



**ХАРИЛЦАА ХОЛБООНЫ
ЗОХИЦУУЛАХ ХОРОО**



**МОНГОЛ УЛСЫН ШИНЖЛЭХ
УХААН ТЕХНОЛОГИЙН ИХ
СУРГУУЛЬ**

**МЭДЭЭЛЭЛ, ХОЛБООНЫ
ТЕХНОЛОГИЙН СУРГУУЛЬ**

**5G ХОЛИМОГ СҮЛЖЭЭНД МЭДЭЭЛЛИЙН АЧААЛЛЫГ
ШИЛЖҮҮЛЭХ (TRAFFIC OFFLOAD) БОЛОМЖ, ТҮҮНИЙ ҮР
АШГИЙН СУДАЛГАА**

Зөвлөх үйлчилгээний тайлан

**Боловсруулсан: МХТС-ийн ХИТ-ийн зөвлөх профессор, доктор Б.Отгонбаяр
МХТС-ийн ХИТ-ийн ахлах багш, доктор Р.Баярмаа**

S

**Улаанбаатар
2025.9.23**

ГАРЧИГ

ӨМНӨХ ҮГ	3
I. 5G/Wi-Fi АЧААЛАЛ ШИЛЖҮҮЛЭХ ТЕХНОЛОГИЙН ХЭРЭГЛЭЭ, ҮНДЭСЛЭЛ	4
1.1 Олон улсын туршлага, харьцуулалт	4
1.2 5G сүлжээнд ачаалал ихсэх шалтгаан	5
1.3 Холимог сүлжээний хэрэгжилтэд хиймэл оюун ухаан ашиглах боломж.....	6
1.5 I. Бүлгийн дүгнэлт	18
II. 5G/WI-FI СҮЛЖЭЭНИЙ БҮТЭЦ, БҮРЭЛДЭХҮҮН ХЭСГҮҮД	19
2.1 5G /Wi-Fi-ийн үндсэн зарчим	19
2.2 Холимог сүлжээнд хэрэгжүүлэх стандартууд	20
2.3 5G ба Wi-Fi интегралчлал.....	24
2.4 5G сүлжээний ерөнхий бүтэц, хэрэгжүүлэх хувилбарууд	26
2.5 II. Бүлгийн дүгнэлт.....	30
III. 5G/Wi-Fi АЧААЛАЛЫГ ШИЛЖҮҮЛЭХ АРГА, ТЕХНОЛОГИ	31
3.1 Холимог сүлжээнд 5G/Wi-Fi ачаалал шилжүүлэхэд босгын түвшин тодорхойлох судалгаа	31
3.2 Wi-Fi Offloading (IP Flow Mobility / IFOM)	33
3.3 ATSSS (Access Traffic Steering, Switching, Splitting)	34
3.4 ANDSF (Access Network Discovery and Selection Function)	36
3.5 Local Breakout (LBO)	37
3.6 QoE-based Intelligent Offloading (AI/ML ашиглах).....	38
3.7 5G/Wi-Fi ачааллыг шилжүүлэх туршилт	40
3.8 5G/Wi-Fi ачааллыг шилжүүлэхэд нөлөөлөх хүчин зүйлийн судалгаа	42
3.9 Улаанбаатар хотын ачаалал ихтэй хэсэгт ачаалал шилжүүлэх тооцоо	43
3.10 Offloading хэрэглэх эдийн засгийн үр ашгийн тооцоо	46
3.11 5G Wi-Fi бодит хэрэглээний платформууд.....	48
3.12 III. Бүлгийн дүгнэлт	57
ТОВЧИЛСОН ҮГИЙН ЖАГСААЛТ	59
АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ	61
ХАВСРАЛТ	63

ӨМНӨХ ҮГ

Ачаалал шилжүүлэх (traffic offloading) нь 5G цөм сүлжээний мэдээллийн хэт ачааллыг бууруулах, үүрийн захын бүрхэлтийг нэмэгдүүлж үйлчилгээний чанарыг сайжруулах, зардлыг хэмнэхийн тулд тодорхой өгөгдлийн урсгалыг үүрэн холбооны цөм сүлжээ, өгөгдлийн төвийн backbone-оос өөр зам руу буюу Wi-Fi захын зангилаанд шилжүүлэх үйл явц юм.

5G Wi-Fi-г ачаалал шилжүүлэх нь тусгай зөвшөөрөлгүй Wi-Fi спектрээс нэмэлт багтаамжтай хөдөлгөөнт сүлжээний өгөгдлийн ачааллын түгжрэлийг арилгах явдал юм. 5G-д шилжихийн хэрээр Wi-Fi чухлаас чухал болж байгаа гэдэгтэй шинжээчид санал нэг байна. Wi-Fi-ын хаа сайгүй хамрах хүрээ нь 5G-ийн хурд болон багтаамжийн нягтралын гүйцэтгэлийг аль алинд нь 5G-ийг байршуулах зардлын багасгах боломжийг хангадаг. Иймээс үүрэн холбооны операторууд Wi-Fi ачаалал шилжүүлэх аргыг 5G стратегийн нэг хэсэг гэдэг дээр санал нэгдэж байна.

Сүүлийн үед үүрэн холбооны өгөгдлийн ачааллыг Wi-Fi руу шилжүүлэх хэд хэдэн технологи гарч ирснээс лицензгүй (LTE-U) болон лицензэд суурилсан (LAA) LTE нь хамгийн түгээмэл байна. LTE-U нь Carrier Sense Adaptive Transmission (CSAT)-ийн тусламжтайгаар Wi-Fi-аар дамжих ачааллыг зохицуулна. 5ГГц зурваст ажилладаг LTE-U болон LAA хоёулаа 3GPP Rel-12 болон Rel-14-д тус тус стандартчилагдсан. Wi-Fi руу ачаалах нь холболт хийх илүү боломжийн арга бөгөөд зөв удирдаж чадвал илүү сайн холболт хийх боломжийг олгодог. Салбарын мэргэжилтнүүд 5G хөдөлгөөнт холбооны эрин үед 5G-ийн миллиметрийн долгион (mmWaves) нэвтрэлтийн асуудлыг харгалзан Wi-Fi байршуулах нь зайлшгүй шаардлагатай гэж үзэж байна. Хамрах хүрээг өргөжүүлэхийн тулд үнэтэй дотоод 5G шийдлүүдийг гаргахын оронд Wi-Fi хандалтын цэгүүдийг гар утасны ачааллыг шилжүүлэхэд ашиглах нь нэгэнт тодорхой болсон дүгнэлт юм. Энд WiFi 6 технологи нь 5G алсын харааг улам ч сайжруулж байгаа юм. Учир нь эдгээр зорилгод хүрэхийн тулд маш сайн холболттой байх нь чухал юм. Машин хоорондын (M2M) холбоо буюу 5G mMTC асар хурдацтай өсч байгаа өнөө үед үйлдвэрлэл, үйлчилгээ болон ажил, амралт, чөлөөт цагаа өнгөрөөх хувийн харилцаа холбоонд улам бүр өргөн хүрээтэйгээр нэвтэрч байна. Жишээлбэл, ухаалаг үйлдвэрүүдийн машинууд, эрүүл мэндийн хяналтын шийдэл, өөрийн удирдлагатай тээврийн хэрэгсэл, ухаалаг гэрийн төхөөрөмжүүд нь тасралтгүй ажиллахын тулд тасралтгүй холболт шаарддаг.

Дэлхийн хөгжингүй улс орнууд ухаалаг хот болон зүйлсийн интернет (IoT) санаачилга дэвшүүлж байгаа энэ үед 5G Wi-Fi сүлжээнд шилжүүлэх ихээхэн анхаарал хандуулж байна. 5G-ийн ачааллыг Wi-Fi-д шилжүүлэх, LTE-U, LAA нь 5G макро үүрүүд болон холимог сүлжээний HetNets програмуудад хамаарах шинээр гарч ирж буй Wi-Fi ачаалал шилжүүлэх шийдлүүдийн техникийн авч үзэх шаардлагатай. Wi-Fi нь 5G-ийг нэвтрүүлэхэд сүлжээний гол технологи болж байна. 3GPP болон ITU-T IMT-2020 стандартын дагуу 5G, IEEE болон Wi-Fi Alliance-аас стандартчилагдсан.

I. 5G/Wi-Fi АЧААЛАЛ ШИЛЖҮҮЛЭХ ТЕХНОЛОГИЙН ХЭРЭГЛЭЭ, ҮНДЭСЛЭЛ

1.1 Олон улсын туршлага, харьцуулалт

5G/Wi-Fi холимог сүлжээнд ачаалал шилжүүлэх олон улсын туршлага, шилдэг практикийн харьцуулалт нь өндөр хөгжилтэй орнуудын хэрэгжүүлж буй бодлого, технологийн шийдлүүдийг судалж, Монголын нөхцөлд тохирсон загвар боловсруулахад чухал ач холбогдолтой юм.

Хүснэгт 1.1 Олон улсын туршлага, харьцуулалт (5G/Wi-Fi Offload)

Улс / Бүс нутаг	Түлхүүр арга	Ашигласан технологи	Шилдэг туршлага
Өмнөд Солонгос	Wi-Fi First + 5G fallback	KT Smart Offloading, Seamless Wi-Fi handover	Хот дотор Wi-Fi-г үндсэн сүлжээ болгон ашиглаж, 5G-г зөвхөн шаардлагатай үед асаадаг.
АНУ (Verizon, AT&T)	ATSSS, Dynamic Offload	MPTCP + Edge Computing	MPTCP дээр суурилсан ATSSS ашиглаж, VoIP болон видео стриминг автомат замчлал хийдэг.
Япон (NTT DoCoMo, KDDI)	QoE-based Offloading	AI-driven Traffic Selection, ANDSF	Хэрэглэгчийн байршил, өгөгдөл, аппликешн хэрэглээн дээр үндэслэн ML-аар offload хийдэг.
Европын холбоо	Policy-based Offload	ANDSF + LBO (Local Breakout)	Roaming үед Wi-Fi-руу урсгалыг чиглүүлж зардал бууруулдаг.
Хятад (China Mobile)	Hybrid Core Architecture	Dual Access, Smart Flow Steering	Нэгдсэн платформ дээр 5G ба Wi-Fi-г зэрэг удирдаж, enterprise хэрэглээнд нэвтрүүлдэг.

АНУ ба Европ:

- АНУ: AT&T, Verizon, T-Mobile нь олон нийтийн болон гэрийн Wi-Fi сүлжээ ашиглан IFOM ба ATSSS туршилт хийсэн. Ихэвчлэн хотын төв, нисэх буудал, худалдааны төвүүдэд Wi-Fi offload хэрэглэж, LTE/5G сүлжээний ачааллыг 15–25% бууруулсан.
- Европ: Orange, Vodafone Hotspot 2.0 (Passpoint) ашиглан хэрэглэгчдийг Wi-Fi руу автоматаар шилжүүлдэг. VoWiFi (Wi-Fi дээр дуудлага) үйлчилгээг өргөн нэвтрүүлсэн.

2. Ази тивээс:

- Япон (NTT DoCoMo, SoftBank): Метро, галт тэрэгний буудал зэрэг өндөр ачаалалтай газарт Wi-Fi offload хийж, VoLTE болон видео стримингийн чанарыг сайжруулсан.
- Хятад (China Mobile, China Unicom): Huawei-ийн i-WiFi Offloading платформ ашиглан 5G core-той уялдсан ухаалаг ачаалал шилжүүлэлтийг хийдэг. Үндэсний түвшинд 10 сая гаруй Wi-Fi hotspot ашиглаж байна.
- Өмнөд Солонгос (SK Telecom, KT, LG U+): HetNet (heterogeneous network) шийдлээр Wi-Fi болон 5G холимог сүлжээнд хэрэглэгчийн QoE дээр тулгуурласан offloading

хийдэг. YouTube, Netflix зэрэг OTT үйлчилгээний өндөр хэрэглээг Wi-Fi-д шилжүүлэх замаар өгөгдлийн сүлжээний зардлыг бууруулсан.

- Энэтхэг (Reliance Jio, Airtel): Хот суурин газарт Wi-Fi + 4G/5G хосолсон хэрэглээ (dual connectivity) нэвтрүүлсэн.

Хүснэгт 1.2 Улс орнуудын харьцуулсан дүн шинжилгээ

Бүс нутаг	Технологи	Үндсэн зорилго	Давуу тал	Сул тал
АНУ/Европ	Passpoint, ATSSS, VoWiFi	Хотын өндөр хэрэглээг бууруулах	Автомат шилжилт, өндөр QoE	Олон операторын интеграцийн хүндрэл
Япон/Солонгос	HetNet, IFOM, QoE-based offload	Галт тэрэг, метроны ачааллыг бууруулах	Дэд бүтэц сайн, хэрэглэгчийн сэтгэл ханамж өндөр	Өндөр хөрөнгө оруулалт их шаарддаг
Хятад	Huawei i-WiFi Offloading, үндэсний hotspot	Үндэсний түвшний ачаалал хуваарилалт	Төрийн бодлоготой нийцсэн, өргөн хэрэглээтэй	Сүлжээний аюулгүй байдалд сорилт
Хятад	Community Wi-Fi, Local Breakout	Хямд дата хэрэглээ	Зардал бага, өргөн хүртээмж	Техникийн чанар, QoS сул

Улаанбаатар, аймгийн төвүүдэд Hotspot 2.0/Passpoint ашиглан автомат Wi-Fi offload хийх боломжтой. QoE дээр тулгуурлан ачааллал шилжүүлэлтийг хийхдээ Netflix, TikTok, YouTube зэрэг өндөр ачаалал үүсгэдэг аппликейшнүүдийг Wi-Fi руу шилжүүлэх боломжтой. Хөдөө орон нутагт операторын дата хэрэглээг багасгах зорилгоор олон нийтийн Wi-Fi сүлжээг ашиглах.

Ирээдүйд 5G/Wi-Fi HetNet холимог сүлжээг хөгжүүлж, хэрэглэгчийн туршлагад суурилсан ухаалаг шилжүүлэлт (ATSSS, IFOM) хийх хэрэгтэй.

Хүснэгт 1.3 Монгол улсад хэрэгжүүлэх боломжит стратеги

Санал	Тайлбар
Wi-Fi First хотын бүсэд	Улаанбаатар зэрэг өндөр нягтшилтай бүсэд Wi-Fi-г үндсэн, 5G-г нэмэлт сүлжээ болгох
Edge LBO	Орон нутгийн хэрэглэгчийн урсгалыг орон нутагтаа шууд гаргаж, хоцролт бууруулах
AI/ML-д суурилсан ачаалал шилжүүлэх	Хэрэглэгчийн хэрэглээ, туршлага дээр үндэслэн хиймэл оюунд суурилсан хуваарилалт хийх
ATSSS roadmap боловсруулах	5G цөм сүлжээ хөгжүүлэлттэй уялдуулан ATSSS + MPTCP шийдлийг бэлтгэх

1.2 5G сүлжээнд ачаалал ихсэх шалтгаан

Ачаалал ихсэх нь сүлжээний архитектур, хэрэглэгчийн тоо, хэрэглээний шинж чанар, болон шинэ технологийн онцлогоос хамаарч олон хүчин зүйлтэй холбоотой байдаг. Дараах үндсэн шалтгаантай:

1. Хэрэглэгчийн тоо нэмэгдэх (User Density)

- Хот, олон хүнтэй газар дахь хэрэглэгчдийн тоо хэт ихсэхэд нэг секторт хэт олон төхөөрөмж холбогдож сүлжээний хүчин чадал багасна.
- mMTC (massive Machine-Type Communications) буюу олон IoT төхөөрөмж нэгэн зэрэг холбогддог.

2. Хэт өндөр дата хэрэглээ

- 5G нь өндөр хурдтай видео стрийминг (4K/8K), AR/VR, cloud gaming зэргийг дэмждэг тул хэрэглэгч бүрийн дата хэрэглээ ихэсдэг.
- eMBB (enhanced Mobile Broadband) хэрэглээ өсөх нь ачаалалд мөн нөлөөлнө.

3. Баз станцын тоо багатай / дэд бүтцийн хязгаар

- 5G сүлжээний хамрах хүрээ бага (жижиг үүртэй) тул олон жижиг баз станц шаардлагатай. Суурилуулалт хангалтгүй бол ачаалал хэтэрнэ.
- Indoor буюу дотор орчинд 5G дохио муу дамждаг тул нэвтрэлт буурах нь гарцаагүй.

4. Сүлжээний архитектурын төвлөрөл

- Төвлөрсөн бүтэцтэй цөм сүлжээ (Centralized Core Network 5G Core) нь хэт олон хэрэглэгчдийг нэг цэг дээр дамжуулбал төв системд ачаалал ихэснэ.
- Edge Computing нэвтрээгүй үед төв серверт хэт их өгөгдөл очино.

5. Ultra-low latency service (URLLC) шаардлагууд

- Үйлчилгээ бүр бодит хугацаа эсвэл богино хугацааны хариу шаардахад сүлжээ бүх хэрэглэгчдэд ижил түвшинд хоцролт хангах шаардлагатай.
- Ингэснээр нөөц хуваарилалт хүндрэх ба түүнтэй хамт ачаалал нэмэгддэг.

6. Нөөцийн зохицуулалт, хуваарилалт муу байх

- Dynamic Spectrum Sharing (DSS), Beamforming зэрэг технологи ашиглаагүй бол хэрэглээний огцом өсөлтөд хариу өгөхөд хүндрэлтэй.
- Сүлжээний тохиргоо, хуваарилалт автоматжсан биш бол хүндрэл үүснэ.

7. Interference буюу хөндлөнгийн нөлөөлөл ихсэх

- 5G нь илүү их антенн ашигладаг (Massive MIMO) тул үүр хоорондын давхцал (inter-cell interference) өсөх магадлалтай.
- Ухаалаг beamforming дэмжихгүй бол дохионы чанар муудаж дахин дамжуулалт (retransmission) ихэсдэг.

8. Backhaul холболтын хүчин чадал хүрэлцэхгүй байх

- Баз станцын гол сүлжээ (Fiber/Микро долгион) ачааллыг даахгүй тохиолдолд багцын алдагдал, хоцролт нэмэгдэнэ.

- 5G-ийн өндөр хурдыг ашиглахын тулд backend дэд бүтцийн зурвасын өргөн их шаардлагатай.

9. Network Slicing дэмждэггүй эсвэл буруу ашигласан

- 5G-ийн хамгийн гол давуу тал болох network slicing хэрэгжээгүй бол бүх хэрэглэгч ижил сүлжээгээр дамжин ачаалал нэмэгдэнэ.
- Урсгалыг ангилан тусад нь slice хийж зохицуулахгүй бол шаардлага өндөртэй үйлчилгээ тасалдаж болзошгүй.

1.3 Холимог сүлжээг хэрэгжүүлэхэд хиймэл оюуныг ашиглах боломж, үр ашгийн судалгаа

1.3.1 Оршил

Хөдөлгөөнт холбооны сүлжээнд дамжуулж байгаа ачааллын хэмжээ жилээс жилд огцом нэмэгдэж байгаагаас утасгүй сүлжээнд спектрийн нөөц хүрэлцээгүй болсоор байна. Иймд утасгүй сүлжээний багтаамж нь их хэмжээний ачааллыг дамжуулахад хүндрэлтэй болж байна. Үүнийг шийдвэрлэх нэг арга нь үүрэн системийг лицензгүй зурваст ашиглах нь ирээдүйтэй, үр ашигтай шийдлийн нэг болно. Ингэснээр үүрэн системийн хувьд Wi-Fi болон бусад лизензгүй зурваст ажилладаг системүүдтэй харилцан ажиллах шаардлагатай. Ийм холимог сүлжээг хэрэгжүүлэхийн тулд хандалтын цэг болон 5G gNB нягт шигүү суурьлуулсан утасгүй сүлжээнд нөөц хуваарилалтыг оновчтой хэрэгжүүлэх асуудлыг шийдвэрлэх шаардлагатай болно. Ингэснээр 5G NSA холимог сүлжээнд ачааллыг Wi-Fi сүлжээгээр шилжүүлэх замаар дамжууллын багтаамжийг нэмэгдүүлэх, саатлыг бууруулах замаар үйлчилгээний чанарыг дээшлүүлж болохыг 5G нэвтрүүлсэн АНУ, Өмнөд Солонгос, Япон, Хятад, Сингапур зэрэг голлох орнуудын жишээ харуулж байгаа юм. Иймд уг судалгааг Монгол улсад хэрэгжүүлэх арга замыг судалж үзэх шаардлагатай.

Судалгааны үр дүнд 5G сүлжээний чанар, хурд, найдвартай байдлыг сайжруулах, үйлчилгээний зардал бууруулах боломж бий болно. Мөн хөдөө орон нутгийн хамрах хүрээг өргөтгөх (Жишээ нь: LEO хиймэл дагуулын шийдэл) боломжийн талаарх судалгааг цаашид гүнзгийрүүлэн судлах шаардлагатай. Иймээс 5G холимог сүлжээнд мэдээллийн ачааллыг шилжүүлэх (traffic offload) боломжийг тодорхойлох, түүний үр ашгийн судалгаа хийх нь чухал ач холбогдолтой.

1.3.2 Холимог сүлжээний хэрэгжилтэд хиймэл оюун ухаан ашиглах боломж

AI нь 5G/Wi-Fi холимог сүлжээ (HetNet)-д онлайн оновчлол, удирдлага, аюулгүй байдлыг сайжруулах чиглэлээр маш чухал үүрэгтэй. Учир нь ийм орчинд хэрэглэгчийн хөдөлгөөн, ачааллын урсгал, сүлжээний ачаалал зэргийг бодит хугацааны горимд хянаж, аль сүлжээг ашиглахыг ухаалгаар шийдэх шаардлагатай байдаг.

1. Сүлжээ төлөвлөлт ба оновчлол:

- Станцын байршлын ухаалаг сонголт: AI нь ачааллын халуун цэгүүд, хэрэглэгчийн хөдөлгөөний хэв маяг, хамрах хүрээний цоорхойг тодорхойлж, 5G жижиг станц эсвэл Wi-Fi цэгийг хаана байрлуулахыг шийдэх боломжтой.
- Динамик спектрийн хуваарилалт: ML загварууд нь 5G болон Wi-Fi-ийн сувгуудын нөөцийг давхцуулахгүй, үр ашигтай ашаглах зорилгоор урьдчилан таамаглаж, хуваарилалт хийнэ.

