууд хүлээн авах талд хэрхэн танигдаж байгааг харууллаа.

Графикаас үзэхэд өндөр мод-н дохиог өндөр турбуленстэй орчноор дамжуулах үед дамжуулсан мод-н дохио хүлээн авах талд 2 хажуугийн мод-руугаа шилжиж байгаа буюу 2 хажуугийн дохиотой эндүүрэгдэж танигдах магадлал өндөр гэдэг нь харагдаж байна.

### ДҮГНЭЛТ

1. Турбуленс ихсэх тусам хүлээн авах талд дохио амжилттай танигдах магадлал багасч байна.
2. Зай нь ОӨМ дохионы мод-с урвуу хамааралтай буюу зай ихсэх тусам хүлээн авах талд амжилттай танигдах магадлал буурч байна.
3. Дунд хэмжээний турбуленстэй ( $C = 1 \times 10^{-14}$ ), 500м –н зайн дамжууллын үед LG01, LG02, LG03, LG04 мод-уудыг ашиглахыг зөвлөж байна. Ингэснээр сувгийн багтаамжийг 8 дахин нэмэгдүүлнэ.
4.  $C = 1 \times 10^{-14}$  турбуленстэй үед
  - 250м-д LG01-с LG08-р мод

- 500м-д LG01-с LG04-р мод
  - 1000м-д LG01-с LG03-р модын дохио хэрэглэхийг зөвлөж байна. Ингэснээр сувгийн багтаамжийг 16, 8, 6 дахин нэмэгдүүлнэ.
5. Өндөр мод-н дохиог өндөр турбуленстэй орчноор дамжуулах үед дамжуулсан мод-н дохио хүлээн авах талд 2 хажуугийн мод-руугаа шилжиж байгаа буюу 2 хажуугийн дохиотой эндүүрэгдэж танигдах магадлал өндөр.
6. 3мм-н aperture diameter хамгийн тохиромжтой.

#### **АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ**

- [1] Н. К. N. G. S. Munkhbayar Adiya, "8-ary orbital angular momentum shift keying for free-space optical communication system," pp. 026102-026102, 1 2 2020.

# МОНГОЛ ХЭЛЭН ДЭЭРХ АУДИО-ЗУРАГ-ТЕКСТ ОРОЛТТОЙ МУЛЬТИМОДАЛ ХЭЛНИЙ ЗАГВАРЫН ҮР АШИГ, ХУРДЫН УРЬДЧИЛСАН СУДАЛГАА

Бямбасүрэнгийн ЭНХЗУЛ<sup>1</sup>, Жаргалсайханы ОРГИЛ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Мэдээлэл Холбооны Технологийн сургууль, Компьютерийн ухааны

ТЭНХИМ

[enkhzulb0217@gmail.com](mailto:enkhzulb0217@gmail.com)

**Хураангуй:** Энэхүү өгүүлэлд нөөц багатай хэл болох монгол хэлэнд зориулсан аудио-зураг-текст оролтоос текст хариу үүсгэдэг мультимодал хэлний загварын сургалтын чиглэлийг танилцуулж, уламжлалт pipeline загвартай харьцуулах урьдчилсан үр дүнг нэгтгэн үзүүлэв. Судалгааны үндсэн зорилго нь яриаг эхлээд автомат яриа танилтын загвараар текст болгон хувиргаад дараа нь визуал-хэлний загварт оруулах олон шатат pipeline хандлагаас илүү үр ашигтай, бага хоцролттой, нэгдмэл мультимодал шийдэл монгол хэл дээр хэрэгжих боломжтой эсэхийг шалгах явдал юм. Судалгаанд хоёр үндсэн тууришилтыг хийсэн болно. Нэгдүгээрт, Whisper-Medium яриа танилтын загвар болон Qwen3-VL-4B визуал-хэлний загварыг монгол хэл тохируулан сургасан. Хоёрдугаарт, Whisper-Medium энкодерийн аудио эмбэddинг projection давхаргаар Qwen3-VL-4B загварын декодорттой холбож, аудио-зураг-текст оролтоос шууд текст хариу үүсгэдэг архитектурыг судлав. Одоогийн байдалаар англи хэлний LibriSpeech 100 цагийн өгөгдөл дээр projection сургалт хийхэд MLP (Multilayer Perceptron) projector ойролцоогоор 0.9, Q-Former projector ойролцоогоор 0.7 алдагдалд хүрч, аудио эмбэddинг хэлний загварт тогтвортой холбож сургах боломжтойг харуулав. Мөн Common Voice болон өөрийн цуглуулсан аудио өгөгдлөөр Whisper-Medium загварыг монгол хэлэнд тохируулан сургахад алдагдал 0.02 орчим, Qwen3-VL-4B-Instruct загварыг instruction хэлбэрийн 32 мянга орчим текст өгөгдлөөр тохируулан сургахад алдагдал 1.7, 50 мянга орчим зураг-текст өгөгдлөөр тохируулан сургахад алдагдал 1.7 орчим гарсан. Эдгээр үр дүн нь монгол хэл дээр аудио төлөөллийг визуал-хэлний загварт холбох техникийн боломж байгааг харуулж байгаа боловч pipeline ба мультимодал системийн чанар, хурдын эцсийн харьцуулалт нь аудио-зураг-текст буюу видео сургалт болон нэгдсэн үнэлгээ дууссаны дараа бүрэн баталгаажих юм.