2. Ачааллын удирдлага (ATSSS – Steering, Switching, Splitting)

- QoE-д суурилсан ачаалал шилжүүлэлт (Offloading): AI нь хэрэглэгчийн орчин (RSSI, RSRP, SINR, хурд, саатал, батарейн түвшин) болон аппликейшны шаардлагыг үнэлж, 5G эсвэл Wi-Fi ашиглахыг шийднэ.
- Олон замт оновчлол: Reinforcement Learning нь MPTCP дээр 5G болон Wi-Fi хооронд ачааллын хуваарилалтыг бодит цагийн горимд сайжруулж суралцах боломжтой.

3. Интерференц ба давхцалын удирдлага

- Интерференцийн урьдчилсан таамаглал: нейрон сүлжээ нь холимог сүлжээ тухайн ажиллаж буй давтамжийн зурваст (5ГГц, 6ГГц гм) 5G/Wi-Fi-ийн харилцан нөлөөллийг урьдчилан тооцоолж, дамжуулалтын параметруудийг тохируулна.
- Ачааллын тэнцвэржүүлэлт: AI алгоритмууд нь хэрэглэгчдийг зөвхөн босго утгаар бус, урьдчилан тооцоолсон үүрийн ачаалал дээр үндэслэн 5G ба Wi-Fi хооронд хуваарилна.

4. Аюулгүй байдал ба заналхийлэл илрүүлэлт

- Аномали илрүүлэх: AI нь ачааллын хэвийн бус загварыг илрүүлж, DDoS халдлага, хуурамч AP эсвэл man-in-the-middle халдлагыг илрүүлнэ.
- Дасан зохицох аюулгүй байдлын бодлого: Сүлжээний итгэмжлэлээс хамаарч баталгаажуулалт, шифрлэлийн түвшинг AI автоматаар тохируулна.

5. Эрчим хүчний хэмнэлт

- Идэвхгүй үед станц унтраах: AI нь хэрэглээ багатай үед Wi-Fi AP эсвэл 5G жижиг станцыг унтрааж, ачаалал нэмэгдэхэд дахин асаана.
- Ногоон Offloading: QoE-н шаардлага дээр үндэслэн хамгийн бага эрчим хүч зарцуулдаг сүлжээнд ачааллыг шилжүүлнэ.

6. Холимог сүлжээнд (HetNet) AI ашиглах техникүүд

AI техник

- Reinforcement Learning (RL)
- Deep Learning (DL)
- Federated Learning (FL)
- Supervised ML
- Unsupervised ML

5G/Wi-Fi HetNet-д ашиглах жишээ

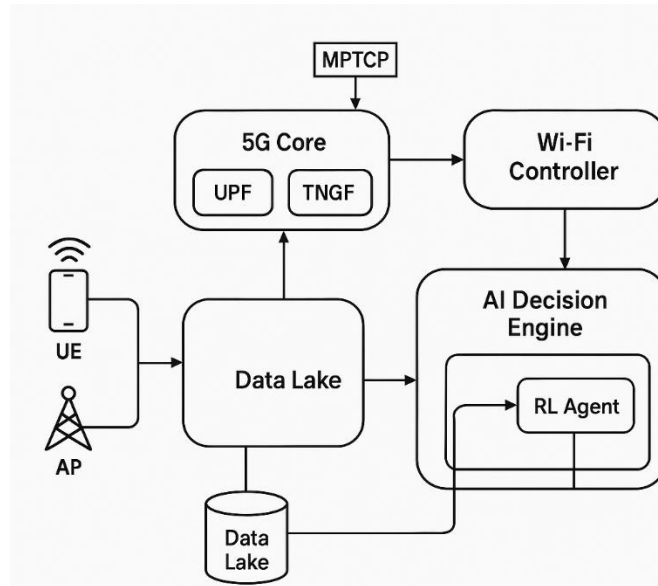
Ачааллын удирдлага, нөөцийн төлөвлөлт

Интерференцийн урьдчилсан таамаглал, хэрэглэгчийн хөдөлгөөн таамаглах

Хувийн нууц хамгаалсан сүлжээний оновчлол

Өмнөх өгөгдөл дээр үндэслэн хамгийн тохиромжтой offload нөхцөл тодорхойлох

Ачаалалд гарсан аномалийг шошгогүй өгөгдлөөр илрүүлэх



Зураг 1.1 5G/Wi-Fi холимог сүлжээнд хиймэл оюун ухааныг ашигласан бүтэц

Зураг 1.1-д 5G ба Wi-Fi нэгдсэн ухаалаг шийдвэр гаргах ерөнхий бүтцийн схемийг харуулав. Энэ блок схем нь дараах бүрэлдэхүүн хэсгүүдээс тогтоно. Үүнд:

- UE (User Equipment) – хэрэглэгчийн төхөөрөмж (гар утас, таблет гэх мэт).
- AP (Access Point) – Wi-Fi эсвэл үүрэн холбооны хандалтын цэг.
- Data Lake – сүлжээнээс ирсэн их хэмжээний өгөгдлийг хадгалж, дараа нь шинжилгээ хийхэд ашиглагдана.

5G Core (UPF, TNGF):

- UPF (User Plane Function): хэрэглэгчийн өгөгдлийг чиглүүлэх, сүлжээний урсгалын удирдлага.
- TNGF (Trusted Non-3GPP Gateway Function): Wi-Fi зэрэг 3GPP бус сүлжээнүүдийг 5G цөм сүлжээтэй найдвартай холбох.
- MPTCP (Multipath TCP) – нэгэн зэрэг олон замаар (жишээ нь Wi-Fi ба 5G) өгөгдөл дамжуулах боломж олгодог протокол.
- Wi-Fi Controller – Wi-Fi холболтыг удирдаж, 5G цөм болон AI системтэй зохицлыг хангадаг.
- AI Decision Engine – хиймэл оюун ухаанд суурилсан шийдвэр гаргах төв.

Дотор нь RL Agent (Reinforcement Learning Agent) ажиллаж, бодит цагийн өгөгдөл дээр тулгуурлан хамгийн оновчтой сүлжээний сонголт (5G эсвэл Wi-Fi) болон урсгалын удирдлагыг автоматжуулна.

Ажиллах зарчмыг авч үзвэл, UE төхөөрөмж нь AP-аар дамжин өгөгдөл дамжуулах ба өгөгдөл Data Lake-д хуримтлагдаж, 5G Core болон AI Decision Engine рүү очно. AI Decision Engine доторх RL Agent өгөгдөл дээр дүн шинжилгээ хийж, аль замаар (5G эсвэл Wi-Fi) урсгалыг чиглүүлэх нь илүү үр ашигтайг шийднэ. Шийдвэрийг Wi-Fi Controller болон 5G Core-т илгээнэ. MPTCP-ийн тусламжтайгаар олон замыг зэрэг ашиглах, шилжүүлэх боломжтой

болно. Энэ архитектур нь 5G ба Wi-Fi сүлжээний ухаалаг ачаалал шилжүүлэлт (offloading, steering, splitting)-ийг хиймэл оюун ухаан ашиглан автоматжуулдаг системийн загвар юм.

1.3.3 Судлагдсан байдал

Энэ хэсэгт нөөц хуваарилалт хийх аргууд, үүрэн /Wi-Fi холимог системд уламжлалт болон машин сургалтад суурилсан аргаар нөөц хуваарилалт хийх гэсэн сэдвүүдээр хийгдсэн судалгааг авч үзсэн.

А. Нөөц хуваарилалтын аргууд

Үүрэн холбооны LTE, 5G системүүдийг лицензгүй зурваст шилжүүлэн ашигласан үед уг зурваст хамгийн түгээмэл Wi-Fi системтэй спектрийн нөөц хуваарилалт, суваг эзлэлтийн хамгийн их хугацаа, эзлэгдсэн зурвасын өргөний хамгийн бага хэмжээ, бусад системтэй шудрага зэрэгцэж ажиллах зэргийг судласан [9]. Үүрэн болон Wi-Fi системүүд нь MAC протоколын ялгаатай байдлаас болж ямар нэг зохицуулалтгүй ажиллах хүндрэлтэй. Үүрэн систем нь OFDMA, харин Wi-Fi систем CSMA/CA хандалтын аргыг хэрэглэдэг. Эдгээр ялгаатай аргаас шалтгаалан LTE систем Wi-Fi-д илүү интерференц үзүүлдэг [7]. Энэ асуудлыг шийдвэрлэхийн тулд LBT, CSAT, ABS зэрэг нөөц хуваарилалтын аргуудыг үүрэн болон Wi-Fi хосолсон системүүдэд ашигладаг [11].

Б. Үүрэн болон Wi-Fi холимог системд уламжлалт аргаар нөөц хуваарилалт хийх

Зарим судалгааны ажлуудад [5],[6],[10],[12] үүрэн болон Wi-Fi холимог системүүдэд нөөц хуваарилахтай холбоотой асуудлуудыг тал бүрээс нь судласан. Үүрэн холбоо, Wi-Fi болон радар зэрэг системийн нөөц хуваариалалтыг 5ГГц-ийн зурваст хийх боломжийн талаар [5] авч үзсэн. [6] дээр үүрэн болон Wi-Fi системүүдэд нөөц хуваарилахтай холбоотой асуудлуудыг, тухайлбал, лицензгүй зурваст зөөгчийг нэгтгэх, MAC протоколын харьцуулалт, зэрэгцээ сувгийн интерференц зэрэг асуудлуудыг судласан. Генетик алгоритмд суурилан аргаар [11] LTE/Wi-Fi холимог системд, дундаж нэвтрүүлэх чадамж болон шударга зэрэгцэж ажиллах нөхцөлийг сайжруулахын тулд суваг хуваариалт болон хандалтын системийг сонгох судалгаа хийсэн.

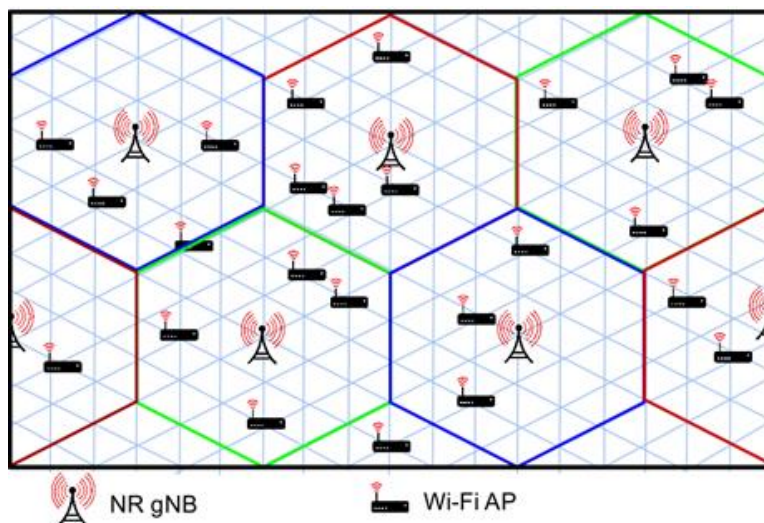
В. Үүрэн болон Wi-Fi холимог системд машин сургалтад суурилсан аргаар нөөц хуваарилалт хийх

Уламжлалт аргаар үүрэн болон Wi-Fi системийн хооронд нөөц хуваарилах талаар маш олон судалгааны ажлууд хийгдсэн. Сүүлийн үед машин болон гүн сургалтанд суурилсан аргыг холбооны системийн хувьд, жишээлбэл, спектр сонголт, хуваарилалт, хандалт зэрэг асуудлыг оновчлох зорилгоор ашигласан [8],[13],[14], [15]. Ялангуяа [13] дээр утасгүй LAN сүлжээний хувьд DRL-д суурилсан аргаар сувгийн оновчтой хуваарилалт хийх судалгаа хийсэн. Хэдийгээр олон тооны судалгааны ажил үүрэн болон Wi-Fi холимог системд уламжлалт, машин болон гүн сургалтанд суурилсан аргаар хийгдсэн боловч шигүү суурилуулсан холимог сүлжээнд суваг хуваариалт хийх талаар бараг тусгаагүй. Мөн түүнчлэн шигүү суурилуулсан холимог сүлжээнд машин сургалт хийх болон бусад моделтой харьцуулалт хийхэд зориулсан өгөгдлийн сан байхгүй.

1.3.4 Санал болгож буй арга

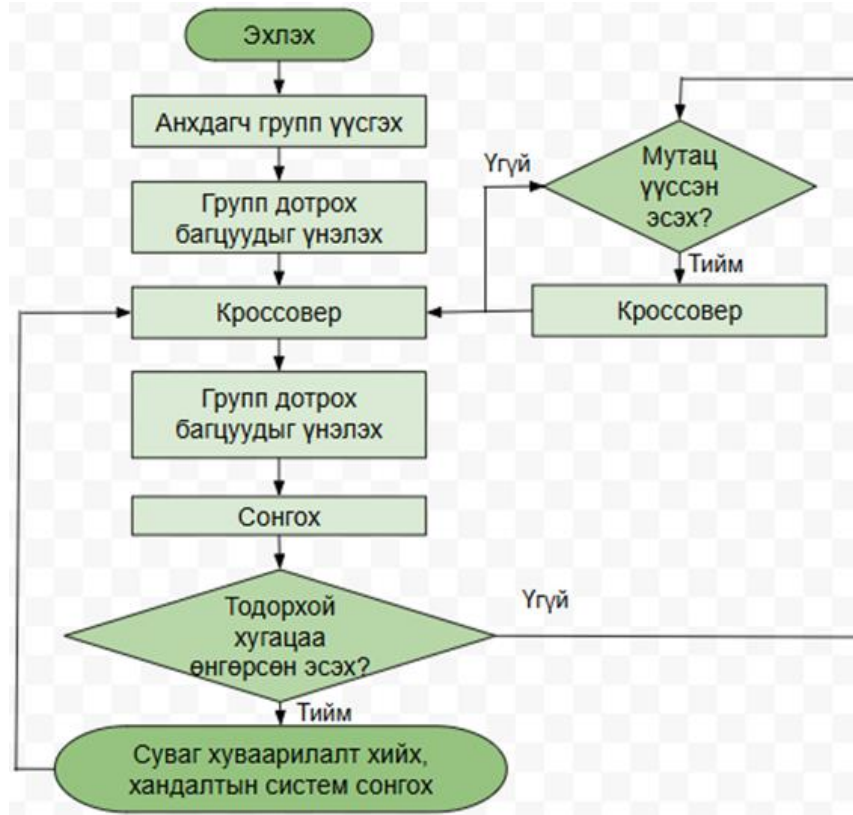
А. Системийн загварчлал

DRL-д суурилсан сургалт явуулах орчин болгож зураг 1.2-д үзүүлсэнээр олон гурвалжин дүрсээс бүрдсэн тэгш өнцөгт хэлбэртэй талбайг авч үзсэн. Энэ авч үзэж буй орчинд Wi-Fi AP -ийг санамсаргүйгээр, харин LTE BS-ийг бусад BS-ийн бүрхэлтийн талбайтай давхцахаагүй байхаар байрлуулсан.



Зураг 1.2. Холимог системийн ерөнхий бүтэц

Энд LTE BS нь лицензгүй зурваст ажиллах учраас Wi-Fi AP нь интерференцэд өртөнө. Нийт талбай нэг ба түүнээс олон тооны Wi-Fi AP -ийн бүрхэлтэнд хамаарах ба хэрэглэгч хаана ч байсан AP-д холбогдох боломжтой. Жижиг талбай бүр нэг болон түүнээс олон AP-ийн бүрхэлтэнд хамрагдана. LTE BS болон Wi-Fi AP-ийн бүрхэлтийн талбай адилхан зөв зургаан талт хэлбэртэй, нийт 54 гурвалжин дүрсээс (хөх, улаан, ногоон өнгөөр дүрсэлсэн) бүрдэнэ. Үүнд хоёр төрлийн хэрэглэгчтэй (зөвхөн Wi-Fi болон Wi-Fi/LTE хосолсон) байхаар тооцоолсон. Хосолсон хэрэглэгч нь Wi-Fi/LTE системийн хувьд ачаалал дамжуулах болон хүлээн авах боломжтой бол Wi-Fi хэрэглэгч нь зөвхөн Wi-Fi сүлжээнд ашиглагдана. Wi-Fi болон Wi-Fi/LTE хосолсон хэрэглэгчид Пуассоны ирэлтийн процессын дагуу жижиг талбайд λ хурдтай ирнэ. Эдгээр хэрэглэгчид нэг ба түүнээс олон тооны AP/BS-ийн бүрхэлтэнд хамрагдана. Гэхдээ хугацааны тухайн агшинд хэрэглэгчид AP юмуу BS-ийн аль нэгд нь холбогдоно. Хэрэглэгчдийн холболтын үргэлжлэх хугацаа экспоненциал хуулийн дагуу дунджаар 300сек-ийн хугацаатай. Үүрэн систем LAA болон Wi-Fi систем 5ГГц-ийн лицензгүй зурваст хамт ажиллах ба спектр хуваарилалтын схемээр LBT-г ашигласан. Холимог системийг зураг 1.3-д үзүүлсэн генетик алгоритмын дагуу хэрэгжүүлсэн.



Зураг 1.3. Холимог системийг хэрэгжүүлэх алгоритм

Нэвтрүүлэх чадамжийг тооцоолохдоо хэд хэдэн eNB, AP ижил давтамж дээр ажиллаж байгаа тохиолдолд сувгийг LBT технологийн дагуу хуваан эзэмшиж байгаагаар авч үзсэн. LBT технологи нь Марковын сүлжээ алгоритмын дагуу загварчлагдсан бөгөөд (2), (3) томъёогоор системийн нэвтрүүлэх чадамжийг тодорхойлогддог.

Системийн нэвтрүүлэх чадамжийг тодорхойлохдоо:

$$S = \frac{E[P]P_s}{E[T]} \quad (1.1)$$

LTE болон Wi-Fi системийн хувьд адил суваг ашиглаж байгаа тохиолдолд S_L , S_W системийн нэвтрүүлэх чадамжийг дараах байдлаар тодорхойлно.

$$S_W = \frac{P_s^W E(P_W)}{(1-P_b)\delta + P_s^W T_s^W + P_s^L T_s^L + P_c^W T_c^W + P_c^L T_c^L + P_c^W L_{\max}(T_c^W, T_c^L)} \quad (1.2)$$

$$S_L = \frac{P_s^L E(P_L)}{(1-P_b)\delta + P_s^W T_s^W + P_s^L T_s^L + P_c^W T_c^W + P_c^L T_c^L + P_c^W L_{\max}(T_c^W, T_c^L)} \quad (1.3)$$

S_W – Wi-Fi AP-ууд ижил суваг хуваан эзэмшиж байгаа үед системийн нэвтрүүлэх чадамжийг тооцохдоо:

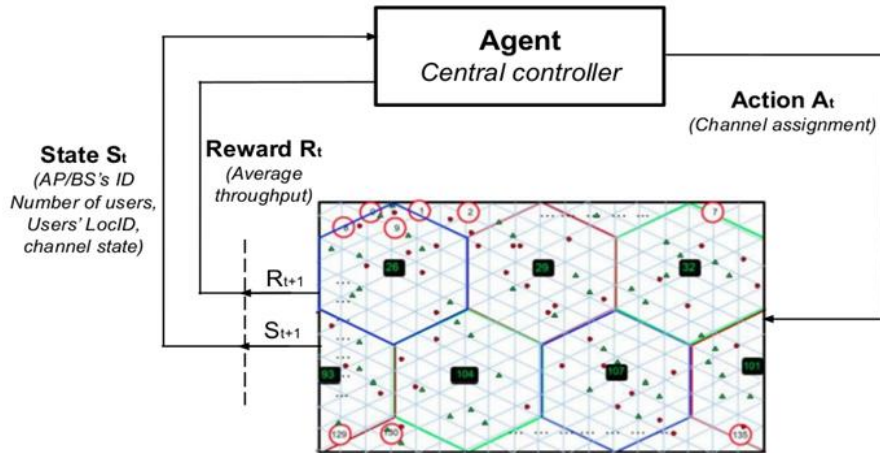
$$S_{W'} = \frac{P_S^W \overline{E(P_W)}}{(1-P_b)\delta + P_S^W T_S^W + P_C^W T_C^W} \quad (1.4)$$

W, L нь Wi-Fi болон LTE гэсэн тэмдэглэгээ

Б. DRL аргад суурилсан суваг хуваарилалтын бүтэц

Энэ хэсэгт лицензгүй зурваст, холимог сүлжээнд DRL аргад суурилсан суваг хуваарилалтын үр ашигтай аргыг авч үзсэн. Үүний тулд DRL аргаар агент буюу холимог сүлжээний төв удирдлагын суваг хуваарилалтыг оновчтой болгож хэрэглэгчийн дундаж нэвтрүүлэх чадамж болон нөөц ашиглалтыг сайжруулах зорилго тавьсан. DRL аргаар моделийг сургахын тулд холимог сүлжээнд шигүү суурилуулсан eNB болон AP-тай эмулятор хөгжүүлж сургалтын орчин болгож ашигласан.

Холимог сүлжээнд суваг хуваарилалтыг хэрэгжүүлэхдээ AP болон eNB-г нэгдсэн зохицуулгатайгаар удирдах боломжтой агентыг бий болгож хөгжүүлсэн. Энэ тохиолдолд хэрэглэгчийн ирэх хурд, байршил, сувгийн өөрчлөлтийн мэдээлэл зэргээс шалтгаалан орчны төлвийн мэдээлэл эпизод бүрийн турш байнга өөрчлөгддөг. Бидний авч үзэж байгаа аргын хувьд загварчилсан DDQN агентыг сургахын тулд орчны төлвийн мэдээлэлд үндэслэн харгалзах сувгийн өөрчлөлтийн мэдээллийг агент суралцана. Үүний үр дүнд агент богино хугацаанд тухайн орчин дахь AP болон eNB-д оновчтой суваг хуваарилалт хийх чадвартай болно. DRL аргыг хэрэгжүүлэхийн тулд эхлээд загварчилсан суваг хуваарилалтын өгөгдлийг MDP рүү хөрвүүлэх шаардлагатай [8]. Тиймээс зураг 1.4-д үзүүлсэнээр хэрэгжүүлж буй орчинд суваг хуваарилалтын асуудлыг MDP шинж чанартайгаар S төлөв, A үйлдэл, шилжилтийн магадлал $p(S_{t+1}|S_t, A_t)$, шагналын функц $R_t(S_t, A_t)$ байдлаар илэрхийлнэ. Энд агент нь нэгдсэн шийдэл гаргах үүрэгтэй action-value функцтэй байна. Action-value функц нь тухайн төлөвт (S_t) тодорхой үйлдэл (A_t) хийсний дараа боломжит системийн загварчлалын симуляторыг жава програм дээр зураг 1.5-д харуулсан алгоритмын дагуу хэрэгжүүлсэн ба DDQN агентыг сургахад уг симулятораас дундаж нэвтрүүлэх чадамжийг шагнал R болгож авна.



Зураг 1.4. Агент болон орчны харилцан үйлчлэл

Холимог системийн S төлвийн мэдээллийг хэрэгжүүлсэн симулятороос хүснэгт 1.4-т үзүүлсэн оролтын өгөгдлийг гаргаж авна.

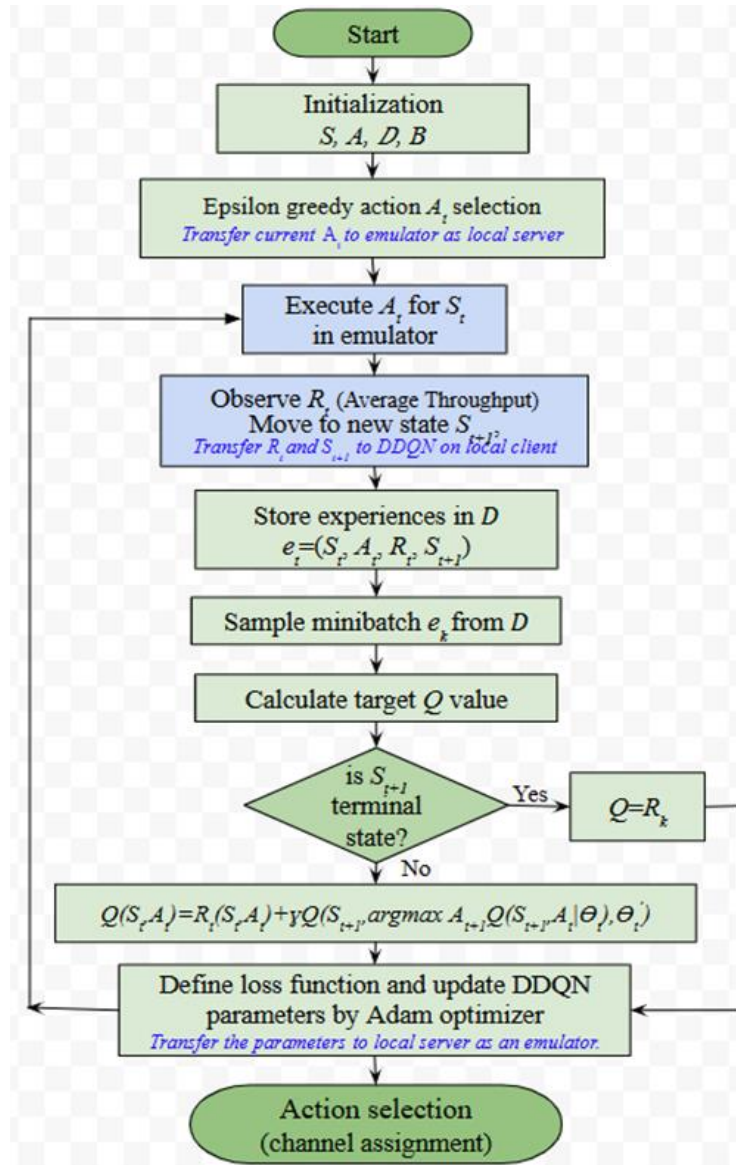
Хүснэгт 1.4 Оролтын өгөгдөл

AP ID	1	2	3		107
AP/NB байршил	24	36	55		74
Холбогдсон хэрэглэгчдийн тоо	5	0	3		6
Багтаамж	4.33	11	13.5		3.6
Хамгийн багтаамж	40	75	40		40
Хэрэглэгчдийн байршил	115	85	24		33
Хуваарилсан суваг	1	2	0		3
Хэрэглэгчийн нэвтрүүлэх чадамж	6.74	4.33	3.54		7.24

Төлвийн мэдээлэл нь холимог сүлжээний талаар хэрэгтэй мэдээллийг агуулах ба эдгээр нь DDQN агентийг сургах оролтын өгөгдөл байдлаар ашиглагдана.

В. DDQN агентыг сургах

Утасгүй холимог сүлжээнд суваг хуваарилалтыг оновчтойгоор хэрэгжүүлэхийн тулд DDQN-нд суурилсан, нэг агенттай DRL схемийг авч үзсэн. Үйлдэл A мэдээлэл нь дискрет, боломжит сувгийн нэгдэл байдлаар $A_t \in A = \{0,1,2,3\}$. Эдгээр A -аас оновчтой сувгийн хуваарилалтыг Epsilon Greedy алгоритмын дагуу, $\varepsilon = 1$ үед санамсаргүй, $\varepsilon = 0$ үед суралцсан мэдээлэл дээрээ үндэслэсэн суваг хуваарилалтыг AP болон BS бүрт хийнэ.



Зураг 1.5. DDQN-д суурилсан суваг хуваарилалтын алгоритм

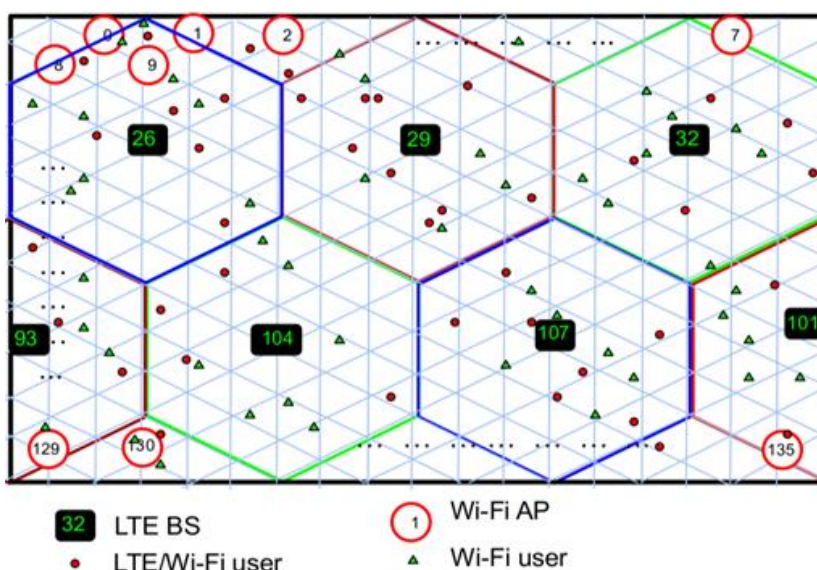
Бидний хэрэгжүүлэх DRL-д суурилсан суваг хуваарилалтын арга нь агент болон орчин гэсэн хоёр үндсэн хэсгээс тогтоно. Орчин болон агент нь локал сервер, клиент байдлаар ажиллах ба эдгээрийн хооронд төлөв, үйлдэл, шагналын мэдээллийг зорьсон моделио сургахын тулд дамжуулна. Энэ судалгааны ажлаар шагналын функц нь холимог сүлжээнд сувгийн хуваарилалтыг оновчлоход зориулж загварчлагдсан. Үүнийг холимог сүлжээг загварчилсан эмулятораас гаргаж авах ба дундаж нэвтрүүлэх чадамжаар илэрхийлэгдэх хугацааны бодит агшинд шагнал өгөх зориулалттай дискрет функц байна. Суваг хуваарилах процесс нь өгөгдсөн төлөв S_t -өөс дараагийн төлөв S_{t+1} -д $p(S_{t+1}, R_t, |S_t, A_t) = P_r\{S_t = S_{t+1}, R_t = R_{t+1} | S_{t-1} = S_t, A_{t-1} = A_t\}$ гэсэн шилжилтийн магадлалтайгаар шилжинэ.

Сүүлийн AP-д суваг хуваарилалтыг туршсанаар тухайн эписодын төгсгөл болж шагнал R_t -г тооцоолон, дараагийн эписодод шинээр хуваарилалтыг турших байдлаар сургалт үргэлжилнэ.

1.3.5. Гүйцэтгэлд үнэлэлт хийх

А. Системийн загварчлал

Симуляцийн загварчлалыг тэгш өнцөгт хэлбэртэй дотроо 288 жижиг гурвалжин дүрсээс бүрдсэн талбайг зураг 1.6-т үзүүлсэнээр хэрэгжүүлсэн. AP болон BS-ийн бүрхэлтийн талбай адилхан зөв зургаан өнцөгт хэлбэртэй дотроо 54 жижиг гурвалжин талбайгаас бүрдэнэ. Энд AP болон BS-ийг байрлуулах боломжтой талбайн тоо 136 байна. Зураг 1.6-д үзүүлсэнээр нийт 7 (26, 29, 32, 93, 101, 104, 107 дугаартай) BS-ийг зөв зургаан өнцөгтийн төвд байрлуулсан ба бүрхэлт нь хоорондоо давхцахгүй.

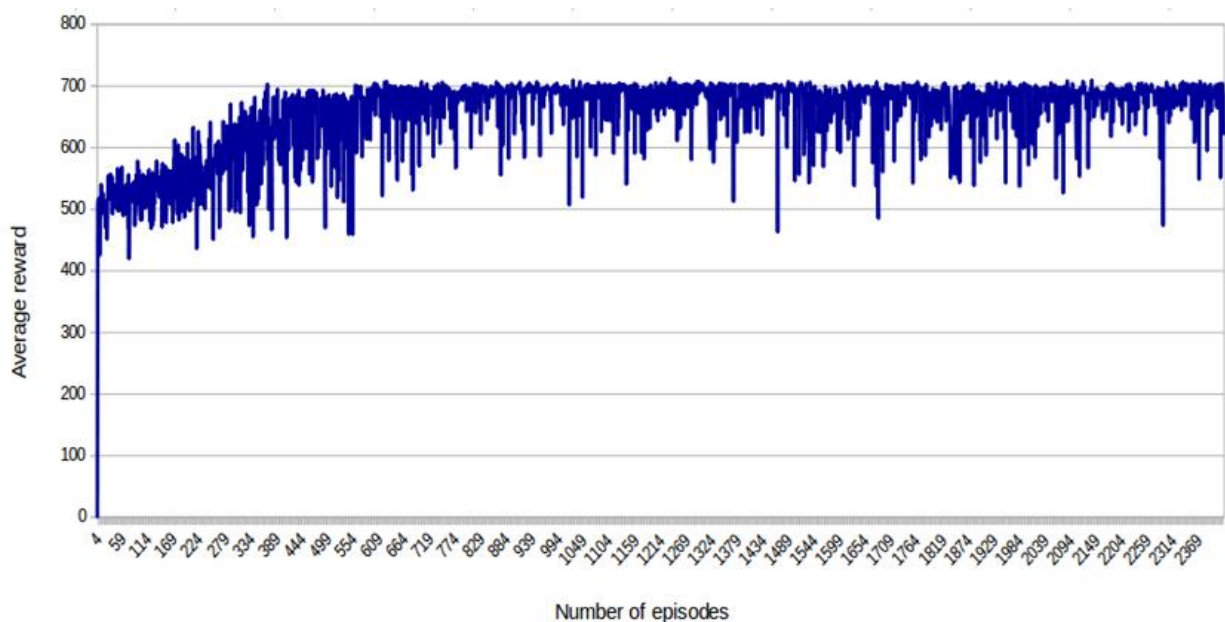


Зураг 1.6. Симуляцийн загварчлал

Харин Wi-Fi AP -ийг бусад байрлуулах боломжтой талбайд санамсаргүйгээр суурилуулна. Нийт боломжит сувгийн тоо 4 байх ба эхлээд AP-д санамсаргүйгээр хуваарилагдана. LTE BS нь гурван сувагтай, зэрэгцээ BS-уудад ижил суваг хуваарилахгүй, симуляцийн турш хуваарилагдсан суваг өөрчлөгдөхгүй. Хоёр төрлийн хэрэглэгчдийн жижиг талбайд ирэх харьцаа нь адил 1:1, холболтын үргэлжлэх хугацаа нь дунджаар 300сек байна.

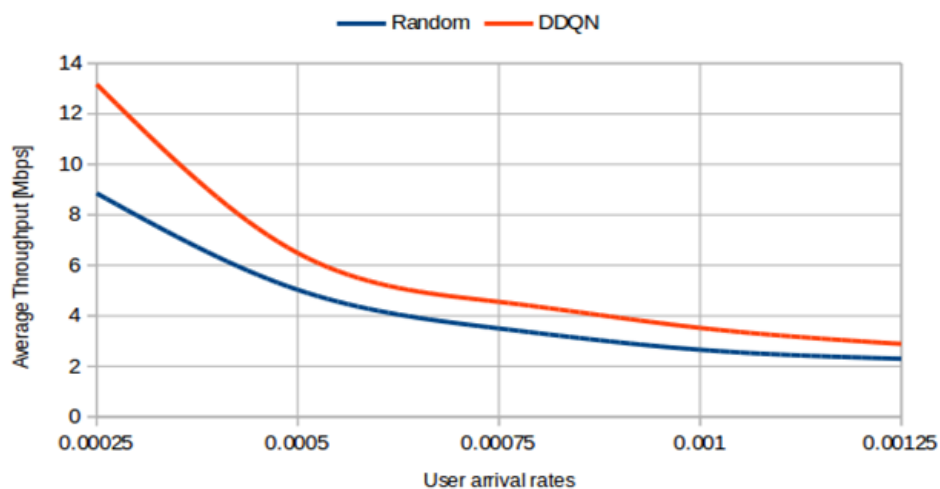
Б. Сүлжээний бүтэц

DDQN алгоритмаар суваг хуваарилалт хийхийн тулд хайперпараметрийн янз бүрийн утга дээр туршиж хамгийн сайн гүйцэтгэлтэй утгаар тохируулга хийж моделийг сургасан. Тохируулсан параметрийн дагуу DDQN агентийг сургаж хамгийн их шагналын оноотой арван моделийг харьцуулж хамгийн өндөр гүйцэтгэлтэй моделийг сонгосон. Сонгосон моделийн гүйцэтгэлийн үр дүнг зураг 1.7-д үзүүлсэн ба хэвтээ тэнхлэгт эписодын тоог, босоо тэнхлэгт шагналын дундаж тоог харуулсан.



Зураг 1.7. Гаргаж авсан DDQN моделийн гүйцэтгэл (дундаж нэвтрүүлэх чадамжаар)

Дундаж нэвтрүүлэх чадамж нийлэхэд (converged), DDQN агент авч үзэж байгаа орчинг (environment) бүрэн судалж өгөгдсөн төлөвт оновчтой сувгийг хуваарилах боломжтой болно. Бид DDQN-д суурилсан суваг хуваарилалтын гүйцэтгэлийн үр дүнг үед буюу санамсаргүй суваг хуваарилалтын үр дүнтэй харьцуулсан, зураг 1.8.



Зураг 1.8. Хэрэглэгчийн ирэх хурд ялгаатай үед дундаж нэвтрүүлэх чадамжийн харьцуулалт

Дээрх үр дүндээс авч үзвэл бидний санал болгосон DDQN-д суурилсан арга нь санамсаргүй суваг хуваарилалтын аргатай харьцуулахад дундаж нэвтрүүлэх чадамж нь 25.5%-48.7% сайжирсан нь харагдаж байна. Харьцуулсан үр дүнгээс харвал, холимог сүлжээнд ирэх хэрэглэгчдийн тоо нэмэгдэхэд дундаж нэвтрүүлэх чадамж буурч байна.

I. Бүлгийн дүгнэлт

1.1 Олон улсын туршлага, харьцуулалт

Өмнөд Солонгос:

Wi-Fi First бодлого нь өндөр нягтшилтай хотуудад тохиромжтой. Smart seamless handover шийдлүүд нь хэрэглэгчдэд мэдэгдэхгүй шилжилт хийх боломж олгодог.

АНУ – ATSSS ашиглалт:

5G SA (Standalone) цөм сүлжээнд Multipath TCP ашигласнаар урсгал хуваалт, шилжилт бодитоор хийгддэг. Шаардлага өндөртэй хэрэглээг (VoIP, video call)-г автоматаар хоцролт багатай сувгаар явуулдаг.

Япон – AI ба QoE анализ:

Хэрэглэгчийн аппликейшн, дата хэрэглээ, байршил зэрэг дээр үндэслэн хиймэл оюун ухаан ашигласан динамик ачаалал шилжүүлэх. Хувь хүний туршлагад суурилсан загварчлал маш өндөр үр дүнтэй.

Европ – Зардал бууруулах LBO + ANDSF:

Сүлжээний бодлого төвтэй шилжилт, ялангуяа роуминг хэрэглэгчдэд зориулсан.

Хятад – Нэгдсэн ухаалаг сүлжээ:

Enterprise шийдлүүдэд 5G ба Wi-Fi-г нэг платформоор удирддаг. Үйлчилгээ тус бүрийн шаардлагад нийцүүлэн автоматаар урсгал хуваарилалт хийдэг.

1.2 5G сүлжээнд ачаалал ихсэх шалтгаан

5G сүлжээний ачаалал нь зөвхөн хэрэглэгчийн тооноос биш, харин дэд бүтэц, архитектурын оновчгүй байдал, хэрэглээний төрөл, технологийн дэмждэггүй байдал зэрэг олон хүчин зүйлээс хамаардаг. Үүнийг зохицуулахын тулд:

- Small cell deployment-ийг нэмэгдүүлэх
- AI/ML ашигласан динамик нөөц хуваарилалт
- Edge computing болон network slicing нэвтрүүлэх
- Интерференц хянах beamforming, massive MIMO технологийг оновчтой тохируулах шаардлагатай.

1.3 5G/Wi-Fi холимог сүлжээнд хиймэл оюуныг ашиглах боломж, үр ашгийн судалгаа

Үүрэн болон Wi-Fi холимог сүлжээнд DDQN-д суурилсан аргаар суваг хуваарилалтыг оновчилж дундаж нэвтрүүлэх чадамжийг сайжруулахын тулд үүрэн/Wi-Fi холимог сүлжээг загварчилж орчинг бий болгон эмулятор болгож ашигласан. Хөгжүүлсэн загварын дагуу агентыг сургасан ба агент AP/BS-д холбогдсон хэрэглэгчдийн тоо, байршлаас хамааран сувгийг оновчтой хуваарилах чадвартай болно. Гаргаж авсан моделийн үр дүнгээс харахад санал болгосон DDQN-д суурилсан суваг хуваарилалтын арга нь дундаж нэвтрүүлэх чадамжийг санамсаргүй аргатай харьцуулахад 25.5%-48.7%-р сайжруулсан.

II. 5G/Wi-Fi СҮЛЖЭЭНИЙ БҮТЭЦ, БҮРЭЛДХҮҮН ХЭСГҮҮД

2.1 5G/Wi-Fi-ийн үндсэн зарчим

5G болон Wi-Fi сүлжээ нь тусдаа ажилладаг боловч хэрэглэгчийн төхөөрөмж (UE) зэрэгцээ ашиглах боломжтой. Холимог сүлжээ нь 5G-ийн өргөн хамрах хүрээ, хөдөлгөөнт чанарыг ашиглах, Wi-Fi-ийн өндөр хурд, хямд өртөг, дотоод орчны давуу талыг ашиглах, хооронд нь ухаалагаар ачаалал шилжүүлэлт хийх (offloading, steering, splitting) зэрэг үндсэн зорилготой. Орчин үеийн утасгүй холбооны хамгийн чухал хоёр технологиуд болох 5G ба Wi-Fi хандалтын зарчмыг хүснэгт 2.1 болон хүснэгт 2.2-д харуулав.

Хүснэгт 2.1 5G сүлжээний хандалтын үндсэн зарчим

№	Технологи	Тайлбар
1.	5G NR (New Radio)	6 ГГц ба мм долгионы давтамжийг дэмждэг нэгдсэн, илүү чадавхитай 5G утасгүй агаарын интерфэйсийн дэлхийн шинэ стандарт.
2.	eMBB (Enhanced Mobile Broadband)	4K видео, VR/AR зэрэг өгөгдлийн өндөр хурдыг дэмждэг.
3.	Хэт найдвартай, хоцрогдол багатай холбоо (URLLC)	Хэт найдвартай, хоцрогдол багатай холбоо нь алсын зайнаас мэс засал хийх, өөрийн удирдлагатай тээврийн хэрэгсэл зэрэг тусгай хэрэглээнд зориулагдсан.
4.	mMTC (Massive Machine-Type Communications)	Маш олон тооны IoT төхөөрөмжийн холболтыг дэмждэг.
5.	Standalone (SA) & Non-Standalone (NSA)	Бие даасан (SA) ба бие даасан бус (NSA) нь 5G үндсэн сүлжээнд ашигладаг бол NSA өгөгдөлд 5G NR бүхий 4G LTE цөмд тулгуурладаг.
6.	Beamforming & Massive MIMO	Илүү нарийвчлалтай дохионы чиглүүлэмжийн үр дүнд багтаамж, үйлчлэх хүрээ, найдваржилтыг сайжруулдаг.
7.	Сүлжээний зүсэлт (Network Slicing)	Зориулалтын нөөцөөр өөр өөр хэрэглээний тохиолдлуудад (жишээ нь, IoT, аж үйлдвэр, энтертайнмент) үйлчлэхийн тулд сүлжээний логик хуваалт
8.	Захын тооцоолол (Edge Computing)	Боловсруулалтыг хэрэглэгчид болон төхөөрөмжүүдэд ойртуулж, хоцролтыг багасгаж, хурдыг сайжруулдаг.
9.	Жижиг үүрүүд болон холимог сүлжээ (Small Cells / HetNet)	Хамрах хүрээ, багтаамжийг сайжруулахын тулд жижиг бааз станцуудыг нягт байрлуулах, ялангуяа хотын орчинд.