Түлхүүр үг: pipeline, projection давхарга, яриа танилтын загвар, визуал-хэлний загвар, instruction-tuning

## I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд аудио, зураг, текстийг зэрэг боловсруулдаг мультимодал хэлний загварууд эрчимтэй хөгжиж байгаа боловч монгол хэл зэрэг нөөц багатай хэл дээр ийм төрлийн ажлын тоо цөөн хэвээр байгаа бөгөөд бодит хэрэглээнд уламжлалт pipeline бүтэц түгээмэл ашиглагддаг. Энэ бүтэц нь эхлээд яриаг текст болгох, дараа нь гарсан текст болон зургийг хэлний эсвэл визуал-хэлний загварт боловсруулах дараалалтай тул алдаа дамжих, хоцролт нэмэгдэх сул талтай.

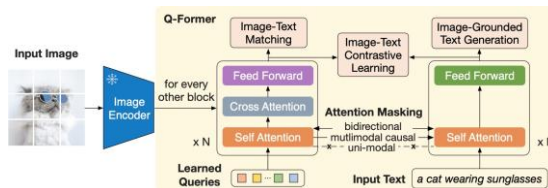
Энэ судалгааны ажил нь монгол хэл дээр аудио-оролттой мультимодал хэлний загвар сургах боломжийг инженерийн түвшинд батлах, мөн pipeline хандлагаас илүү хурдан, үр ашигтай шийдэл гаргах боломжийг шалгах зорилготой. Судалгааны хэрэглээний хүрээ нь ерөнхий зориулалтын хиймэл оюун биш, харин бага ангийн сургалтын туслах системд төвлөрсөн.

Энэхүү өгүүллийн гол хувь нэмэр нь дараах гурван чиглэлд оршино. Нэгдүгээрт, Whisper энкодерийн аудио эмбэddинг Qwen3-VL загварт холбох MLP болон Q-Former төрлийн projection архитектуруудыг хэрэгжүүлж харьцуулсан.

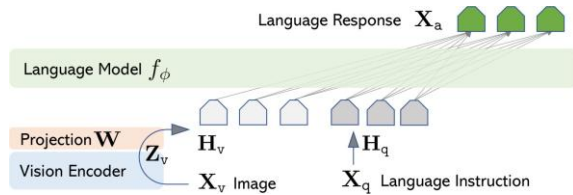
Хоёрдугаарт, монгол хэл дээр ASR болон VL суурь загваруудыг тус тусад нь тохируулан сургаж, дараагийн нэгдсэн мультимодал сургалтын үндсийг бүрдүүлсэн. Гуравдугаарт, pipeline болон төгсгөлөөс төгсгөлд мультимодал загварыг хурд, чанарын хэмжүүрээр харьцуулах үнэлгээний загварыг тодорхойлсон.