10.	Mobility Management	Үүрүүд болон Радио хандалтын технологид (RAT) үндэслэн саадгүй, тасралтгүй дамжуулалтыг хангана.
-----	---------------------	--

Хүснэгт 2.2 IEEE802.11 WiFi стандартын тойм

Үндсэн бүрэлдхүүн	Тайлбар
Wi-Fi 5 / 6 / 6E / 7	Хурд, багтаамж, үр ашгийг нэмэгдүүлсэн Wi-Fi стандартууд (802.11ac/ax/be). Wi-Fi 6e нь 6Гц зурвас нэмэгдсэн.
Лицензгүй спектр (Unlicensed Spectrum)	ISM зурваст ажилладаг (2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz) - спектрийн лиценз шаардлагагүй.
Хандалтын цэг (Access Point-AP)	Wi-Fi сүлжээний төв зангилаа нь үйлчлүүлэгчид буюу төхөөрөмжүүдэд утасгүй холбогдох боломжийг олгоно.
OFDM/MU-MIMO	Дамжуулах чадвар, хэрэглэгчийн туршлагыг сайжруулсан модуляцийн болон хандалтын техник
Шууд холболт/ торон сүлжээ (Wi-Fi Direct/Mesh)	Чиглүүлэгчгүй (роуторгүй) ижил төвийн шууд холболт, илүү өргөн хүрээг хамарсан торон сүлжээ.
Seamless Roaming	Холболтыг таслахгүйгээр хандалтын цэгүүд (AP) хооронд дамжуулалтыг идэвхжүүлдэг (Байгууллагын тухайн байршилд Wi-Fi болон 5G-ийг хамтад нь оффис, кампус, үйлдвэр, алсын зайнаас гүйцэтгэх ажлын орчинд өндөр гүйцэтгэлтэй, аюулгүй, найдвартай утасгүй холболтоор хангана.
Wi-Fi Offloading	Үүрэн холбооны ачааллыг багасгахын тулд гар утасны ачааллыг Wi-Fi сүлжээнд шилжүүлдэг нь 5G-д чухал ач холбогдолтой.
QoS (Quality of Service)	Тохиромжтой гүйцэтгэлийг хангахын тулд ачааллыг (жишээ нь, VoIP, видео) эрэмбэлсэн үйлчилгээний чанар.
WPA3 / Security	Wi-Fi сүлжээ болон холбоог хамгаалах орчин үеийн аюулгүй байдлын протокол.

Байгууллагын тухайн байршилд Wi-Fi болон 5G-ийг хамтад суурилуулах нь оффис, кампус, үйлдвэр, алсын ажлын орчинд өндөр гүйцэтгэлтэй, аюулгүй, найдвартай утасгүй холболтоор хангадаг. Wi-Fi (ялангуяа Wi-Fi 6/6E/7) болон 5G (ялангуяа хувийн 5G) нь тохиромжтой.

2.1 Холимог сүлжээнд хэрэгжүүлэх стандартууд

5G ба Wi-Fi холимог сүлжээг (Heterogeneous Network- HetNet) хэрэгжүүлэхэд олон улсын хэмжээнд хэд хэдэн стандарт болон техникийн үзүүлэлтүүд ашиглагддаг. Эдгээр нь 5G-ийн цөм болон RAN хэсгийг Wi-Fi-ийн архитектуртай уялдуулах, ачаалал шилжүүлэх, нөөц хуваарилах, аюулгүй байдлыг хангах зорилготой.

A. 3GPP стандарт

5G/Wi-Fi холимог сүлжээг хэрэгжүүлэхэд хамгийн гол нь 3GPP стандартууд дээр тулгуурладаг.

3GPP Release 8–12 (LTE үе шат):

1. ANDSF (Access Network Discovery and Selection Function, Rel-8): Төхөөрөмжид (UE) Wi-Fi эсвэл LTE аль сүлжээ ашиглахыг зөвлөдөг функц.
2. ePDG (Evolved Packet Data Gateway, Rel-11): Wi-Fi-д холбогдсон хэрэглэгчийг операторын EPC (LTE core)-той уялдуулдаг.
3. IFOM (IP Flow Mobility, Rel-10): Хэрэглэгчийн IP урсгалыг LTE ба Wi-Fi хооронд тасралтгүй шилжүүлэх боломж олгодог. Жишээ нь: Видео үзэж байх үед LTE → Wi-Fi руу шилжихэд тасалдал үүсэхгүй.
4. LIPA/SIPTO (Rel-10): Local IP Access / Selected IP Traffic Offload → Wi-Fi эсвэл орон нутгийн сүлжээгээр дата урсгалыг шууд гаргах шийдэл.

3GPP Release 13–15 (5G-д шилжих үе):

1. LTE-WLAN Aggregation (LWA, Rel-13): LTE ба Wi-Fi-ийн хооронд downlink carrier aggregation хийх боломж.
2. LWIP (LTE-WLAN Radio Level Integration with IPsec Tunnel, Rel-13): LTE core болон Wi-Fi-г IPsec туннелиар уялдуулж, нэг IP урсгал болгон удирдана.
3. Rel-14, Rel-15: Wi-Fi болон LTE/5G хооронд seamless handover сайжруулах болон VoWiFi (Voice over Wi-Fi) стандартыг хөгжүүлж, дуудлагыг Wi-Fi-ээр дамжуулан 5G/LTE цөм сүлжээ рүү чиглүүлдэг.

3GPP Release 16–17 (5G үндсэн үе шат):

1. ATSSS (Access Traffic Steering, Switching, Splitting, Rel-16): 5G болон Wi-Fi-г зэрэг ашиглаж, урсгалыг зөвхөн нэг сүлжээгээр явуулах (steering), сүлжээнүүдийн хооронд шилжүүлэх (switching), урсгалыг хувааж 5G ба Wi-Fi-ээр зэрэг дамжуулах (splitting) гэсэн үндсэн үүрэгтэй.
2. Multipath TCP (MPTCP) / QUIC support: Нэг хэрэглэгчийн аппликейшн (жишээ нь: YouTube) зэрэг олон сүлжээгээр урсгалаа дамжуулах боломжтой.
3. Non-3GPP Interworking Function (N3IWF): Wi-Fi-г 5G core (5GC)-той уялдуулах стандарт интерфэйс.

3GPP Release 18 ба түүнээс цааш (5G-Advanced)

1. Enhanced ATSSS (eATSSS): QoE-д суурилсан илүү ухаалаг offloading. Жишээ нь: видео урсгал Wi-Fi сүлжээгээр, Gaming/AR/VR үйлчилгээг 5G сүлжээгээр дамжуулна.
2. AI/ML-д суурилсан offloading: хэрэглэгчийн хэрэглээ, байршил, сүлжээний ачааллаас шалтгаалан урсгалыг ухаалаг удирдах.
3. Network Slicing integration: 5G ба Wi-Fi-г хамтдаа slice хийж, тодорхой үйлчилгээ (e.g., eHealth, Smart City)-д зориулсан тусгай нөөц гаргах.

Холимог 5G/Wi-Fi сүлжээнд Rel-10: IFOM, LIPA/SIPTO; Rel-13: LWA, LWIP; Rel-16 – ATSSS, N3IWF; Rel-18: eATSSS, AI/ML суурилсан шийдэл зэрэг нь 3GPP-ийн стандартууд хамгийн чухал нь юм.

Хүснэгт 2.3 5G хамаарах үндсэн стандартууд

Стандарт	Үүрэг
3GPP TS 23.501	5G System Architecture (5GS) — HetNet болон non-3GPP (Wi-Fi) хандалтыг дэмжих архитектурын үндэс.
3GPP TS 23.502	Procedures for 5GS — Wi-Fi (non-3GPP) холболтын бүртгэл, гарцын удирдлага, handover, steering журам.
3GPP TS 23.316	Access Traffic Steering, Switching, and Splitting (ATSSS) — 5G болон Wi-Fi хооронд урсгал шилжүүлэх, хуваах зарчим.
3GPP TS 24.502	Non-3GPP access signalling (N1/N2 интерфэйсээр) — UE болон 5GC хооронд Wi-Fi-ээр холбогдох протокол.
3GPP TS 24.261	ANDSF (Access Network Discovery and Selection Function) — Хандалтын сүлжээ илрүүлэх, сонгох бодлого (LTE-ийн үеэс).
3GPP TS 33.501	Security architecture and procedures — non-3GPP хандалтын аюулгүй байдлын шаардлага (IPsec, EAP-TLS, EAP-AKA').

Б. Wi-Fi Alliance ба IEEE стандарт

5G/Wi-Fi холимог сүлжээг хэрэгжүүлэхэд зөвхөн 3GPP-ийн стандарт хангалтгүй бөгөөд Wi-Fi Alliance ба IEEE-ийн стандартуудтай уялдуулах шаардлагатай байдаг.

IEEE стандартууд (802.11 бүл):

IEEE 802.11n/ac/ax/be

- 802.11n (Wi-Fi 4): OFDM ба MIMO ашиглан суурь өндөр хурд.
- 802.11ac (Wi-Fi 5): MU-MIMO, Beamforming → өндөр throughput.
- 802.11ax (Wi-Fi 6/6E): OFDMA, Target Wake Time (TWT) → олон төхөөрөмжийг зэрэг удирдах, latency бууруулах.
- 802.11be (Wi-Fi 7) (2024 оноос батлагдсан): Multi-Link Operation (MLO) → нэг төхөөрөмж олон сувгаар зэрэг холбогдох → 5G-ийн ATSSS-тэй уялдахад чухал.

IEEE 802.11r (Fast BSS Transition):

- Wi-Fi сүлжээнүүдийн хооронд хурдан шилжилт хийх стандарт.
- 5G handover-тэй уялдуулахад ашиглагддаг.

IEEE 802.11k/v:

- 802.11k: AP-уудын хөршийн мэдээллийг төхөөрөмжид дамжуулж, шилжилтийг оновчтой болгодог.
- 802.11v: AP Steering – төхөөрөмжийг аль AP руу шилжүүлэхийг зөвлөдөг.
- Энэ хоёр нь 5G-ийн ANDSF/PCF бодлогын удирдлага-тай нийцэж ажилладаг.

IEEE 802.11u (Interworking with External Networks):

- Wi-Fi болон операторын core network хооронд seamless authentication, roaming хийх боломж олгодог.
- 3GPP-ийн N3IWF ба ePDG-тэй уялдахад хэрэглэгдэнэ.

IEEE 802.11ai (Fast Initial Link Setup – FILS):

- Wi-Fi сүлжээ рүү хурдан холбогдох протокол.
- 5G NR-ийн RRC connection setup-тэй адилхан зарчимтай.

2. Wi-Fi Alliance-ийн санаачилгууд:

Passpoint (Hotspot 2.0) нь Wi-Fi Alliance баталсан стандарт бөгөөд SIM-карт эсвэл сертификатаар автоматаар Wi-Fi-д холбогдох → 5G/Wi-Fi seamless handover хийхэд суурь болно.

Wi-Fi CERTIFIED Vantage нь Wi-Fi 6/6E сүлжээний чанар, нягтралтай орчинд ажиллах чадварыг баталгаажуулдаг. QoE-д тулгуурлан ачаалал шилүүлэхэд тохиромжтой.

Wi-Fi CERTIFIED EasyMesh нь олон AP-ийг нэг logical Wi-Fi сүлжээнд удирдах болон 5G HetNet-ийн small cell + Wi-Fi интеграцид тохиомжтой.

Wi-Fi CERTIFIED QoS Management нь урсгалын чанарын бодлого (QoS Policy) хэрэгжүүлэх мөн 5G-ийн Policy Control Function (PCF)-тэй нийцэж ажилладаг.

WPA3 & Enhanced Open нь Wi-Fi-ийн аюулгүй байдлын шинэ стандартууд бөгөөд 5G -ийн цөм сүлжээтэй холбогдсон үед хэрэглэгчийн authentication-ийг найдвартай болгодог.

Хүснэгт 2.4 Wi-Fi-д хамаарах үндсэн стандартууд

Стандарт	Үүрэг
IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6/6E)	Өндөр нягтралтай орчинд (5G HetNet хотын бүс) дамжуулах хурд, latency сайжруулах.
IEEE 802.11be (Wi-Fi 7)	Multi-Link Operation (MLO), өндөр throughput — 5G integration-д илүү тохиромжтой.
IEEE 802.11u	Interworking with External Networks — Wi-Fi AP нь операторын core network-тэй уялдах боломж.
Wi-Fi CERTIFIED Passpoint (Hotspot 2.0)	Автомат аюулгүй холболт, roaming.
Wi-Fi CERTIFIED Agile Multiband	Олон зурвасын хурдан шилжилт, load balancing — ATSSS-тэй хослуулахад ашиглана.

Хүснэгт 2.5 3GPP болон IEEE/Wi-Fi Alliance харьцуулалт

Үүрэг	3GPP стандарт	IEEE/Wi-Fi Alliance стандарт
Урсгал шилжүүлэлт	IFOM, ATSSS	802.11k/v/r/u, Passpoint
Нөөц хуваарилалт	Network Slicing, PCF	QoS Management, Wi-Fi Vantage
Сүлжээ уялдаа	N3IWF, ePDG	802.11u, Passpoint
Хоцролт бууруулах	5G NR low latency	802.11ax TWT, 802.11be MLO
Аюулгүй байдал	5G AKA, SEPP	WPA3, Enhanced Open
Seamless холболт	Handover (Xn, N2/N3)	802.11r, 802.11ai (FILS)

В. IETF ба бусад протоколууд

5G/Wi-Fi холимог сүлжээ (HetNet) нь зөвхөн 3GPP, IEEE/Wi-Fi Alliance стандартууд дээр тулгуурлахгүй, бас IETF-ийн (Internet Engineering Task Force) RFC-үүд ба бусад протоколуудыг хэрэгжүүлж байж бүрэн ажиллагаатай болдог.

Стандарт / RFC	Үүрэг
RFC 4301 (IPsec)	5G-ийн N3IWF болон UE хооронд аюулгүй туннел үүсгэх.
RFC 7296 (IKEv2)	IPsec-ийн түлхүүр солилцоо — 5G/Wi-Fi secure onboarding.
RFC 5448 (EAP-AKA')	SIM/USIM суурилсан баталгаажуулалт Wi-Fi-д.
Multipath TCP (MPTCP)	ATSSS-д ашигладаг олон замын TCP урсгал удирдлага.
QUIC multipath draft	MPTCP-ийн дараагийн үе, бага latency-тэй урсгал хуваарилалт.

Г. Нэмэлт холболт ба ачаалал шилжүүлэх технологи

- LWA (LTE-Wi-Fi Aggregation): LTE-ийн үеийн стандарт, 5G-д зарим уялдаа хадгалагдсан.
- LWIP (LTE-Wi-Fi IPsec Tunnel): EPC болон Wi-Fi хооронд IPsec туннелээр өгөгдөл дамжуулах.
- IFOM (IP Flow Mobility): Урсгалын түвшинд Wi-Fi/5G хооронд шилжүүлэх.
- MAPCON (Multi-Access PDN Connectivity): Нэг PDN-д олон хандалтаар холбогдох.

Жишээ хэрэгжүүлэлт: N3IWF (Non-3GPP InterWorking Function) нь 5GC ба Wi-Fi хооронд IPsec туннел, N2/N3 интерфэйс дамжуулалт хийнэ. Харин UPF нь ATSSS бодлогоор урсгал салгах, нэгтгэх ба PCF-г Wi-Fi/5G steering бодлого удирдах үүрэгтэй.

2.2 5G ба Wi-Fi интегралчлал

5G-ийн ATSSS стандарт нь хандалтын төрлийг хоёуланг нь динамик ашиглах боломжийг олгодог. Энэ тохиолдолд Wi-Fi offload ба Wi-Fi нь зөвхөн үүрэн холбооны ачааллыг бууруулдаг. Аж ахуйн нэгжүүд болон орон сууцууд ихэвчлэн Wi-Fi-г доторх хамрах хүрээг хангахын тулд ашигладаг бол 5G нь гадаа болон өргөн талбайд нэвтрэх боломжийг олгодог.

5G болон Wi-Fi хоорондын ачааллыг шилжүүлэх (offload) нь үр ашгийг дээшлүүлэх, сүлжээний ачаалал болон зардлыг бууруулах зорилгоор гар утасны өгөгдлийн ачааллыг 5G үүрэн сүлжээнээс Wi-Fi сүлжээнд, ялангуяа гэр, оффис, кампус, халуун цэг зэрэг орчинд шилжүүлдэг техник юм. 5G-ийн хүрээнд Wi-Fi шилжүүлэх нь мобайл хэрэглэгчийн зарим ачааллыг лицензтэй 5G сүлжээнээс лицензгүй Wi-Fi сүлжээнд шилжүүлэх, ихэвчлэн Wi-Fi дохио хангалттай байгаа нөхцөлд жишээлбэл, видео, вэб үзэх, файл татах зэрэг тохиромжтой үед ашиглана.

Механизм	Тайлбар
IP Flow Mobility (IFOM)	Сонгосон IP урсгалыг 5G болон Wi-Fi хооронд динамикаар шилжүүлэх боломжийг олгоно.
ATSSS (Access Traffic Steering, Switching and Splitting)	5G цөмийн (5GC) нэг хэсэг нь Wi-Fi болон 5G сүлжээг нэгэн зэрэг ашиглах боломжийг олгодог.

LIPA/SIPTO	Орон нутгийн IP хандалт ба сонгогдсон IP ачааллыг буулгахдаа 5G цөмийг сүлжээг алгасах замаар дотоод эсвэл шууд интернет рүү чиглүүлнэ.
Wi-Fi Calling / VoWiFi	Wi-Fi-аар дууг (яриа) дамжуулснаар үүрэн холбооны ачааллыг бууруулж, дотоод орчны хамрах хүрээг сайжруулдаг.
Сүлжээний хандалтыг илрүүлэх, сонгох функц ANDSF (Access Network Discovery and Selection Function)	Хэрэглэгчийн төхөөрөмжид (UE) хэзээ Wi-Fi руу шилжихийг шийдэхэд тусалдаг ихэвчлэн LTE, 5G-д хэсэгчлэн ашиглагдана.

Хүснэгт 2.7 5G-д Wi-Fi ачаалал шилжүүлэх давуу тал

Давуу тал	Тайлбар
5G цөм сүлжээний ачааллыг бууруулах	Өргөн зурвасын ачааллыг тухайлбал, өгөгдлийн урсгал, татаж авах зэргийг Wi-Fi-аар дамжуулж болно.
Хоцролт бууруулах	Хэрэв Wi-Fi локал нь холын 5G серверүүдээр дамжуулан чиглүүлэхтэй харьцуулахад хоцролт нь багасна.
Өртгийг бууруулах	Операторууд зөөвөрлөлтийн болон цөм сүлжээний нөөцийн хуваарилалтын хувьд спектрийг хэмнэдэг. Эцсийн хэрэглэгчид гар утасны дата бага хэрэглэж болно
Спектр ашиглалтын үр ашгийг сайжруулах	Лицензтэй 5G спектрийг хөдөлгөөнт болон чухал үйлчилгээнд зориулан нөөцлөх боломжтой.
Дотор орчны бүрхэлтийг сайжруулах	Wi-Fi нь дотор орчинд (хананы нэвтрэлт, нягтрал ихтэй нөхцөлд) илүү тохиромжтой.
Хэрэглэгчийн туршлага	Мультимедиа болон үүлэн үйлчилгээний хувьд ачаалал бага, илүү тогтвортой гүйцэтгэлтэй.

Хүснэгт 2.8 Wi-Fi ачаалал шилжүүлэхэд тулгарах бэрхшээлүүд

Сорилт	Тайлбар
Аюулгүй байдал	WPA3 эсвэл аж ахуйн нэгжийн шийдлүүдийг ашиглаагүй тохиолдолд аюулгүй байдлын Wi-Fi нь 5G-ээс бага хамгаалалттай байж магадгүй.
QoS	QoS менежментийн тогтвортой үйлчилгээний чанарыг баталгаажуулах нь Wi-Fi дээр илүү төвөгтэй.
Хөдлөмж	Хөдөлгөөнт байдал Wi-Fi болон 5G хооронд саадгүй шилжүүлэх (ялангуяа хөдөлж байх үед) хэцүү байдаг.
Сүлжээний зохицуулалт	Сүлжээний зохицуулалт нь гар утасны үндсэн болон Wi-Fi дэд бүтцийн хооронд нягт уялдаа холбоог шаарддаг.

Хүснэгт 2.9 Wi-Fi ачаалал шилжүүлэх стратеги

Стратеги	Тайлбар
Reactive Offload: Реактив ачаалал шилжүүлэлт	5G ачааллын түгжрэл эсвэл дохионы чанар муудсан үед идэвхиждэг.
Proactive Offload: Идэвхтэй ачаалал шилжүүлэлт	Байршил, өдрийн цаг эсвэл програмын төрөлд үндэслэнэ.
Hybrid Steering (via ATSSS):	Гибрид (ATSSS-ээр): Ухаалаг шийдвэр гаргах боломжийг олгодог (жишээ нь, бодит хугацааны дуу (яриа) 5G руу чиглүүлэх, Wi-Fi руу их хэмжээний татан авалт хийх зэрэг).