## II. ХОЛБОГДОХ АЖЛУУД

Дуу авианы мэдээллийг том хэлний загварт (LLM) холбох чиглэлд projection давхарга, query token болон cross-attention механизм өргөн хэрэглэгдэж байна. BLIP-2 загвар нь Q-Former архитектурыг ашиглан frozen encoder болон хэлний загварын хооронд үр ашигтай холболт үүсгэх боломжийг харуулсан бол LLaVA төрлийн ажлууд нь харьцангуй энгийн MLP projection ч практикт үр дүнтэй байж болохыг нотолсон [2], [3].

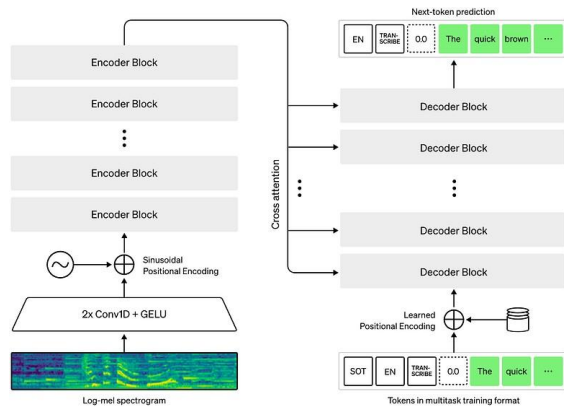


1-р зураг. Q-Former загварын архитектур болон BLIP-2 загварын эхний шатны сургалтын давхарга



2-р зураг. LLaVA сүлжээний архитектур

ASR (Automatic Speech Recognition) чиглэлд Whisper загвар нь олон хэлний яриа танилсад өндөр гүйцэтгэлтэй суурь болж, parameter-efficient fine-tuning (жишээлбэл LoRA) аргуудтай хослуулснаар нөөц хязгаарлагдмал орчинд ашиглах боломжийг нэмэгдүүлсэн [1], [4].



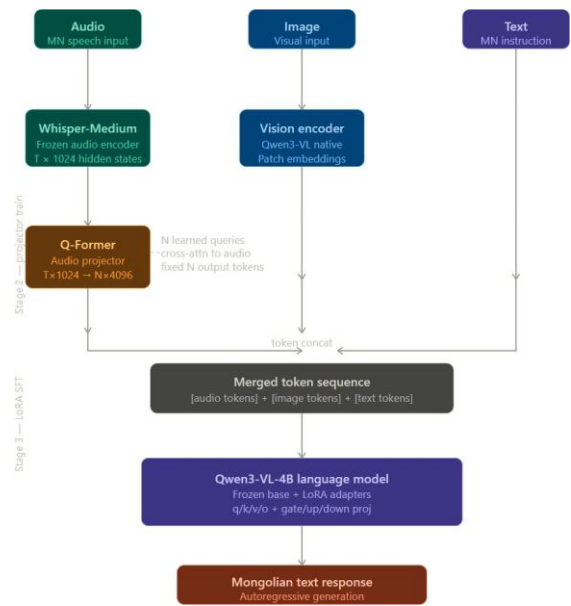
3-р зураг. Whisper ASR загварын архитектур

Гэсэн хэдий ч монгол хэл дээр аудио, дүрс, текстийг нэгтгэсэн нэгдмэл мультимодал хэлний загварын туршилт харьцангуй хомс хэвээр байна. Иймээс энэхүү ажил нь олон улсын түгээмэл архитектурыг монгол хэлний нөхцөлд хэрэгжүүлж, инженерийн хэрэгжих боломж болон урьдчилсан үр дүнг харуулснаараа шинэлэг ач холбогдолтой.

### III. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

#### A. Whisper-д суурилсан аудио-дүрс-текст нэгтгэсэн загварын архитектур

Энэхүү судалгаанд аудио, дүрс, текст гэсэн гурван төрлийн өгөгдлийг нэгтгэн боловсруулж, нэг алхамаар текст хариу үүсгэх мультимодал загварын архитектурыг санал болгож байна. Тус архитектурын үндсэн санаа нь аудио дохиог хэлний загварын embedding орон зайд шууд холбох явдал юм.