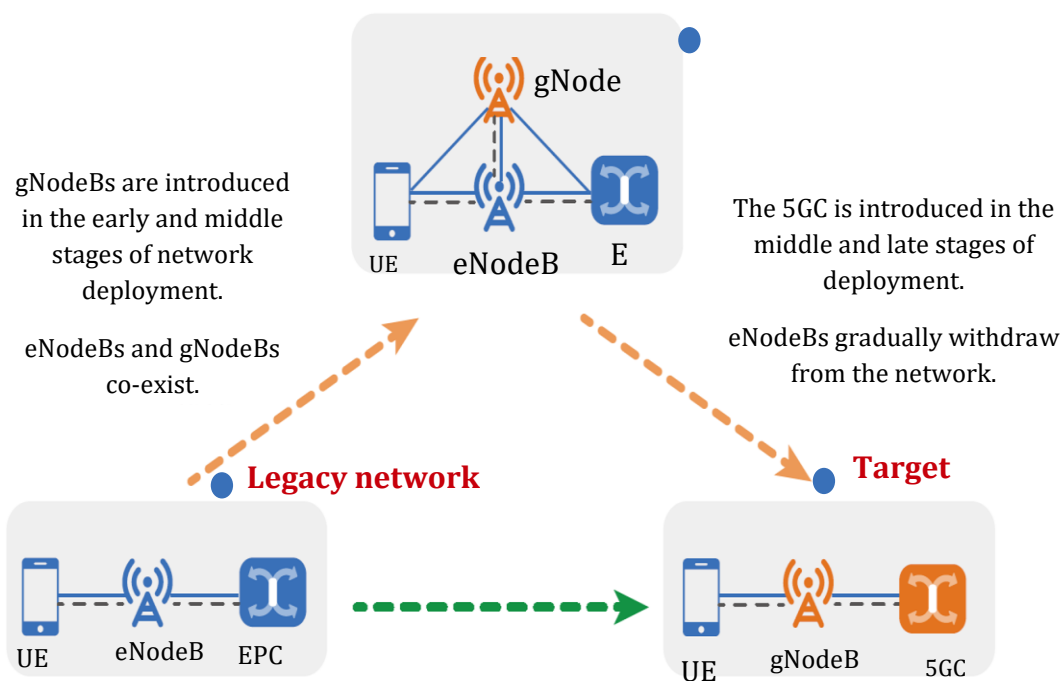
Хүснэгт 2.10 Хэрэглээний тохиолдлууд

Хэрэглэх тохиолдлууд	Тайлбар
Home & Enterprise	Zoom, Netflix зэрэг аппликешны өгөгдлийг Wi-Fi руу дахин чиглүүлэх. Энэ үед чухал удирдлагын урсгал 5G дээр хэвээр байна.
Цэнгэлдэх хүрээлэн ба арга хэмжээ (Stadiums & Events)	Нийтийн Wi-Fi-г ачаалснаар гар утасны сүлжээний ачааллыг бууруулна.
Transport & IoT	Зөөвөрлөлт ба IoT дамжуулахад 5G-г ашиглахдаа буудлууд дээр Wi-Fi ашиглах

2.3 5G сүлжээний бүтэц, хэрэгжүүлэх хувилбарууд

5G сүлжээг хэрэгжүүлэх үндсэн хувилбарууд гэдэг нь операторууд 4G (LTE) сүлжээний дэд бүтэц дээрээ тулгуурлан эсвэл шинэ 5G цөм сүлжээ ашиглан үйлчилгээ нэвтрүүлэхийг хэлдэг. Үүнийг 3GPP-ийн тодорхойлсон Non-Standalone (NSA) болон Standalone (SA) хувилбарууд, мөн тэдгээрийн доторх архитектурын сонголтуудаар ангилдаг. 5G Radio Access Network-ийг ашиглаж байгаа ч LTE EPC (Evolved Packet Core) дээр тулгуурладаг. Гол онцлог нь 4G бааз станц нь control plane-ийг удирдах ба 5G gNB нь өндөр хурдны user plane data дамжуулна. Ингэснээр хуучин 4G цөм сүлжээ ашиглах тул хурдан, хямд нэвтрүүлж, 5G NR-ийн өндөр хурдыг хэрэглэгчдэд шууд хүргэнэ. 5G сүлжээг 3, 3a, 3x, 4, 4x, 7, 7a, 7x зэрэг NSA хувилбаруудаас улс орнууд өөрийнхөө онцлогт тохирсон хувилбарыг сонгож хэрэгжүүлнэ. 3GPP Option 3x нь хамгийн өргөн хэрэглэгдэж буй NSA хувилбар бөгөөд LTE (eNB) нь anchoring хийж, 5G gNB нь data offload хийдэг.

Standalone (SA) хувилбар нь 5G Radio (gNB) болон 5G Core (5GC) ашиглан бүрэн бие даасан сүлжээ юм. Гол онцлог нь удирдлагын болон хэрэглэгчийн мэдээлэл аль аль нь 5GC дээр ажиллана. Жинхэнэ 5G үйлчилгээ нь network slicing, URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication), massive IoT бүрэн дэмжигдэнэ.



Зураг 2.1 4G/5G сүлжээг хэрэгжүүлэх хувилбар

4G-ээс 5G сүлжээнд шилжих үе шаттай хөгжлийн үйл явцыг Зураг 2.1-д харуулав. Үүнд:

1. Хуучин сүлжээ (Legacy Network) цэвэр 4G архитектур буюу 5G бүрэн нэвтрээгүй эхний үе шат:

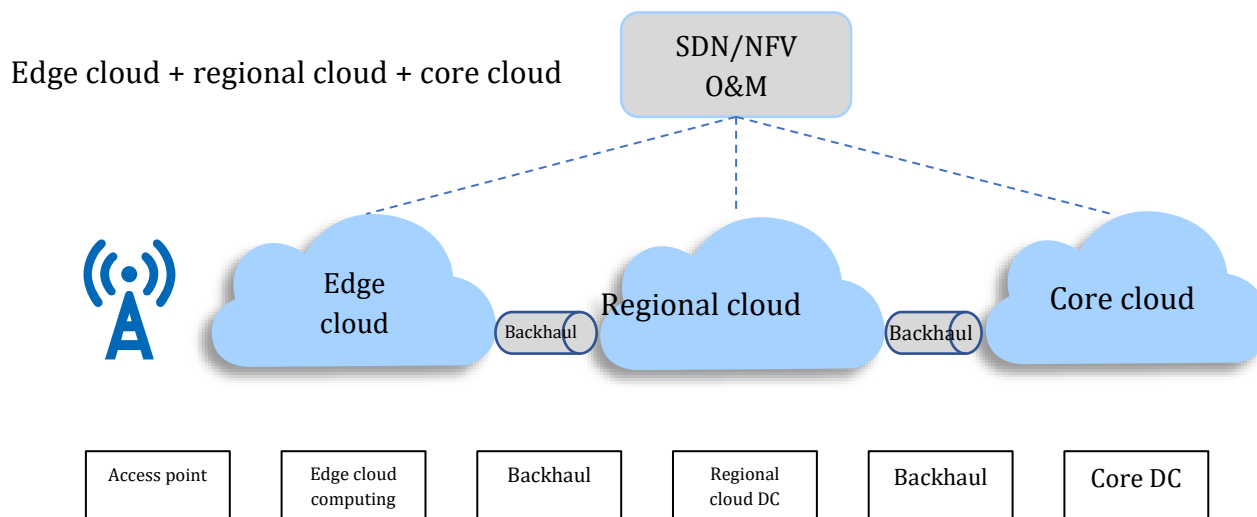
- Хэрэглэгчийн төхөөрөмж UE (User Equipment) → 4G баз станц (eNodeB) → 4G цөм сүлжээ EPC (Evolved Packet Core).

2. Шатлалтай шилжилт Dual Connectivity (NSA – Non-Standalone) үе шат:

- eNodeB болон gNodeB хамтран ажилладаг. Энэ үе шатанд gNodeB (5G баз станц) нэмэгдэж, eNodeB-г дэмжих хэлбэрээр сүлжээнд байх ба 5G сүлжээний зарим үйлдлүүд eNodeB-ээр дамжин явагддаг.

3. Зорилтот сүлжээ (Target Network) цэвэр 5G архитектур буюу Standalone 5G:

- gNodeB → 5GC (5G Core) шууд холбогдоно. Энэ үед eNodeB (4G станц) сүлжээнээс гурван шатлалтайгаар аажмаар гарч байна.



Зураг 2.2 5G сүлжээний үүлэн сүлжээт бүтэц

5G сүлжээний бүтэцийг өндөр хурд, бага хоцролт, олон төхөөрөмжийг дэмжих зэрэг шинэ боломжуудыг хэрэгжүүлэхээр бүтээсэн. Сүлжээний бүтэц нь дараах үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгүүдээс бүрдэнэ. Үүнд:

1. Хандалтын сүлжээ (Access Network - AN)

5G-д Next-Generation Radio Access Network (NG-RAN) ашигладаг. Энэ хэсэг нь хэрэглэгчийн төхөөрөмж болон үндсэн сүлжээний хоорондын холболтыг хангана. Үндсэн бүрэлдэхүүн хэсэгт нь: 5G-ийн бааз станц - gNodeB (gNB) нь хэрэглэгчийн төхөөрөмж болон сүлжээний хооронд өгөгдөл дамжуулна. NR (New Radio) технологи дээр ажиллах ба DU (Distributed Unit) болон CU (Centralized Unit) болгон хувааж болно.

2. Цөм сүлжээ (Core Network - CN)

5G цөм сүлжээг 5G Core (5GC) гэж нэрлэнэ. Энэ нь бүрэн IP-д суурилсан архитектуртай. Цөм сүлжээний үндсэн функцуудтай ба дараах үүрэгтэй:

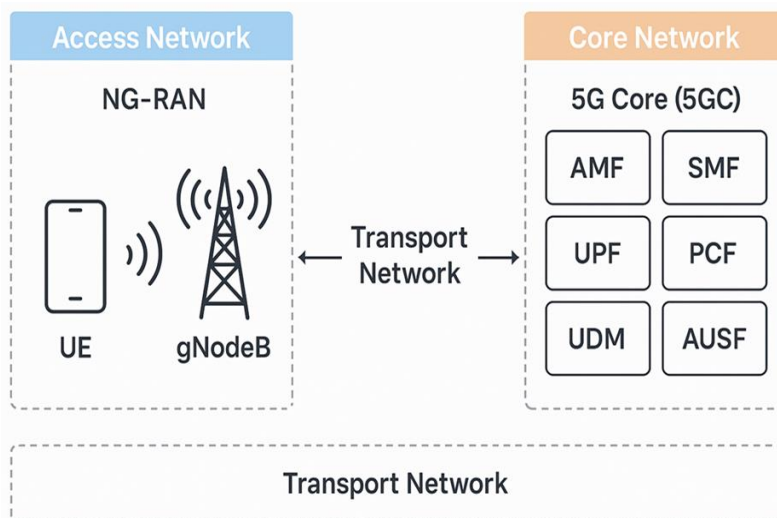
- AMF (Access and Mobility Management Function) – хэрэглэгчийн нэвтрэлт, хөдөлгөөнийг удирдана.
- SMF (Session Management Function) – өгөгдлийн урсгалыг удирдана.
- UPF (User Plane Function) – хэрэглэгчийн өгөгдлийг дамжуулна.
- PCF (Policy Control Function) – бодлогын хяналт.
- UDM (Unified Data Management) – хэрэглэгчийн өгөгдлийн удирдлага.
- AUSF (Authentication Server Function) – баталгаажуулалт.

3. Хэрэглэгчийн төхөөрөмж (UE – User Equipment)

- Гар утас, таблет, IoT төхөөрөмж гэх мэт 5G дэмждэг хэрэглэгчийн төхөөрөмж.
- 5G NR протокол ашиглан gNodeB-тай холбогдоно.

4. Дамжуулах сүлжээ (Transport Network)

Энэ RAN ба цөм сүлжээг хооронд нь холбох үүрэгтэй сүлжээ юм. Ихэвчлэн шилэн кабель, microwave, IP/MPLS технологи ашигладаг.



Зураг 2.3 5G сүлжээний ерөнхий бүтэц

5G сүлжээний үндсэн архитектур (5G Network Architecture)-ыг Зураг 2.3-д харуулав. 5G сүлжээ нь радио хандалтын сүлжээ, дамжууллын сүлжээ, цөм сүлжээ гэсэн үндсэн бүрэлдэхүүн хэсэгтэй ба дараах үүрэгтэй.

1. Хандалтын сүлжээ (Access Network)

- Хэрэглэгчийн төхөөрөмж UE (User Equipment): (гар утас, таблет, IoT төхөөрөмж гэх мэт).
- gNodeB (Next Generation NodeB): 5G-ийн суурь станц бөгөөд UE-тэй радио холбоо үүсгэнэ. Энэ нь NG-RAN (Next Generation Radio Access Network)-ийн хэсэг юм.

2. Дамжууллын сүлжээ (Transport Network)

- Хандалтын сүлжээ (gNodeB) болон Үндсэн сүлжээ (5G Core)-ийг холбож өгөгдөл, дохиоллын урсгалыг дамжуулдаг дунд үеийн сүлжээ.

3. Цөм сүлжээ (Core Network – 5GC)

5G Core (5GC) нь сүлжээний бүх ухаалаг удирдлага, өгөгдлийн урсгалын чиглүүлэлт, хэрэглэгчийн үйлчилгээний чанарыг хангадаг. Үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгүүд нь:

- AMF (Access and Mobility Management Function): хэрэглэгчийн бүртгэл, холболт, хөдөлгөөнт удирдлага.
- SMF (Session Management Function): сессийн удирдлага, IP хаяг олголт, туннелийн удирдлага.
- UPF (User Plane Function): хэрэглэгчийн өгөгдлийг чиглүүлэх, сүлжээний урсгал боловсруулах.
- PCF (Policy Control Function): бодлого, нөөцийн хуваарилалт, QoS (Quality of Service)-ийн удирдлага.
- UDM (Unified Data Management): хэрэглэгчийн бүртгэл, authentication болон захиалгын мэдээлэл хадгалалт.
- AUSF (Authentication Server Function): хэрэглэгчийн нэвтрэлт, баталгаажуулалт.

5G архитектур нь хэрэглэгчийн төхөөрөмж (UE) → радио сүлжээ (gNodeB) → дамжууллын сүлжээ → 5G Core руу холбогдож, сүлжээний удирдлага, хөдөлгөөнт байдал, бодлого, өгөгдөл дамжуулалт зэрэг бүх үйлчилгээг зохион байгуулдаг 5G-ийн үндсэн бүтэцтэй.

III. 5G/Wi-Fi АЧААЛЛЫГ ШИЛЖҮҮЛЭХ АРГА, ТЕХНОЛОГИ

5G/Wi-Fi холимог сүлжээнд (heterogeneous network) сүлжээний ачааллыг бууруулах буюу traffic offload хийх нь орчин үед сүлжээний оновчлолын чухал асуудал юм. Ингэснээр 5G-ийн төвлөрсөн ачааллыг Wi-Fi сүлжээнд шилжүүлж, QoS сайжруулж, хоцролтыг бууруулж, зардлыг хэмнэх боломжтой болдог.

LIPA (Local IP Access) болон SIPTO (Selected IP Traffic Offload) нь LTE болон 5G сүлжээн дэх өгөгдлийн урсгалыг цөм сүлжээгээр дамжуулахгүйгээр шууд хандах боломжийг бүрдүүлдэг мэдээллийн ачааллыг шилжүүлэх арга (offloading техникүүд) юм. Энэ нь мэдээллийн урсгалын ачааллыг бууруулах, саатлыг бууруулах, мөн сүлжээний нөөцийн үр ашигтай хэрэглээнд чухал ач холбоогдолтой.

3.1 Холимог сүлжээнд 5G/Wi-Fi ачаалал шилжүүлэхэд босгын түвшин тодорхойлох судалгаа

Холимог сүлжээний (HetNet -heterogeneous network) орчинд gNB (5G-ийн баз станц) болон Wi-Fi AP (хандалтын цэг) хоорондын threshold signal level гэдэг нь тухайн хоёр сүлжээний хооронд өгөгдөл дамжуулах эсвэл ачаалал шилжүүлэх (offloading/steering) шийдвэр гаргахдаа ашигладаг дохионы чадлын босгын түвшний утга юм. Өөрөөр хэлбэл,

- UE (User Equipment) нь нэгэн зэрэг 5G болон Wi-Fi-д холбогдож чадна (ATSSS, IFOM гэх мэт технологиор).
- Сүлжээ нь аль холболтыг ашиглах эсэхээ RSRP/SINR (5G) болон RSSI/SNR (Wi-Fi)-ийн босго утга-д тулгуурлан сонгодог.
- Жишээлбэл, Wi-Fi-ийн дохионы түвшин -65 dBm-аас доош унах юм бол Wi-Fi-аас 5G-д шилжих, эсрэгээр нь 5G-ийн RSRP -100 dBm-аас багасахад Wi-Fi-д шилжих гэх мэтээр босгын түвшинг тогтоодог.

Хүснэгт 3.1 Туршилтын орчинд хэрэглэгдэх босгын
ытүвшний утгууд

Сүлжээ	Үзүүлэлт	Threshold утга (жишээ)
5G gNB	RSRP	$-95 \sim -100$ dBm
5G gNB	SINR	$5 \sim 10$ dB
Wi-Fi AP	RSSI	$-65 \sim -70$ dBm
Wi-Fi AP	SNR	$20 \sim 25$ dB

Эдгээр утга нь стандартын хатуу заалт биш, харин сүлжээний төлөвлөлт, QoE шаардлага, болон хэрэглэгчийн хөдөлгөөнт байдлаас шалтгаалан өөрчлөгдөж болно.

HetNet орчинд gNB (5G) ба Wi-Fi AP хоорондын threshold signal level-ийг сонгох алгоритмыг ATSSS (Access Traffic Steering, Switching, and Splitting) / IFOM (IP Flow Mobility)-ийн жишээн дээр тайлбарлавал:

- Хэрэглэгчийн төхөөрөмж (UE) аль холболтыг ашиглахаа QoE (Quality of Experience) болон QoS (Quality of Service) үзүүлэлтүүдэд тулгуурлан шийднэ.

- 5G ба Wi-Fi сүлжээний дохионы чанар, саатал, сүлжээний ачаалал, үйлчилгээний төрөл зэргийг харьцуулна.

2. Шийдвэр гаргахал дараах параметрууд ашиглагдана:

Параметр	5G-д ашиглах	Wi-Fi-д ашиглах
Дохионы чадал	RSRP	RSSI
Дохионы чанар	SINR	SNR
Саатал (Latency)	RTT	RTT
Сүлжээний ачаалал	PRB usage	Channel utilization
Үйлчилгээний төрөл	eMBB / URLLC	High throughput / low-cost traffic

3. ATSSS-г хэрэгжүүлэх алгоритм

1. Дохионы босгын түвшинг шалгах

- Хэрэв Wi-Fi RSSI ≥ -65 dBm ба SNR ≥ 25 dB бол Wi-Fi сүлжээг ашиглах боломжтой
- Хэрэв 5G RSRP ≥ -95 dBm ба SINR ≥ 10 dB бол 5G сүлжээг ашиглах боломжтой

2. Үйлчилгээний ангилал шалгах

- Latency-sensitive (жишээ нь VoIP, онлайн тоглоом) дамжуулахад илүү бага RTT бүхий сүлжээг сонгоно.
- Throughput-sensitive (жишээ нь видео стрийминг, файлын таталт) дамжуулахад илүү өндөр дамжуулах хурд бүхий сүлжээг сонгоно.

3. Сүлжээний ачаалал харгалзах

- Хэрэв Wi-Fi суваг ашиглалт 70% -с их бол 5G сүлжээ рүү шилжүүлэх.
- Хэрэв 5G PRB ашиглалт 80%-с их бол Wi-Fi сүлжээ рүү шилжүүлэх.

4. Хувь ачаалал хуваарилах (Splitting)

- ATSSS Split Mode ашиглан latency-sensitive урсгалыг 5G сүлжээгээр, өндөр нэвтрүүлэх чадамж шаардах урсгалыг Wi-Fi сүлжээгээр дамжуулж болно.

5. Симуляцийн параметрууд: Босгын түвшний утгууд

Сүлжээ	Параметр	Босгын түвшин
5G gNB	RSRP	-95 dBm
	SINR	≥ 10 dB
Wi-Fi AP	RSSI	-65 dBm
	SNR	≥ 25 dB

6. Давуу тал

- QoE тогтвортой хадгална
- Сүлжээний нөөцийг илүү үр ашигтай ашиглана
- Handover/steering үед пакет алдагдал багасна

3.2. Wi-Fi Offloading (IP Flow Mobility / IFOM)

IFOM бол 3GPP болон IETF-ийн тодорхойлсон шийдэл бөгөөд хэрэглэгчийн төхөөрөмж (UE) IP урсгалыг динамикаар 5G болон Wi-Fi хооронд шилжүүлдэг. Хэрэглэгчийн төхөөрөмж нэгэн зэрэг 5G болон Wi-Fi сүлжээнд холбогдох, IP түвшинд урсгал тус бүрт замчлал тогтоох онцлогтой.

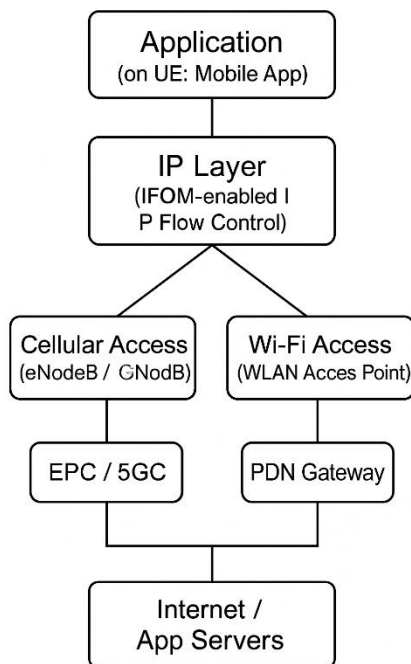
Хүснэгт 3.2 Ашиглах протоколууд

Протокол	Үүрэг
DSMIPv6 (Dual Stack Mobile IPv6)	UE хоёр сүлжээнд зэрэг холбогдох боломжийг олгоно
PMIPv6 (Proxy Mobile IPv6)	Сүлжээний талд хөдөлгөөнт байдлыг удирдана
ePDG (Evolved Packet Data Gateway)	Wi-Fi сүлжээнээс EPC/5GC руу нэвтрэх гарц
IPsec туннел	Wi-Fi холболтод аюулгүй байдал хангах

IFOM архитектурын үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгүүд:

- UE (User Equipment): IFOM-ийг дэмждэг төхөөрөмж
- PDN Gateway (PGW) эсвэл UPF: IP урсгалыг удирдах.
- ePDG: Wi-Fi сүлжээний IPsec холболтыг хүлээн авах.
- ANDSF (Access Network Discovery and Selection Function): Хэрэглэгчийн төхөөрөмжид Wi-Fi болон LTE-ийн аль сүлжээг хэрхэн ашиглах зөвлөмж өгнө.