4-р зураг. Whisper ASR загварын архитектур

Үүний тулд Whisper-Medium загварын encoder хэсгийг аудио төлөөлөл (audio representation) гаргагч болгон ашигласан. Whisper encoder нь ярианы дохиог хугацааны дараалал бүхий өндөр хэмжээсийн hidden state болгон хувиргадаг бөгөөд эдгээр төлөөлөл нь фонем, үгийн бүтэц, интонаци зэрэг мэдээллийг агуулдаг.

Гэвч эдгээр төлөөллийг шууд мультимодал хэлний загварт оруулах боломжгүй тул projection давхаргыг ашиглан Qwen3-VL-4B-Instruct загварын embedding орон зайд шилжүүлнэ. Энэ нь хоёр өөр загварын төлөөллийн орон зайг уялдуулах үндсэн алхам юм.

Энэхүү projection механизмыг хоёр өөр хувилбараар хэрэгжүүлсэн:

#### 1) MLP-д суурилсан projection

Энэ хувилбарт олон давхаргат перцептрон (MLP) ашиглан аудио hidden state-ийг шугаман бус хувиргалтаар VL embedding орон зайд буулгана. Үүнтэй хамт дараах нэмэлт механизмуудыг ашигласан:

- **Temporal pooling:** Урт аудио дарааллыг хураангуйлах
- **Stride scheduling:** хугацааны алхмын нягтралыг динамикаар өөрчлөх
- **Token cap:** VL загварт орох токены дээд хэмжээг хязгаарлах

10 секундийн аудио оролт Whisper encoder-оос ~1500 timestep гаргах боломжтой. Үүнийг шууд ашиглавал VL загварт хэт олон токен үүсч, санах

ойн ачаалал нэмэгдэнэ. Харин pooling болон stride ашигласнаар үүнийг ~128–256 токен болгон багасгах боломжтой.

## 2) Q-Former-д суурилсан projection

Энэ хувилбарт learnable query token-уудыг ашиглан аудио төлөөлөлтэй cross-attention хийж, тогтмол урттай мультимодал төлөөлөл үүсгэнэ. Өөрөөр хэлбэл, аудио дарааллын бүх мэдээллийг query token-ууд “шүүж авч”, семантик нягт төлөөлөл болгон хувиргана.

32 ширхэг query token ашиглахад ямар ч урттай аудио оролтоос тогтмол 32 мультимодал токен гарна. Энэ нь:

- санах ойн хэрэглээг тогтвортой болгох
- урт аудио дээр ч гүйцэтгэл хадгалах

давуу талтай.

### *В. Сургалтын стратеги ба параметрийн оновчлол*

Сургалтыг хоёр үе шаттайгаар зохион байгуулсан нь загварын тогтвортой байдал болон нөөцийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх зорилготой.

Нэгдүгээр үе шат:

Мультимодал хэлний загварыг (Qwen3-VL) frozen байдалд хадгалж, зөвхөн projection давхаргыг сургана. Энэ нь аудио төлөөллийг зөв embedding орон зайд буулгах суурь чадварыг эзэмшүүлэхэд чиглэнэ.

Хоёрдугаар үе шат:

Projection давхарга тогтворжсоны дараа LoRA (Low-Rank Adaptation) аргыг ашиглан хэлний загварын тодорхой давхаргуудыг зөөлөн fine-tune хийнэ.

Жишээлбэл, бүх параметрийг сургахын оронд зөвхөн attention болон feed-forward блокуудад бага хэмжээний rank-update оруулснаар:

- GPU санах ой хэмнэх
- сургалтын хугацааг багасгах
- overfitting-ээс сэргийлэх

боломж бүрдэнэ.

## IV. ӨГӨГДӨЛ БА СУРГАЛТЫН

Projection давхаргын сургалтыг LibriSpeech өгөгдөл дээр хийсэн. LibriSpeech нь ойролцоогоор 1000 цагийн англи хэлний уншсан ярианы өгөгдөл бүхий нээлттэй корпус бөгөөд аудио төлөөлөл

сурах туршилтын суурь орчинд өргөн хэрэглэгддэг.