IFOM архитектур нь 5G эсвэл LTE сүлжээнд хэрэглэгчийн төхөөрөмж (UE) нэгэн зэрэг Wi-Fi болон үүрэн (3GPP) сүлжээнд холбогдож, IP урсгалыг уян хатан байдлаар хоёр сүлжээгээр чиглүүлэх боломжийг олгодог. IFOM-ийн ерөнхий архитектурыг зураг 3.1-д харуулав .



Зураг 3.1 IFOM-ийн ерөнхий бүтэц

IFOM-ийн давуу талуудыг хүснэгт 3.2-д үзүүлэв.

Давуу тал	Тайлбар
Сүлжээний ачаалал буурна	Wi-Fi сүлжээгээр ачаалал дамжуулна
Хэрэглэгчийн туршлага сайжирна	Холболт тасралтгүй, хурд нэмэгдэнэ
Өртөг буурна	Wi-Fi ашигласнаар операторын зардал буурна
QoS-ийн удирдлага	Зарим IP урсгалыг LTE-д, заримыг Wi-Fi-д шилжүүлнэ

IFOM-ийн хэрэглээ:

- Видео урсгал: Wi-Fi-руу видео урсгалыг шилжүүлнэ.
- VoLTE / VoNR дуудлага: LTE/5G дээр хадгалж, чанарын тасралтгүй байдлыг хангана.
- IoT төхөөрөмжүүд: өгөгдлийг Wi-Fi болон үүрэн сүлжээгээр илгээнэ.

3.3 ATSSS (Access Traffic Steering, Switching, Splitting)

3GPP Release 16-аас нэвтрүүлсэн ATSSS нь 5G цөм сүлжээнд нэгдсэн олон замын замчлалын технологи бөгөөд дараах функцуудыг агуулна.

- Урсгалыг нэг сувгаар явуулах (Steering)
- Урсгалыг сүлжээн хооронд шилжүүлэх (Switching)
- Урсгалыг нэгэн зэрэг олон сувгаар хувааж илгээх (Splitting)

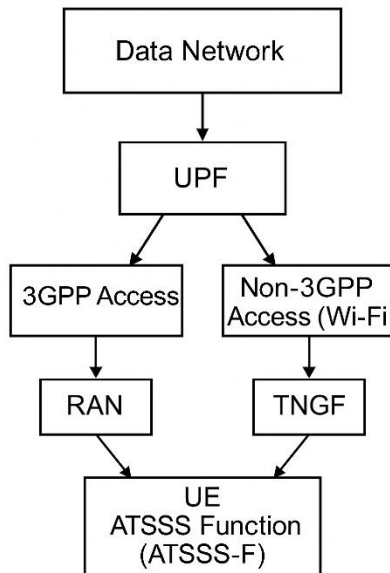
Ашиглагддаг протокол:

- Multipath TCP (MPTCP)

Дэмждэг төхөөрөмж:

- 5GC болон UEs нь MPTCP, ATSSS дэмждэг байх шаардлагатай.

ATSSS нь 5G сүлжээнд хэрэглэгчийн төхөөрөмж (UE) нэгэн зэрэг олон сүлжээний (жишээ нь 5G NR ба Wi-Fi) дамжуулах боломжийг ашиглан өгөгдлийн урсгалыг ухаалгаар удирдах, шилжүүлэх, хуваах боломжийг олгодог чухал механизм юм. Энэ нь 5G болон Wi-Fi нэгдмэл ажиллагааны түлхүүр технологи болно (Зураг 3.2).



Зураг 3.2 ATSSS ажиллагааны зарчим

Энэ зураг нь 5G сүлжээнд ATSSS функц хэрэгжүүлэх архитектурын загварыг харуулж байна. Гол бүрэлдэхүүн хэсгүүд:

- Data Network: Үйлчилгээний өгөгдлийн сүлжээ (Интернет, үүлэн үйлчилгээ гэх мэт).
- UPF (User Plane Function): Хэрэглэгчийн өгөгдлийг чиглүүлэх, туннел удирдах үндсэн функц.
- 3GPP Access: 3GPP-ийн тодорхойлсон стандарт хандалт буюу үүрэн холбооны сүлжээ (5G RAN гэх мэт).
- Non-3GPP Access (Wi-Fi): Wi-Fi зэрэг 3GPP бус хандалтын сүлжээ.
- RAN (Radio Access Network): Радио хандалтын сүлжээ (gNodeB гэх мэт).
- TNGF (Trusted Non-3GPP Gateway Function): Найдвартай 3GPP бус сүлжээг (жишээ нь Wi-Fi) 5G цөм сүлжээнд холбох гарч.
- UE ATSSS Function (ATSSS-F): Хэрэглэгчийн төхөөрөмжид байрлах ATSSS функц.

Ажиллагааны зарчмийн хувьд хэрэглэгчийн төхөөрөмжийг 5G ба Wi-Fi-ийн хооронд ухаалгаар ачаалал чиглүүлэх (steering), шилжүүлэх (switching), зэрэг хуваах (splitting)-ийг зохицуулдаг.

Энд Data Network-с ирсэн өгөгдөл эхлээд UPF-д орох ба UPF нь өгөгдлийг аль хандалтын сүлжээгээр дамжуулахыг удирдана:

- 3GPP Access → RAN → UE (ATSSS-F)
- Non-3GPP Access (Wi-Fi) → TNGF → UE (ATSSS-F)

UE дээр байрлах ATSSS-F функц нь хоёр сүлжээний өгөгдлийг хүлээн авч, хэрэглэгчийн үйлчилгээний чанар (QoS/QoE)-д тулгуурлан сүлжээний ухаалаг хослолыг хэрэгжүүлнэ.

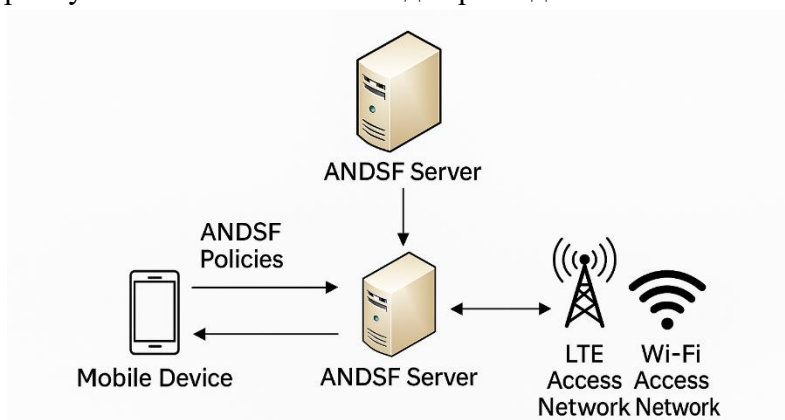
Энэ архитектур нь 5G болон Wi-Fi сүлжээнүүдийг нэгэн зэрэг эсвэл ухаалгаар сольж ашиглах боломжийг олгож, хэрэглэгчийн үйлчилгээний чанарыг сайжруулах зорилготой ATSSS-ийн үйл ажиллагааг харуулж байна.

3.4 ANDSF (Access Network Discovery and Selection Function)

3GPP стандартад тодорхойлсоноор ANDSF нь хэрэглэгчийн төхөөрөмжид ойр байгаа Wi-Fi эсвэл бусад хандалтын сүлжээг илрүүлж, ямар сүлжээнд хэрхэн холбогдох тухай заавар өгдөг. Үүнд:

- Policy илгээдэг (ө/х, өгөгдөл ихтэй үед Wi-Fi-г сонгох).
- QoS-ийг хянаж шилжүүлэлт хийх.

Хэрэглээний хувьд хотын төв хэсэгт 5G-аас Wi-Fi халуун цэг руу автоматаар ачаалал шилжүүлэлт хийнэ. ANDSF нь 3GPP Release 8-д танилцуулсан сүлжээний функц бөгөөд хэрэглэгчийн төхөөрөмжид (UE) ойр орчмын Wi-Fi болон үүрэн сүлжээнүүдийн талаар мэдээлэл өгч, аль сүлжээг сонгох, холбогдох шийдвэрийг дэмждэг. Энэ нь traffic offloading, network selection, policy-based connection хийхэд хэрэглэдэг.



Зураг 3.3 ANDSF ажиллагааны зарчим

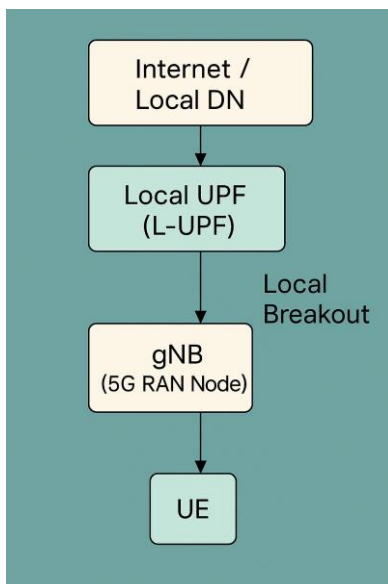
ANDSF-ийн архитектур болон үйл ажиллагааг зураг 3.3-д харуулсан ба дараах үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгүүдээс тогтоно. Үүнд:

- Mobile Device (Гар төхөөрөмж): Ухаалаг утас, таблет зэрэг хэрэглэгчийн төхөөрөмж.
- LTE Access Network: Үүрэн холбооны сүлжээ.
- Wi-Fi Access Network: Wi-Fi хандалтын сүлжээ.
- ANDSF Server: Хандалтын сүлжээ илрүүлэх ба сонгох сервер, хэрэглэгчийн төхөөрөмжид бодлого (policy) илгээдэг.

Хөдөлгөөнт төхөөрөмж нь сүлжээнд холбогдохдоо ANDSF Server-ээс ANDSF Policies буюу бодлого, зааварчилгаа авна. Энэ бодлогод аль сүлжээг (LTE эсвэл Wi-Fi) ашиглах нь илүү оновчтойг заасан байдаг. ANDSF нь Wi-Fi ба LTE-ийн аль аль сүлжээний мэдээллийг цуглуулж, сүлжээний илрүүлэлт ба сонголт-ыг зохицуулна. Үүний үр дүнд төхөөрөмж динамик байдлаар хамгийн тохиромжтой сүлжээг сонгож, хэрэглэгчийн туршлагыг (QoE) сайжруулдаг. ANDSF нь гар утасны төхөөрөмжийг Wi-Fi болон LTE сүлжээнүүдийн хооронд ухаалгаар шилжүүлэх, сүлжээний сонголтыг бодлогоор удирдах боломжийг олгосон 3GPP стандартын функц юм.

3.5 Local Breakout (LBO)

LBO нь операторын цөм сүлжээг дамжихгүйгээр Wi-Fi эсвэл орон нутгийн сүлжээнд шууд холболт хийх арга юм. Үүний үр дүнд хоцролт багасах болон цөм сүлжээний ачаалал буурна.



Зураг 3.4 LBO ажиллагааны зарчим

5G сүлжээнд LBO ашиглаж буй архитектурын энгийн загварыг Зураг 3.4-д харуулав. Дараах үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгүүдээс тогтоно. Үүнд:

- Internet / Local DN (Data Network): Интернет эсвэл орон нутгийн өгөгдлийн сүлжээ (аж ахуйн нэгжийн дотоод сүлжээ, орон нутгийн дата төв г.м.).
- Local UPF (L-UPF): Хэрэглэгчийн өгөгдлийг боловсруулах User Plane Function-ийн орон нутгийн хувилбар. Энэ нь хэрэглэгчийн өгөгдлийг төв сүлжээгээр дамжуулахгүйгээр шууд орон нутагт чиглүүлнэ.
- gNB (5G RAN Node): 5G радио хандалтын зангилаа буюу бааз станц, хэрэглэгчийн төхөөрөмжтэй холбогдоно.
- UE (User Equipment): Хэрэглэгчийн төхөөрөмж (гар утас, IoT төхөөрөмж гэх мэт).

Local Breakout (LBO) нь UE-ээс гарах дата урсгал эхлээд gNB рүү дамжих ба gNB нь өгөгдлийг Local UPF (L-UPF) рүү илгээж, тухайн UPF нь дата урсгалыг орон нутгийн сүлжээ (Local DN) эсвэл Интернет рүү шууд чиглүүлнэ. Ингэснээр хэрэглэгчийн өгөгдөл заавал төвийн үндсэн сүлжээгээр дамжих шаардлагагүй болж, саатал багасч, үр ашиг нэмэгдэнэ. Энэ архитектур нь Local Breakout ашиглан хэрэглэгчийн өгөгдлийг ойролцоох орон нутгийн UPF-ээр дамжуулан шууд орон нутгийн сүлжээ эсвэл интернетэд холбож өгснөөр хурд, саатлын үзүүлэлтийг сайжруулах зорилготой.

Хүснэгт 3.4 Үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгүүдийн тайлбар

Бүрэлдхүүн хэсгүүд	Тайлбар
UE	Хэрэглэгчийн төхөөрөмж (гар утас, IoT төхөөрөмж гэх мэт)
gNB	5G-ийн радио хандалтын бааз станц
L-UPF (Local User Plane Function)	Орон нутгийн түвшинд байрласан UPF бөгөөд өгөгдлийг шууд интернет рүү чиглүүлдэг
Local DN (Data Network)	Бүсийн доторх интернет эсвэл байгууллагын сүлжээ
Internet	Гаднах өгөгдлийн сүлжээ

LBO-ийн давуу талууд:

- Хоцролт бууруулах (бүх урсгал цөм сүлжээгээр дамжих шаардлагагүй)
- Цөм сүлжээний ачаалал бууруулах
- Захын тооцоололтой уялдуулах (орчны камер, дрон, AR/VR системүүдэд тохиромжтой)
- IoT болон шаарлага өндөртэй хэрэглээ (жишээ нь: ухаалаг үйлдвэр, эрүүл мэндийн систем)

Техникийн хувьд 5G Core (5GC) сүлжээнд PDU Session хэрэгжүүлэх үед SMF нь L-UPF сонгож, өгөгдлийг локал сүлжээ рүү гаргаж өгдөг. ULCL (Uplink Classifier) нь UPF дээр хэрэглэгчийн өгөгдлийг аль замаар (local эсвэл central) гаргахыг тодорхойлдог.

LBO хэрэглээний жишээ:

Хэрэглээний төрөл Тайлбар

- Видео стриминг Сүлжээний төв рүү явуулах шаардлагагүй, хоцролт буурна
- Smart factory IoT төхөөрөмжүүдийн өгөгдлийг локал сервер рүү илгээх
- Edge AI Edge төхөөрөмжүүдийн өгөгдлийг ылокал UPF-ээр боловсруулах

3.6 QoE-based Intelligent Offloading (AI/ML ашиглах)

AI загварууд ашиглан хэрэглэгчийн QoE (Quality of Experience)-г таамаглан урсгалыг Wi-Fi эсвэл 5G руу автоматаар шилжүүлдэг. Үүний тулд Reinforcement Learning болон Bayesian Networks зэрэг аргаар байршил, аппликашн хэрэглээ, зурвасын өргөн, дохио шуугианы харьцаа SNR, хоцролт зэргийг харгалзаж ачааллыг шилжүүлнэ.

Offloading нь хэрэглэгчийн туршлагыг (Quality of Experience, QoE) сайжруулах зорилгоор сүлжээний өгөгдлийн урсгалыг ухаалгаар “offload” хийх буюу Wi-Fi рүү ачаалал шилжүүлэх стратеги юм. Энэ аргачлал нь зөвхөн сүлжээний параметр (QoS) бус, хэрэглэгчийн бодит туршлагыг үнэлж, хамгийн оновчтой сүлжээг сонгодгоороо онцлогтой.

QoE (Quality of Experience) нь хэрэглэгчийн бодит мэдрэмж, сэтгэл ханамжийг хэмжих ойлголт юм. Үүнд:

- Видео нээгдэх хурд, тасралтгүй байдал
- Вэб хуудсанд хандах хугацаа

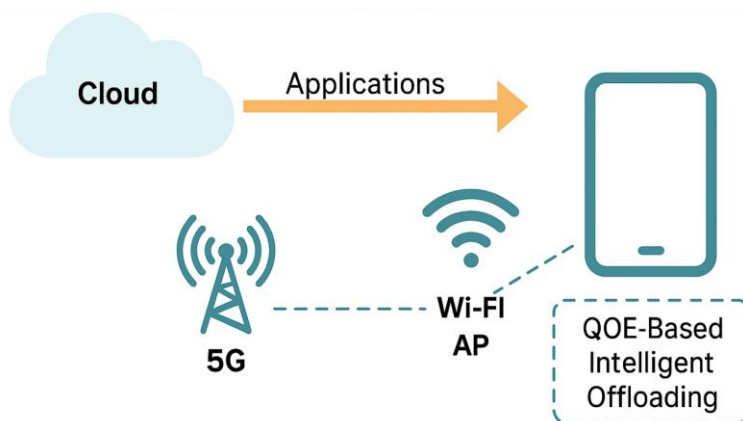
- Аппликейшний хариу өгөх чадвар
- Дуудлагын чанар (VoIP) зэрэг орно.

2. Ачааллыг ухаалгаар шилжүүлэх (Intelligent Offloading)

Wi-Fi эсвэл бусад сүлжээнд ухаалгаар шилжүүлэх замаар цөм сүлжээний ачааллыг бууруулах, хоцролтыг багасгах, QoE сайжруулахад зориулагдана. Ачаалал шилжүүлэх шийдвэр нь AI/ML, бодлого (policy), бодит хугацаанд үндэслэн хийдэг.

Хүснэгт 3.5 QoE-д суурилсан ачаалал шилжүүлэх шийдвэр гаргах хүчин зүйлс

Ангилал	Хувьсагч
Сүлжээний нөхцөл	RSRP, SINR, хоцролт, jitter, зурвасын өргөн
Хэрэглэгчийн хэрэглээ	Видео стриминг, VoIP, вэб үзэх
Төхөөрөмжийн мэдээлэл	Battery, CPU, network capability
Байршил ба хөдөлгөөн	GPS, cell ID, Wi-Fi SSID
Машин сургалт (ML)	QoE таамаглах загвар (supervised learning, reinforcement learning)



Зураг 3.5 QoE-based Intelligent Offloading

QoE-д суурилсан ухаалаг ачаалал шилжүүлэлтийн зарчмыг зураг 3.5-д харуулав. Энэ нь дараах үндсэн элементедээс тогтох ба дараах үүрэгтэй байна. Үүнд:

- Cloud (Үүлэн орчин): Аппликейшн болон үйлчилгээний эх үүсвэр.
- Applications: Үйлчилгээ, аппликейшнүүд хэрэглэгчийн төхөөрөмж рүү дамжина.
- 5G сүлжээ: Үүрэн холбооны өндөр хурдны дата сувгаар холбогдоно.

- Wi-Fi AP (Access Point): Wi-Fi хандалтын цэг, хэрэглэгчийн төхөөрөмжийг интернетэд холбох өөр сонголт.
- UE (User Equipment): Хэрэглэгчийн төхөөрөмж (гар утас, таблет, IoT гэх мэт).
- QoE-Based Intelligent Offloading: Хэрэглэгчийн үйлчилгээний чанарыг (QoE) хэмжиж, аль сүлжээ (5G эсвэл Wi-Fi)-ээр дамжуулах нь илүү оновчтойг ухаалгаар шийдэх алгоритм/систем.

Аппликейшнүүд Cloud-аас хэрэглэгчийн төхөөрөмж рүү өгөгдөл илгээнэ. Төхөөрөмж нь 5G сүлжээ болон Wi-Fi AP-ийн аль алинд холбогдох боломжтой. QoE-д суурилсан ухаалаг offloading систем нь бодит хэрэглэгчийн туршлагын чанарыг (саатал, хурд, тогтвортой байдал гэх мэт) хэмжиж, тухайн агшинд хамгийн сайн чанарыг хангах сүлжээг автоматаар сонгож өгдөг. Энэ архитектур нь хэрэглэгчийн төхөөрөмж дээр 5G ба Wi-Fi-ийн хооронд ачааллыг ухаалгаар шилжүүлэх замаар хамгийн хэрэглэгчийн туршлагыг сайжруулах зарчмыг харуулж байна.

Хүснэгт 3.6 Ачаалал шилжүүлэх аргуудын харьцуулалт

Арга	Түвшин	Протокол/ Стандарт	Давуу тал	Сул тал
IFOM	IP	DSMPv6, PMIPv6	Нарийн control	Тохиргоо төвөгтэй
ATSSS	Transport	MPTCP	Real-time switching/splitting	UE/5GC бүрэн дэмжих шаардлагатай
ANDSF	Policy	3GPP	Dynamic network discovery	5GC шаардана
LBO	Edge	Local routing	Latency бууруулах	Core coordination багатай
AI-based	Application	Custom/ML	Smart decision-making	Өгөгдөл ба сургалт шаардана

3.7 5G/Wi-Fi ачааллыг шилжүүлэх туршилт

5G/Wi-Fi холимог сүлжээнд ачаалал шилжүүлэх симуляцийн кодыг MATLAB програм дээр Хавсралтад үзүүлэв. Үүнд:

- Хэрэглэгчийн урсгалыг 5G болон Wi-Fi хоёр сүлжээний хооронд хоцролт ба зурвасын өргөн дээр үндэслэн автоматаар хуваарилах логикийг харуулав.
- Энгийн QoS-aware offloading decision algorithm хэрэгжүүлнэ.
- Өгөгдсөн зурвасын өргөн болон хоцролтын утганд шаардлагын дагуу хэрэглэгчийн урсгалыг Wi-Fi эсвэл 5G руу хуваарилна.
- Нөөц хүрэлцэхгүй үед “Blocked” үүсэх ба энэ нь операторт “load balancing хийж slice” нэмэх хэрэгтэйг илтгэнэ.

Цаашид хөгжүүлэх боломжууд:

- Reinforcement Learning ашиглан суралцдаг offloading систем
- Real-time metrics (RSRP, SINR) дээр үндэслэн dynamic routing хийх
- ATSSS & Multipath TCP simulation (NS-3 / OMNeT++-д суурилсан)

Хүснэгт 3.7 Хэрэглээ бүрийн дундаж мэдээллийн хэмжээ ба зурвасын өргөн

Application	Дундаж дата хэмжээ	Зурвасын өргөн (Bandwidth)	QoE шаардлага
Видео	~30 MB / мин	2–4 Mbps	Medium–High
Веб	~5 MB / session	0.5–1 Mbps	Medium
VoIP	~1 MB / мин	100–150 kbps	Low Latency
Файл	~50–100 MB	5–10 Mbps	Delay-tolerant

Симуляц хийхэд дундаж утгуудыг ашигласан.