Whisper-Medium загварыг fine-tuning хийхэд дараах өгөгдөл болон аргуудыг ашигласан:

- Common Voice монгол хэлний корпус
- Өөрийн цуглуулсан 6 цагийн аудио өгөгдлийг тус тус ашигласан.
- 4-bit quantization (санах ой хэмнэх)
- LoRA fine-tuning (parameter-efficient сургалт)
- gradient checkpointing (урт дараалал боловсруулах) аргуудыг тохируулсан.

Сургалтыг V100 32GB GPU орчинд хийсэн. Мөн сургалтын pipeline-д:

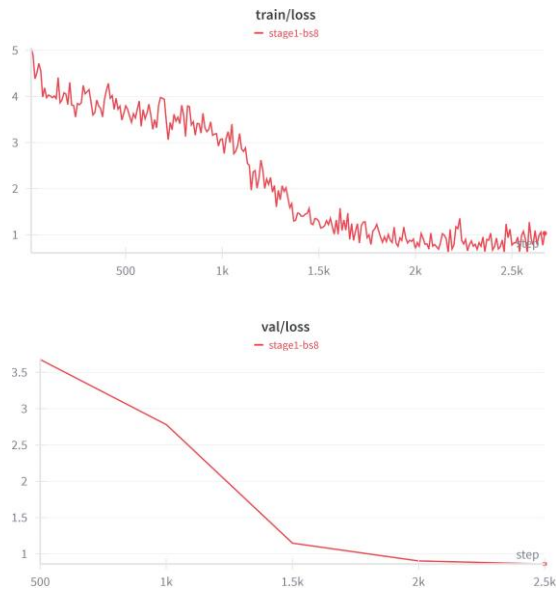
- аудио урт шүүх
- аудио шуугиан дарах
- текст нормчлох
- train/test хуваалт
- WER, CER үнэлгээ

зэрэг боловсруулалтын урсгалыг хэрэгжүүлсэн.

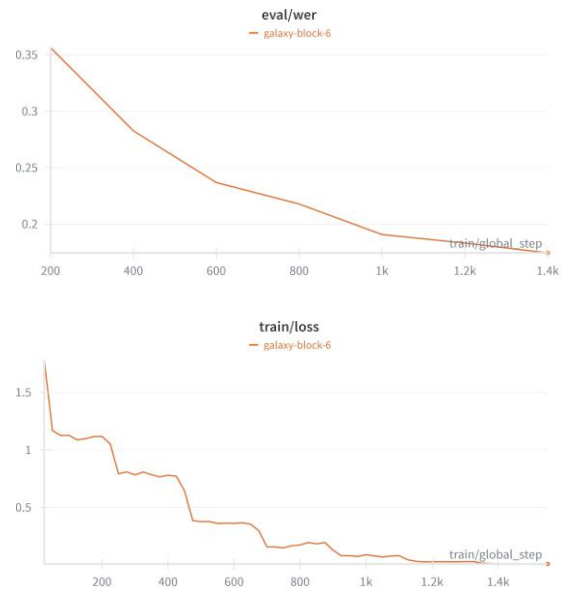
Монгол хэлний VL ойлголтод зориулж Qwen3-VL-4B-Instruct загварыг instruction төрлийн 32 мянга орчим текст өгөгдөл болон 50 мянга орчим LLaVA-Instruct-150K зураг-текст өгөглийг Gemini-3-flash ашиглан орчуулж supervised fine-tuning хийсэн. Сургалт хийхдээ LoRA target modules, chat template, label masking, image processing зэрэг мультимодал сургалтын бүрэлдэхүүнүүдийг тохируулсан.

## V. УРЬДЧИЛСАН ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Projection сургалтын англи туршилтаар MLP projector-ийн loss ойролцоогоор 0.9, Q-Former projector-ийн loss ойролцоогоор 0.7 хүрсэн. Энэ нь аудио төлөөллийг VL embedding орон зайд сургаж холбох боломжтойг харуулсан. Q-Former хувилбар нь learnable query token ашигласнаар илүү тогтвортой хураангуйлалт өгч байж болох шинж тэмдэг ажиглагдсан.



5-р зураг. Q-Former projector-ийн сургалтийн лог



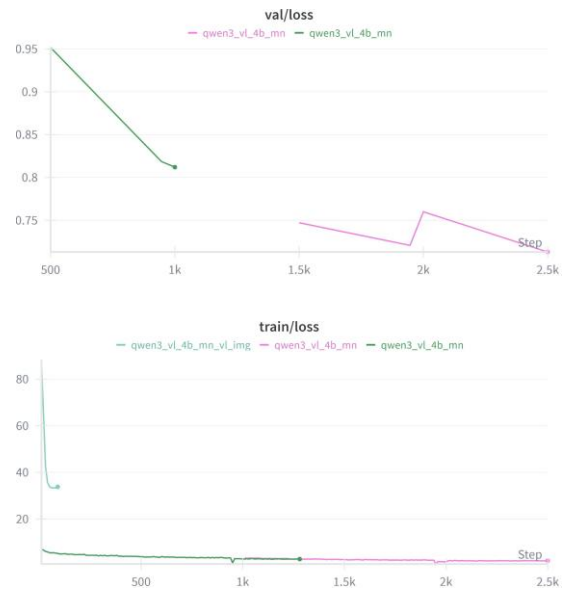
6-р зураг. Whisper-Medium монгол хэлний сургалтийн лог

Монгол ASR fine-tuning туршилтад Whisper-Medium загварын сургалтын loss ойролцоогоор 0.02 хүрсэн бөгөөд цаашид Faster-Whisper форматаар хөрвүүлэн pipeline baseline-ийн хурд хэмжихэд ашиглахад 10 секунд аудиог CPU inference ойролцоогоор 1-1.2 секундэд хөрвүүлсэн.

step	train loss	eval wer	eval cer
500	0.375	0.236	0.111
1000	0.088	0.19	0.071
1500	0.009	0.174	0.052

1-р хүснэгт. Whisper-Medium монгол хэлний сургалтийн лог

Монгол хэлний Qwen3-VL text-only fine-tuning-ийн loss ойролцоогоор 1.7 гарсан нь суурь хэлний ойлголтыг сайжруулах шат амжилттай явагдсаныг илтгэнэ.



7-р зураг. Qwen3-VL-4B монгол хэлний сургалтийн лог

Жишээ үр дүнгүүд:

**Whisper-Medium + Qwen3-VL-4B = Pipeline**

Хугацаа: 3.4 сек

Ref: you spilt your coffee on me it is a expensive shirt how dare you

User: What about the woman arguing?

Model: The woman is being **\*\*rude and aggressive\*\***. She is making a big deal out of a minor

incident and using sarcasm and anger to accuse the other person of being disrespectful.

### Whisper-Medium + Q-Former Projector + Qwen3-VL-4B = Multimodal

Хугацаа: 2.1 сек

User: What about the woman arguing?

Model: The woman is arguing because she believes the man acted carelessly or maliciously by spilling coffee on her shirt, which she considers a valuable and expensive item.

### Whisper-Medium ASR

Language: mn, probability: 1.000

Segments:

[0.00s -> 2.52s] гуравдугаар бүлэг.

[2.52s -> 10.24s] гучин түрэгдэхээр зүйл нэгдэх хэсэг, ерөнхийлөгч бүрэн эрхийхээ хүрээнд хуульд нийцүүлэн зарлиг гаргана.

[10.24s -> 19.84s] хоёрдох хэсэг ерөнхийлөгчийн зарлиг хуульд нийцээгүй бол ерөнхийлөгч өөрөө буюу улсыг хурал хүчимгүй болгана.

### Qwen3-VL-4B

--- Prompt 1 ---

User: Бат 12 алимтай байсан. Тэр 3 найздаа тус бүр 2 алим өгөөд, дараа нь өөрөө 1 алим идэв. Батад хэдэн алим үлдсэн бэ?

Model: 1. Бат 12 алимтай байсан.

2. 3 найздаа тус бүр 2 алим өгөхөд нийт 6 алим зарцуулах ( $3 * 2 = 6$ ).

3. Үлдсэн алим:  $12 - 6 = 6$  алим.