Хүснэгт 3.8 Симуляцийн үр дүн

User	Application	Offloaded To	Data Volume (MB)	Required Bandwidth (Mbps)
1	Видео	Wi-Fi	30	3
2	Веб	Wi-Fi	5	0.5
3	VoIP	5G	1	0.15
4	Файл	5G	80	8
5	Видео	Wi-Fi	30	3
6	Веб	Wi-Fi	5	0.5
7	VoIP	5G	1	0.15
8	Файл	Blocked	100	10
9	Видео	Blocked	30	3
10	Веб	Wi-Fi	5	0.5

Симуляцийн үр дүнгээс харахад Хүснэгт 3.8-д үзүүлсэн 10 төрлийн хэрэглээнээс видео ба веб нь Wi-Fi-аар дамжигдсан бөгөөд VoIP болон файл дамжуулал нь 5G үүрэн сүлжээгээд дамжиж, үүний 50% нь саатсан байна.

Хүснэгт 3.9 Хураангуй тооцоо

Offload төрөл	Нийт өгөгдлийн хэмжээ (MB)	Нийт зурвасын өргөн (Mbps)
Wi-Fi	75 MB	7 Mbps
5G	82 MB	8.3 Mbps
Blocked	130 MB	13 Mbps

3.8 5G/WiFi ачаалал шилжүүлэхэд нөлөөлөх хүчин зүйлийн судалгаа

5G сүлжээний үүрийн захад (cell edge) Wi-Fi ачаалал шилжүүлэлт нь үр ашигтай, хэрэгжих боломжтой шийдэл юм, ялангуяа дараах зорилгоор:

Хүснэгт 3.10 5G/Wi-Fi ачаалал шилжүүлэлтийг ашиглан үүрийн захын бүрхэлтийг өргөтгөх

5G Үүрин захад	Wi-Fi шийдэл
Дохио сулрах, дохио шуугианы харьцаа SNR муудсан үед	Wi-Fi AP хандалтын цэгийг ойр байрлуулснаар чанартай холболт өгнө
Хэт их ачаалал (congestion)	Wi-Fi руу offload хийснээр 5G eNodeB/gNodeB дээрх ачаалал буурна
Хоцролт ихсэх тохиодолд	Wi-Fi орон нутгийн сүлжээнд холбогдох тул хоцролт буурах магадлалтай.
Dead zone (Хаалттай бүс)	Барилга байгууламжийн доторхи, ханаар хаагдсан бүсэд Wi-Fi AP суурилуулах замаар бүрхэлтийг сайжруулна.
Сүлжээ өргөтгөх зардал	Жижиг үүр эсвэл дахин дамжуудагчийг шинээр суурилуулахын оронд Wi-Fi ашиглавал зардал бага байна.

Wi-Fi offloading ашиглан үүрийн захын (cell edge) бүрхэлтийг өргөтгөх аргыг хэрэгжүүлэх

1. Wi-Fi AP байршуулалт

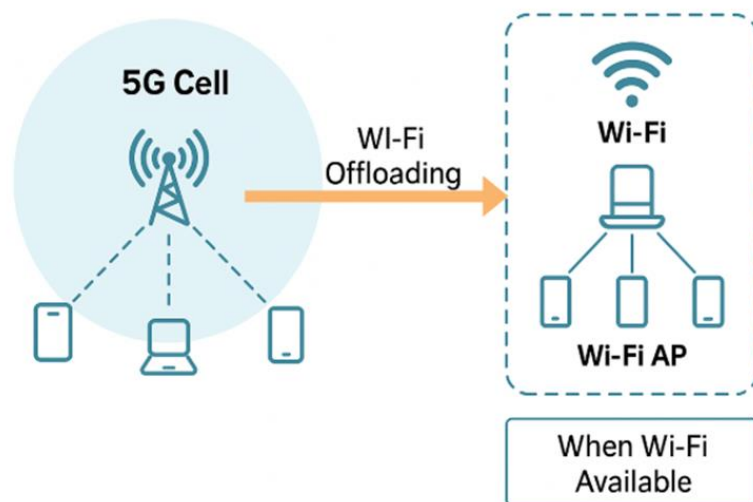
- Үүрийн захад хэрэглэгчийн хөдөлгөөн ихтэй газар (оффисын гадна, нэвтрэх цэг, коридор, гадаах хэсэг) Wi-Fi AP-ууд суурилуулна.
- Wi-Fi 6E/7 стандарт ашиглавал илүү өндөр хурд, бага хоцролтыг хангана.

2. ATSSS буюу Traffic Steering

- 5G цөм сүлжээ ашиглан хэрэглэгчийн ачааллыг динамикаар Wi-Fi руу шилжүүлнэ.
- IP Flow Mobility (IFOM) болон хандалтыг сонгох алгоритмууд хэрэгжиж болно.

3. Enterprise integration

Сургууль, үйлдвэр, кампус зэрэг байгууллагууд үүрийн захын бүсэд Wi-Fi-тай давхцуулсан бүрхэлт үүсгэж болно.



Зураг 3.6 5G үүрийн захад WiFi ачаалал шилжүүлэлт хийх

3.9 Улаанбаатар хотын ачаалал ихтэй хэсэгт ачаалал шилжүүлэх тооцоо

Улаанбаатар хотын ачаалал ихтэй хэсэгт (жишээ нь Сүхбаатарын талбай, Их дэлгүүр, УБ их сургууль орчим) 5G/Wi-Fi HetNet орчинд ачаалал шилжүүлэх (traffic offloading/steering) жишээ, тооцоолол.

1. Нөхцөл байдал

- Байршил: Сүхбаатарын талбай орчим
- Цаг: 18:00–20:00 (оройны оргил ачаалал)
- Сүлжээ:
 - 5G gNB: 3 сектор, NR n78 (3.5 GHz), нийт 100 MHz зурвас
 - Wi-Fi AP: Хотын нийтийн Wi-Fi (5 GHz, 80 MHz)
- Хэрэглэгч: ~150 идэвхтэй UE / сектор (eMBB + VoIP хэрэглээ холимог)

2. Ачааллын нөхцөл

Хүснэгт 3.11 5G болон Wi-Fi-ын үзүүлэлт

Сүлжээ	Ачаалал (PRB/Channel Utilization)	Дундаж дохионы түвшин	Саатал (RTT)
5G	PRB ашиглалт 90%+	RSRP ~ -92 dBm, SINR ~ 8 dB	35–50 ms
Wi-Fi	Channel util 40%	RSSI ~ -60 dBm, SNR ~ 28 dB	20–25 ms

5G дээр өндөр PRB ашиглалт → throughput унаж, latency өснө. Wi-Fi нь илүү сул ачаалалтай, чанар сайн.

3. Босгын түвшинд суурилсан ачаалал шилжүүлэх

1. 5G -с Wi-Fi сүлжээнд ачаалал шилжүүлэх нөхцөл:
 - 5G PRB $\geq 80\%$
 - Wi-Fi RSSI ≥ -65 dBm ба SNR ≥ 25 dB
 - Wi-Fi суваг ашиглалт $\leq 70\%$

2. Wi-Fi -с 5G сүлжээнд ачаалал шилжүүлэх нөхцөл:

- Wi-Fi суваг ашиглалт $\geq 80\%$
- Wi-Fi RSSI ≤ -70 dBm эсвэл SNR ≤ 20 dB
- 5G RSRP ≥ -95 dBm ба SINR ≥ 10 dB

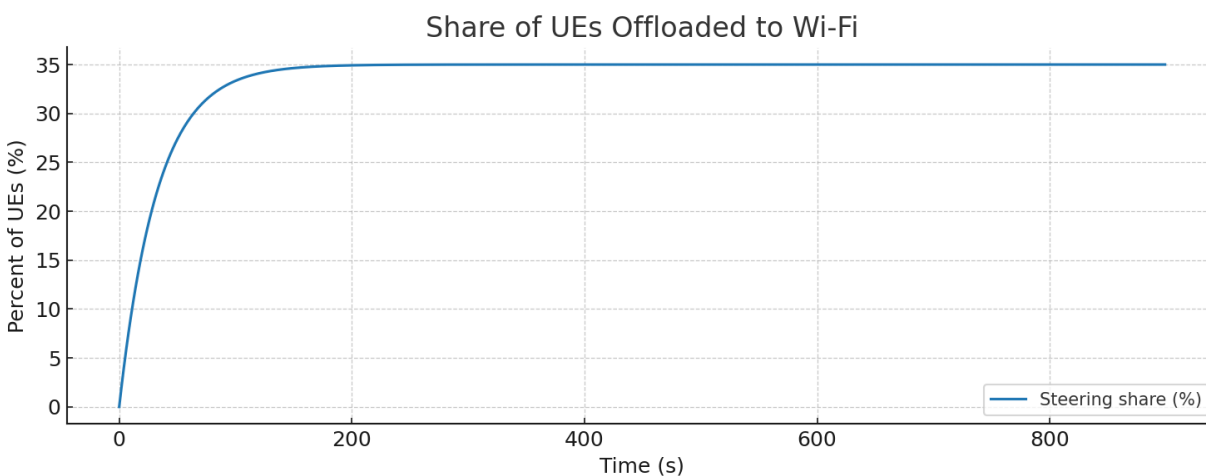
4. Жишээ ачаалал шилжүүлэлт

- Эхлээд 150 UE бүгд 5G сүлжээнд байхад нэвтрүүлэх чадамж ойролцоогоор 3–5 Mbps/UE (eMBB хэрэглээнд бага).
- Алгоритм ажиллуулсны дараа:
 - 5G PRB $\geq 80\%$ болсон үед RSSI/SNR өндөртэй хэрэглэгчдийн 30–40%-ийг Wi-Fi руу steer хийнэ.
 - Steering $\rightarrow$ Wi-Fi дээр нэвтрүүлэх чадамж ойролцоогоор 8–12 Mbps/UE үед саатал 20–25 мсек байна.
 - 5G дээр нэвтрүүлэх чадамж өсөж ойролцоогоор 6–9 Mbps/UE, хоцролт 25–30 мсек болж сайжирна.

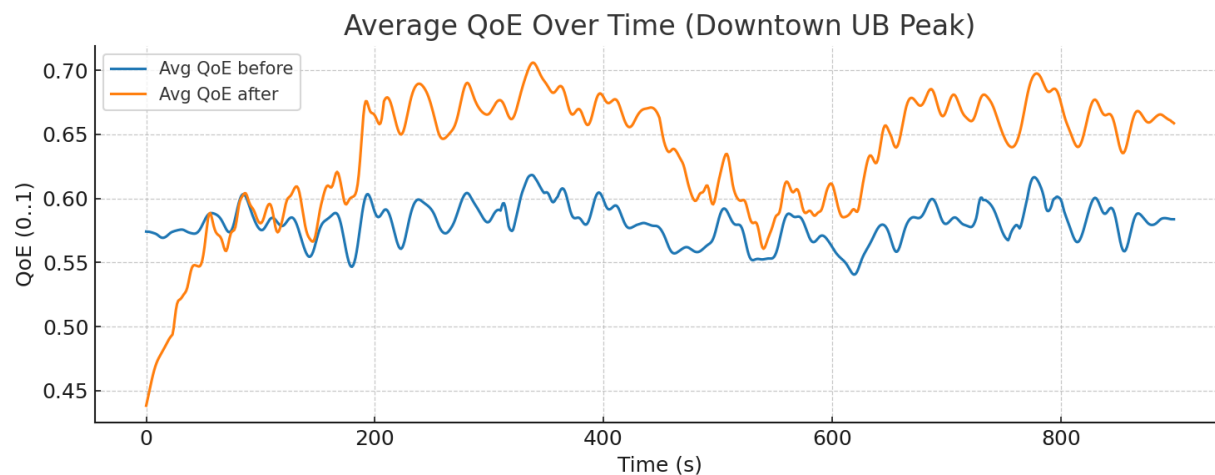
5. Хүлээгдэж буй үр дүн

- 5G секторын ачаалал: $\sim 90\% \rightarrow \sim 65\%$ буурна
- Wi-Fi channel utilization: $\sim 40\% \rightarrow \sim 65\%$ нэмэгдэнэ
- Дундаж QoE (0–1): $\sim 0.42 \rightarrow \sim 0.71$ болж өснө
- VoIP чанар (MOS): 3.2 $\rightarrow$ 4.1 (сонсголын туршилтаар)

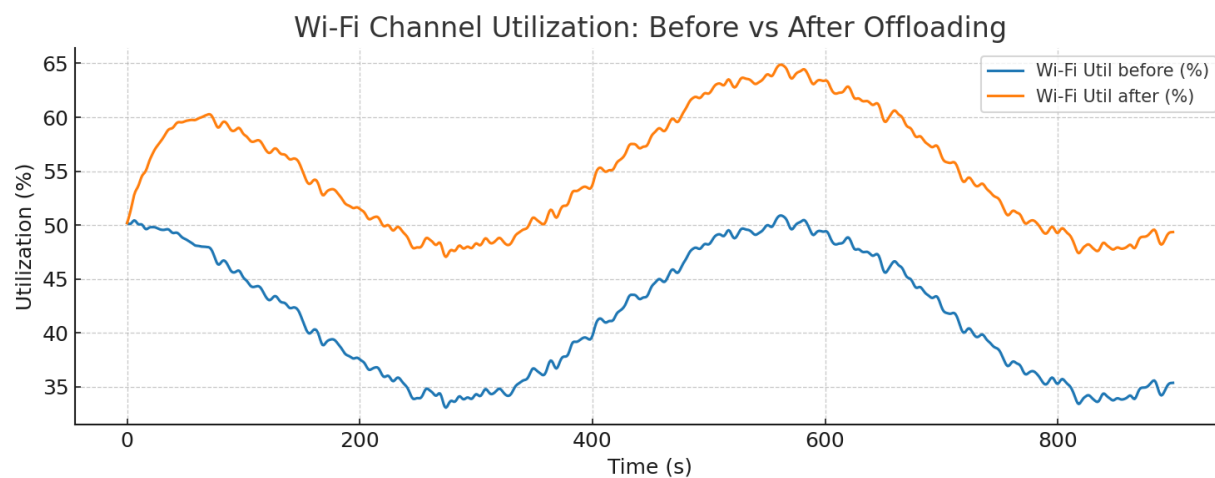
Симуляцийн үр дүнг зураг 3.7-3.10 -дээр, туршилтын үр дүнгийн кодыг хавсралт дээр харуулав.



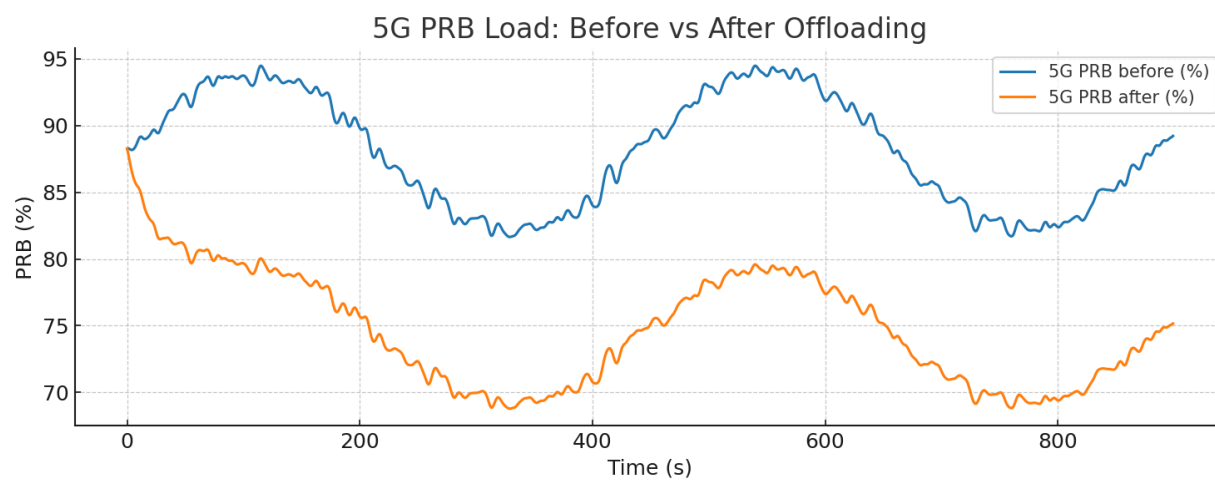
Зураг 3.7 Wi-Fi руу ачаалал шилжүүлсэн хэрэглэгчдийн хувь



Зураг 3.8 Дундаж QoE (УБ-н оргил ачаалалтай үед)



Зураг 3.9 Wi-Fi суваг ашиглалтын хувь ачаалал шилжүүлэхийн өмнө/дараа



Зураг 3.10 5G PRB-ийн ачаалал шилжүүлэхийн өмнө болон дараа

Үр дүн: Сүхбаатарын талбайн орчиммд, оргил ачаалалтай цагт

- 5G PRB ашиглалтын дундаж хэмжээ: 88.0% → 74.7% (-13.3 хувиар)
- Wi-Fi суваг ашиглалт дундаж: 41.5% → 55.0% (+13.5 хувиар)
- Дундаж ачаалал шилжүүлэлтийн хувь: ~33.7% UE Wi-Fi руу шилжсэн
- Дундаж QoE: 0.581 → 0.634 (ойролцоогоор +9.2% сайжирсан)

Үр дүн:

- Trigger: 5G PRB $\geq 80\%$ үед, Wi-Fi RSSI ≥ -65 dBm, SNR ≥ 25 dB, util $\leq 70\%$ үед ачаалал шилжүүлэлт хийдэг.
- Steering хувь алхам алхмаар өсч (~0→35%) ачааллыг тэнцвэржүүлснээр 5G-ийн RTT буурч, Wi-Fi дээр судаг ашиглалт өсөх ч QoE-ийн уналтыг penalty-аар барьж өгнө.
- QoE өсөлт нь хоцролт ба нэвтрүүлэх ачдамжийн жинлэсэн утга (LS=40%, TS=60%) дээр суурилсан.

3.10 Практикт хэрэгжүүлэх асуудлын жишээ:

Хэрэглээ	Шийдэл
Хотын захын шинэ хороолол	5G жижиг үүрийн gNB суурилуулах өртөг өндөр. Иймд gNB-ын оронд Wi-Fi+шилэн кабель суурилуулж offload хийх
Барилгын цонхгүй давхарт	5G бүрхэлт хүрэлцэхгүй тохиолдолд Wi-Fi торон сүлжээ суурилуулж бүрхэлтийг шийдэх
Их дэлгүүр, цэнгэлдэх хүрээлэн	Нэг үүрт олон хэрэглэгч төвлөрсөн үед Wi-Fi халуун цэг offload хийж ачааллыг хуваарилах боломжтой.

Анхаарвал зохих асуудлууд:

- Үйлчилгээний чанар (QoS): Wi-Fi үйлчилгээний чанар нь “5G slice” -ын нэгэн адил баталгаатай зурвасын өргөнийг нарийвчлалтай тодорхойлох боломжгүй байж болох юм.
- Нууцлалын хувьд: Wi-Fi сүлжээ нь WPA3 зэрэг аюулгүй байдлыг хангах шийдэлтэй байх ёстой.
- Хязгааргүй олон гардвар: Wi-Fi болон 5G хооронд хязгааргүй олон тооны холболт хийхэд ATSSS болон олон хандалтын хяналт “multi-access control” шаардлагатай.

Хүснэгт 3.12 Эдийн засаг, үр ашигийн загвар

Үзүүлэлт	Хэмжих нэгж	Уламжлалт LTE/5G	Offload ашигласан тохиолдол	Зөрүү
Дата урсгал	TB/cap	100	70	30 ↓
Цөм сүлжээний зардал	\$	1,000	700	300 ↓
Wi-Fi offload зардал	\$	0	120	120 ↑
Нийт зардал	\$	1,000	820	180 ↓

2024 оны эхний хагасын байдлаар үүрэн холбооны идэвхитэй хэрэглэгчийн нийт тоо 4.909.198 (Дөрвөн сая есөн зуун есөн мянга нэг дуун ерэн найм) байх үед нийт ачаалал (сая минут), сүлжээний доторх яриа 34,37 (сая минут), гарах ачаалал 16,96 (сая минут) орох ачаалал 14,84 (сая минут) гэж үзвэл дараах үр дүн гарна.

Хүснэгт 3.13 Үүрэн холбооны ачааллын тооцоо

Төрөл	Ачаалал (сая минут)	Ачаалал (минут)	Хэрэглэгч тутмын дундаж ачаалал (минут)
Сүлжээ доторх яриа	34.37	34370000.0	7.001143567645876
Гарах ачаалал	16.96	16960000.0	3.4547394503134727
Орох ачаалал	14.84	14840000.0	3.0228970190242888
Нийт ачаалал	66.17	66170000.0	13.478780036983638

Хүснэгт 3.11-д үндэслэн хэрэглэгч бүрийн дундаж ярианы ачааллыг тооцоолбол, нийт 4.9 сая хэрэглэгч тутамд сарын дунджаар 13.48 минут ярианы хэрэглээ үүсч байгаа нь харагдаж байна.

Хүснэгт 3.14 5G/WiFi ачаалал шилжүүлэх ашиглалтын эдийн засгийн судалгаа

Зардлын төрөл	Нийт зардал (\$)	Тайлбар
Цөм сүлжээний (бүх ачаалал)	63600.0	Ачаалал шилжүүлэх технологийг ашиглаагүй нөхцөлд нийт зардал
5G/WiFi Ачаалал шилжүүлэх технологийг ашигласан	49290.0	30% WiFi offload ашигласан үед
Хэмнэлт	14310.0	WiFi Offload-ийн үр дүнд үүссэн хэмнэлт

Тооцооны дараах үр дүн нь 5G/WiFi шилжүүлэх ачаалалын хэмжээ (хувь) нэмэгдэхэд хэрхэн зардал буурч байгааг харуулж байна:

- Ачаалал 10% шилжүүлэхэд: 4770\$ хэмнэлт
- Ачаалал 50% шилжүүлэхэд: 23850\$ хэмнэлт

5G/WiFi шилжүүлэх ачааллын хувь өсөх тусам цөм сүлжээгээр дамжих ачаалал буурч, Wi-Fi ачаалал өсөж, нийт зардлын хэмжээ багасаж байна.