4. Бат өөрөө 1 алим идэхэд:  $6 - 1 = 5$  алим үлдсэн.

Хариу: Батад 5 алим үлдсэн.

--- Prompt 2 ---

User: Өнөөдөр Мягмар гараг. 7 хоногийн дараа ямар гараг болох вэ?

Model: Хэрэв өнөөдөр Мягмар гараг бол 7 хоногийн дараа дахин Мягмар гараг байх болно.

--- Prompt 3 ---

User: Монгол улсын нийслэл юу вэ?

Model: Монгол улсын нийслэл бол Улаанбаатар хот юм.

Гэсэн хэдий ч эдгээр үр дүн нь одоогоор монгол хэл дээрх мултимодал загварын чанарын эцсийн хэмжүүр биш юм. Audio-image-text нэгтгэсэн үнэлгээ, pipeline ба end-to-end системийн latency, response time, task accuracy, хэрэглээний түвшний харьцуулалт хараахан дуусаагүй байна. Иймээс энэхүү өгүүллийн гол дүгнэлт нь архитектур сургаж холбох боломжтой гэсэн инженерийн

нотолгоо бөгөөд pipeline-с бүх талаар давсан гэсэн эцсийн нотолгоо биш.

Цаашдын үнэлгээнд WER, CER, real-time factor, total response latency, мөн видео ойлголтын benchmark дээрх хэмжүүрүүдийг ашиглана.

### ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаа нь монгол хэл дээр аудио төлөөллийг визуал-хэлний мултимодал загварт projection давхаргаар холбох боломжтойг урьдчилсан байдлаар харууллаа. Англи өгөгдөл дээрх MLP болон Q-Former projector сургалтын үр дүн нь архитектурын инженерийн боломжийг баталж, монгол хэл дээрх ASR болон VL fine-tuning шатууд амжилттай хэрэгжиж эхэлснийг харуулав.

Одоогийн байдлаар MLP projector, Q-Former projector, Whisper-Medium монгол ASR, Qwen3-VL монгол text SFT гэсэн дөрвөн суурь шат амжилттай хэрэгжсэн бөгөөд vision-text сургалт болон pipeline харьцуулалтын шат дараагийн ажлаар үргэлжилж байна.

Судалгааны гол практик ач холбогдол нь бага ангийн боловсролын туслах системд зориулсан дуут, зурагтай, монгол хэлний харилцан үйлчлэлийг нэгтгэсэн загварын үндсийг тавьж байгаа явдал юм. Цаашид vision-text болон end-to-end мултимодал сургалт бүрэн дууссаны дараа pipeline ба нэгдсэн системийн хурд, чанарын харьцуулалтыг эцэслэн гаргаж, монгол хэл дээр мултимодал LLM ашиглах бодит үр ашгийг нарийвчлан дүгнэнэ.

### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] A. Radford et al., "Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision," in Proceedings of ICML, 2023.
- [2] J. Li, D. Li, C. Xiong, and S. Hoi, "BLIP-2: Bootstrapping Language-Image Pre-training with Frozen Image Encoders and Large Language Models," in Proceedings of ICML, 2023.
- [3] H. Liu et al., "Visual Instruction Tuning," in Advances in Neural Information Processing Systems, 2023.
- [4] E. J. Hu et al., "LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models," in Proceedings of ICLR, 2022.
- [5] R. Rafailov et al., "Direct Preference Optimization: Your Language Model is Secretly a Reward Model," in Advances in Neural Information Processing Systems, 2023.
- [6] V. Panayotov, G. Chen, D. Povey, and S. Khudanpur, "LibriSpeech: An ASR Corpus Based on Public Domain Audio Books," in Proceedings of ICASSP, 2015.
- [7] Mozilla Foundation, "Common Voice Platform and Dataset," online resource, 2025.
- [8] Qwen Team, "Qwen3-VL-4B-Instruct Model Card," Hugging Face, 2025.
- [9] Google, "Gemma-3n-E4B Model Card," Hugging Face, 2025.

[10] E. Casanova et al., “XTTS: A Massively Multilingual Zero-Shot Text-to-Speech Model,” arXiv:2406.04904, 2024.