30% Wi-Fi offloading ашигласнаар жилийн хэмжээнд ойролцоогоор \$171,720 ам.долларын зардлын хэмнэлт гарах боломжтой байна.

Зардлын төрөл	Нийт зардал (\$)
0 Core network (бүх ачаалал)	63600.0 Offload ашиглаагүй нөхцөлд нийт зардал
1 WiFi Offload ашигласан	49290.0 30% WiFi offload ашигласан үед
2 Хэмнэлт	14310.0 WiFi Offload-ийн үр дүнд үүссэн хэмнэлт
30% Wi-Fi offloading ашигласан тохиолдолд:	

- Цөм сүлжээний нийт зардал: \$63,600 → \$49,290 болж буурсан
- Нийт хэмнэлт: \$14,310

Энэ нь “edge-based offload”-аас ч илүү 3,000 ам.доллараар их хэмнэлт гарч байгаа нь харагдаж байна.

3.11 5G WI-FI практик хэрэглээний платформууд

1. Ericsson Wi-Fi Offload Solution

- 5G Core болон EPC-тэй (4G/5G) шууд нэгтгэгддэг.
- ANDSF (Access Network Discovery and Selection Function) болон Hotspot 2.0 ашиглан Wi-Fi рүү ухаалаг шилжилт хийдэг.
- QoS (Quality of Service) болон хэрэглэгчийн туршлага (QoE)-д тулгуурласан удирдлагатай.

2. Huawei i-WiFi Offloading

- Huawei-ийн CloudCore платформтой уялддаг.
- Seamless handover (алдаагүй шилжилт) болон Policy control дэмждэг.
- Үүрэн оператор Wi-Fi-г “carrier-grade” болгон удирдах боломжтой.

3. Cisco Wi-Fi Offload / Hotspot 2.0

- Cisco Evolved Packet Core (EPC) болон 5G Core-той нийцдэг.
- Passpoint (Hotspot 2.0) стандартыг ашиглан хэрэглэгчийг Wi-Fi руу автоматаар холбодог.
- Carrier-grade Wi-Fi менежмент, authentication (EAP-SIM, EAP-AKA) боломжтой.

4. Nokia Smart Wi-Fi Offload

- Nokia Cloud Packet Core болон NetAct системтэй уялддаг.
- Үүрэн сүлжээний траффик Wi-Fi руу хуваарилж, сүлжээний хөрөнгө оруулалтыг бууруулдаг.
- QoE-based offloading хэрэгжүүлдэг.

Гол онцлогууд

- Seamless connectivity – хэрэглэгч Wi-Fi руу орсон ч дуудлага, дата тасалдахгүй.
- Policy & Charging Rules Function (PCRF/PCF) – траффик Wi-Fi руу хуваарилах дүрэм удирддаг.
- Carrier-grade Wi-Fi – гэрийн Wi-Fi биш, харин операторын удирдлагатай, аюулгүй байдлын шийдэл.

- Integration with 5G Core – ATSSS болон IFOM-той уялдуулж, 5G стандартын дагуу ажиллана.

Монгол улсын хувьд нөхцөлд хэрэгжүүлэх боломжийг авч үзвэл:

- Томоохон операторууд (Unitel, Mobicom, Skytel, G-Mobile) Cisco эсвэл Huawei-ийн Hotspot 2.0 / Wi-Fi Offload шийдлийг ашиглаж болно.
- Улаанбаатар хотын нийтийн Wi-Fi (нисэх буудал, худалдааны төв, кампус) дээр Wi-Fi Offloading хэрэглэх нь үүрэн сүлжээний ачааллыг бууруулна.
- Оюутны хотхон, томоохон уул уурхайн талбай дээр Nokia эсвэл Ericsson Smart Wi-Fi нэвтрүүлэх боломжтой.

Create a conceptual diagram (PNG) for Huawei i-WiFi Offloading (EPC & 5GC interworking)

```
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.patches import FancyBboxPatch, ArrowStyle
import matplotlib.lines as mlines

fig, ax = plt.subplots(figsize=(16, 10))

def box(x, y, w, h, text, fc='white', ec='black', lw=1.5):
    r = FancyBboxPatch((x, y), w, h, boxstyle="round,pad=0.02,rounding_size=0.02",
                        linewidth=lw, edgecolor=ec, facecolor=fc)
    ax.add_patch(r)
    ax.text(x + w/2, y + h/2, text, ha='center', va='center', fontsize=10, wrap=True)
    return r

def arrow(x1, y1, x2, y2, text=None):
    ax.annotate("", xy=(x2, y2), xytext=(x1, y1),
                arrowprops=dict(arrowstyle=ArrowStyle("Simple", head_length=8, head_width=8,
                tail_width=1.2),
                lw=1.2))
    if text:
        ax.text((x1+x2)/2, (y1+y2)/2 + 0.02, text, ha='center', va='bottom', fontsize=9)

# Layout coordinates (0..1 normalized)
# Left cluster: EPC (4G) path
# Right cluster: 5GC (5G) path
# Common top: UE -> Wi-Fi AP/AC

# Common
```

```

ue = box(0.08, 0.82, 0.18, 0.09, "UE (Гар утас)\n5G/4G смартфон")
ap = box(0.32, 0.82, 0.22, 0.09, "Wi-Fi AP/AC\n(Hotspot 2.0 / Passpoint)")

arrow(0.08+0.18, 0.865, 0.32, 0.865, "802.11 + EAP-SIM/AKA / EAP-TLS")

# EPC cluster
box(0.02, 0.62, 0.46, 0.17, "EPC (4G) Offload зам", fc='#f8faff', ec='#c5d0ff')

epdg = box(0.06, 0.64, 0.16, 0.09, "ePDG\n(Untrusted WLAN gateway)")
aaa = box(0.25, 0.64, 0.17, 0.09, "AAA / SingleSDB\n(Гэрчилгээжүүлэлт)")
hss = box(0.47, 0.64, 0.16, 0.09, "HSS (Захиалагч өгөгдөл)")

pgw = box(0.14, 0.50, 0.18, 0.09, "P-GW\n(PDN Gateway)")
pcrf = box(0.36, 0.50, 0.18, 0.09, "PCRF\n(Policy/Charging)")

ims = box(0.08, 0.36, 0.22, 0.09, "IMS (VoWiFi/VoLTE)")
internet = box(0.36, 0.36, 0.18, 0.09, "Интернэт / Services")

# Links EPC
arrow(0.32+0.22, 0.865, 0.06, 0.685, "SWu (IPsec/IKEv2)")
arrow(0.06+0.16, 0.685, 0.25, 0.685, "SWm (Diameter)")
arrow(0.25+0.17, 0.685, 0.47, 0.685, "Cx/DIAMETER")

arrow(0.06+0.08, 0.64, 0.14+0.09, 0.50+0.09, "S2b (GTP/PMIP)")
arrow(0.14+0.18, 0.545, 0.36, 0.545, "Gx (PCC)")

arrow(0.14+0.09, 0.50, 0.08+0.11, 0.36+0.09, "")
arrow(0.14+0.18, 0.50+0.045, 0.36, 0.36+0.045, "SGi/N6")

# 5GC cluster
box(0.54, 0.62, 0.44, 0.17, "5GC (5G) Offload зам", fc='#f7fff8', ec='#c9e7c9')

n3iwf = box(0.56, 0.64, 0.18, 0.09, "N3IWF\n(Untrusted WLAN interworking)")
amf = box(0.78, 0.68, 0.16, 0.08, "AMF\n(Control)")
smf = box(0.78, 0.58, 0.16, 0.08, "SMF\n(Session Mgmt)")

upf = box(0.70, 0.50, 0.18, 0.09, "UPF\n(User Plane)")
pcf = box(0.92, 0.62, 0.10, 0.09, "PCF\n(Policy)")
ausf = box(0.92, 0.50, 0.10, 0.09, "AUSF/UDM\n(Auth+Subs)")

```

```

ims5g = box(0.62, 0.36, 0.22, 0.09, "IMS (VoNR/VoWiFi)")
internet5g = box(0.88, 0.36, 0.10, 0.09, "Интернэт")

# Links 5GC
arrow(0.32+0.22, 0.865, 0.56, 0.685, "NWu (IPsec/IKEv2)")
arrow(0.56+0.18, 0.685, 0.78, 0.68+0.04, "N2/N1")
arrow(0.56+0.12, 0.64, 0.70+0.09, 0.50+0.09, "N3")

arrow(0.78+0.08, 0.58+0.04, 0.70+0.18, 0.50+0.045, "N4")
arrow(0.78+0.16, 0.68+0.04, 0.92, 0.62+0.045, "")
arrow(0.78+0.16, 0.58+0.04, 0.92, 0.50+0.045, "NAusf/Nudm")

arrow(0.70+0.09, 0.50, 0.62+0.11, 0.36+0.09, "")
arrow(0.70+0.18, 0.50+0.045, 0.88, 0.36+0.045, "N6")

# ATSSS note
ax.text(0.70, 0.80, "ATSSS (Release-16): 5G NR + Wi-Fi\nЧиглүүлэх/Шилжүүлэх/Хуваах",
        fontsize=10, ha='center', va='center')

# Optional 5G NR
gnb = box(0.76, 0.82, 0.20, 0.09, "5G NR gNB\n(3GPP Access)")
arrow(0.76+0.10, 0.82, 0.78+0.08, 0.68+0.08, "")

# Discovery/policy note
ax.text(0.33, 0.92, "Discovery: ANDSF / Hotspot 2.0 (Passpoint)\nБодлого: PCRF/PCF,
        QoS/QoE", fontsize=9, ha='left')

# Visual tuning
ax.set_xlim(0, 1)
ax.set_ylim(0.25, 1.0)
ax.axis('off')
ax.set_title("Huawei i-WiFi Offloading – Conceptual Architecture (EPC & 5GC)", fontsize=14)

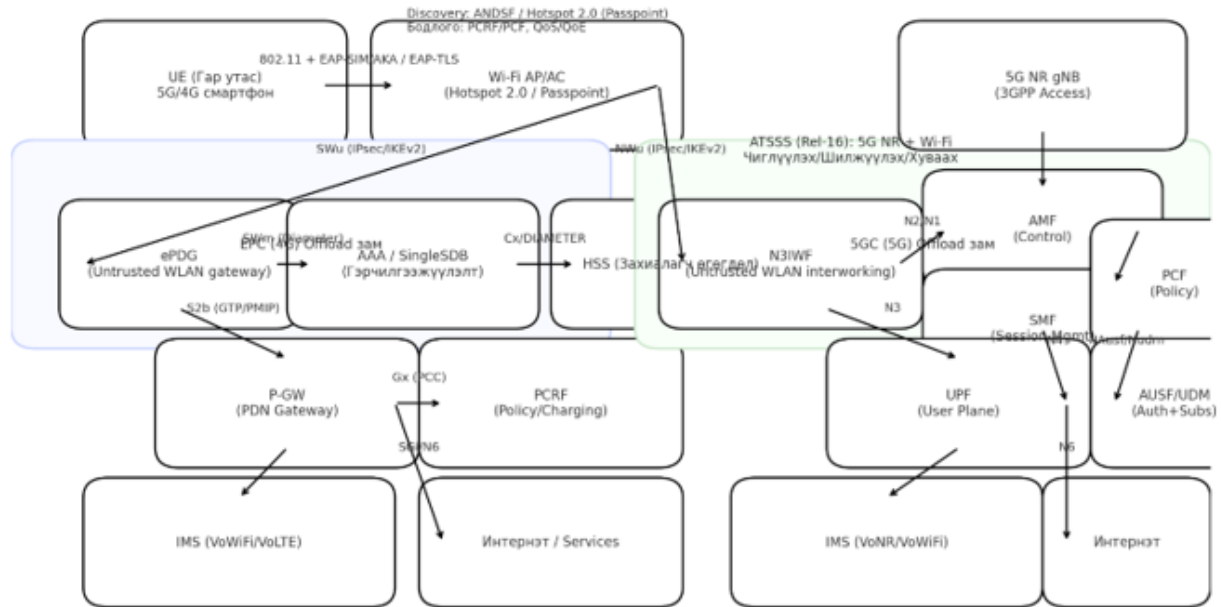
# Legend-like annotations
line1 = mlines.Line2D([], [], color='black', label='Secure tunnel (IPsec/IKEv2)')
line2 = mlines.Line2D([], [], color='black', label='Control/Data interfaces')
ax.legend(handles=[line1, line2], loc='lower center', bbox_to_anchor=(0.5, 0.26), ncol=2,
        frameon=False, fontsize=10)

outpath = "/mnt/data/huawei_i_wifi_offloading_architecture.png"

```

plt.savefig(outpath, dpi=200, bbox_inches='tight')
outpath

Result: '/mnt/data/huawei_i_wifi_offloading_architecture.png'



Зураг 3.11.1 Huawei Wi-Fi offloading: Ерөнхий зарчим

Зураг 3.11.1 5G/4G Wi-Fi Offloading (EPC-ePDG ба 5GC-N3IWF хоёр замыг, AAA/SDM, PCRF/PCF, IMS, Passpoint/ANDSF, ATSSS зэрэг интерфэйсүүдтэй нь харуулсан)

- 4G/EPC Offload (VoWiFi/NSWO): UE Wi-Fi-д холбогдоод ePDG рүү IPsec/IKEv2 (SWu) туннель байгуулна → ePDG нь P-GW-тай (S2b) холбогдож, AAA/SingleSDB (SIM-д суурилсан EAP-AKA/EAP-SIM) ба HSS-тай хамтран баталгаажуулдаг → PCRF (Gx) бодлого, төлбөрийг удирдаж, IMS/Интернэтийн чиглэл шийдэгдэнэ. [huawei](#)
- 5G/5GC Offload: UE Wi-Fi-аар N3IWF-д IPsec (NWu) туннель үүсгэнэ → AMF (N2/N1), UPF (N3), SMF (N4), PCF бодлогоор дамжин үйлчилгээ рүү гарна. Trusted Wi-Fi тохиолдолд TNGF ашиглана. [EneaWireless Broadband AllianceITU](#)
- Автомат нэвтрэлт ба сонголт: Hotspot 2.0/Passpoint болон ANDSF-ийн бодлогоор Wi-Fi илрүүлэлт, сонголт, offload-ын дүрмийг хэрэгжүүлдэг. [huaweiGSM](#)
- ATSSS (Rel-16): 5G NR + Wi-Fi-ийн олон сувгаар Chigлүүлэх/Шилжүүлэх/Хуваах (MPTCP/MP-QUIC) боломжтой—QoE-г сайжруулж, давхардсан дамжуулалт/агрегацыг бодлогоор удирдана. [Wireless Broadband AllianceEnea](#)

Huawei-ийн нийтэд ил байгаа мэдээлэл дээр тулгуурлан тодорхойлсон зангилаанууд:

- VoWiFi шийдэл: EPC (ePDG) + SingleSDB (3GPP AAA) + IMS, untrusted Wi-Fi-д ePDG заавал, SIM-д суурилсан EAP-AKA/EAP-SIM; VoLTE↔VoWiFi тасралтгүй шилжилт. [huawei](#)
- 5G-ийн интеграцчилал: Huawei-ийн 5G-Advanced цагаан номд N3IWF-ийг аж үйлдвэрийн/хувийн сүлжээнд 5G-тэй нэгтгэх түлхүүр функц гэж тодорхойлсон. [huawei](#)
- Захиалагч өгөгдөл/AAA ба бодлого: Huawei SDM/SingleSDB (Wi-Fi Offload/VoWiFi-ийг дэмжинэ), SmartPCC/PCF бодлогын удирдлагад ашиглагддаг. [huawei](#)

Зураг 3.11.2-т үзүүлсэн урсгалын чиглэл:

- UE → Wi-Fi AP/AC (Passpoint) →
- Untrusted: IPsec (SWu/NWu) → ePDG/N3IWF → P-GW/UPF → IMS/Интернэт; AAA/HSS/AUSF-UDM-аар баталгаажуулалт, PCRF/PCF-оор бодлого. [huaweiEnea](#)
- Trusted Wi-Fi хувилбар: S2a/TNGF-аар интерворкинг. [Wireless Broadband AllianceETSI](#)
- ATSSS: 5G NR + Wi-Fi олон сувгийг бодлогоор Steering/Switching/Splitting. [Wireless Broadband AllianceEnea](#)

Зөвлөмж

- **SIM-д суурилсан нэвтрэлт** (EAP-AKA/EAP-SIM) + Passpoint профайл → хэрэглэгчдэд автоматаар Wi-Fi offload. [huawei](#)
- **Core тал:** EPC-д ePDG/AAA/IMS, 5GC-д N3IWF/UPF/PCF/AMF-ийг зөв байршуулж, PCC бодлого-д QoS/QoE нөхцөлүүд (RSSI/SINR, AP ачаалал, апп-ын ангилал) тодорхойл. [huaweiEnea](#)

- RAN-Wi-Fi бодлого: ANDSF/URSP-той уялдуулж, enterprise/campus орчинд trusted Wi-Fi (TNGF)-ийг давхар бодолц. [GSMAETSI](#)

5G–Wi-Fi Offloading арилжааны платформуудын техникийн зураглал ба харьцуулалт

- UE (гар утас/таблет): Wi-Fi болон 5G NR интерфэйс давхар ашиглана.
- Wi-Fi AP/AC: Passpoint (Hotspot 2.0) + ANDSF илрүүлэлтээр Wi-Fi сонгогдоно.
- Core Integration:
 - 4G EPC-д ePDG + AAA + HSS + PCRF
 - 5G Core-д N3IWF + AMF + SMF + UPF + PCF + AUSF/UDM
- Policy Control: PCRF/PCF – урсгал Wi-Fi руу чиглүүлэх эсэхийг шийднэ.
- Service Anchor: IMS / Internet (VoWiFi, VoLTE, VoNR, OTT).
- ATSSS (Rel-16): 5G NR + Wi-Fi сувгийн steering/switching/splitting.

Хүснэгт 3.16 Үндсэн платформуудын харьцуулалт

Үйлдвэрлэгч	Архитектурын онцлог	Давуу тал	Сул тал	Үнийн жишиг (энтерпрайз лиценз)
Huawei i-WiFi Offloading	EPC-д ePDG, 5GC-д N3IWF/UPF, CloudCore-тэй интеграцтай	• Seamless handover (VoWiFi↔VoLTE) • Huawei CloudPCC бодлого удирдлага • SingleSDB AAA	Huawei экосистемд илүү уялдана, vendor lock-in	~0.5–1 сая USD (carrier-grade лиценз + AAA/ePDG)
Ericsson Wi-Fi Offload	Wi-Fi integration in EPC/5GC, ANDSF + Hotspot 2.0	• Multivendor интерворкинг сайн • QoE-д суурилсан оффлоад	Үйлчилгээ тус бүр тусдаа лиценз шаарддаг	~0.6–1.2 сая USD
Nokia Smart Wi-Fi	Cloud Packet Core + NetAct удирдлага	• Enterprise deployment (кампус, уул уурхай) • QoS/QoE оновчтой	Ихэвчлэн enterprise segment руу чиглэсэн	~0.4–0.9 сая USD
Cisco Wi-Fi Offload / Hotspot 2.0	EPC/5GC integration + Passpoint automation	• Carrier-grade Wi-Fi expertise • EAP-SIM/АКА бүрэн дэмжлэг	EPC/5GC талд Cisco core шаардлагатай	~0.5–1 сая USD

Эдгээр үнэ нь нээлттэй эх сурвалжийн мэдээлэлд тулгуурласан тул бодит тендерийн үнийн санал биш, зөвхөн операторын түвшний жишиг зардал юм. Төсөл, хэрэглэгчийн тоо, тоног төхөөрөмжийн хамрах хүрээ зэргээс хамаарч 2–3 дахин өөрчлөгдөх боломжтой.

Монгол улсын хувьд:

- **Хот доторхи хэрэглээ (UB Smart City, худалдааны төв, кампус):** Cisco эсвэл Huawei i-WiFi тохиромжтой (Passpoint/Seamless login).
- **Үйлдвэр аж ахуйн хэрэглээ (уул уурхай, кампус сүлжээ):** Nokia Smart Wi-Fi сайн тохирно (enterprise optimization).
- **Үндэсний хэмжээний операторын төвшинд:** Huawei эсвэл Ericsson-ы бүрэн хэмжээний EPC/5GC offload платформ хамгийн оновчтой байна.

Хүснэгт 3.17 5G Wi-Fi offloading платөөрмн харьцуулалт

Үйлдвэрлэгч	Архитектур	Давуу тал	Сул тал	Жишиг үнэ (USD)
Huawei i-WiFi Offloading	EPC: ePDG + AAA + HSS + PCRF; 5GC: N3IWF + UPF + PCF + AMF; Huawei CloudCore-тэй интеграц	Seamless handover (VoWiFi↔VoLTE); CloudPCC бодлого удирдлага; SingleSDB AAA	Huawei экосистемд хэт уялдсан (vendor lock-in)	0.5–1 сая
Ericsson Wi-Fi Offload	EPC/5GC Wi-Fi интеграц; ANDSF + Hotspot 2.0 дээр суурилсан удирдлага	Multivendor интерворкинг сайн; QoE-д суурилсан оффлоадингийн бодлого	Лиценз тус бүр тусдаа авах шаардлагатай, өртөг өндөрсөх боломжтой	0.6–1.2 сая
Nokia Smart Wi-Fi	Cloud Packet Core + NetAct интеграц (enterprise-д тохиромжтой)	Enterprise/campus-д оновчтой; QoS/QoE хяналт сайн	Ихэвчлэн enterprise-д чиглэсэн	0.4–0.9 сая
Cisco Wi-Fi Offload / Hotspot 2.0	EPC/5GC интеграц; Passpoint (Hotspot 2.0) автомажуулалт	Carrier-grade Wi-Fi туршлага; EAP-SIM/AKA бүрэн дэмжлэгтэй	Cisco core-тэй уялдсан үед хамгийн оновчтой	0.5–1 сая

III. Бүлгийн дүгнэлт

5G холимог сүлжээний Wi-Fi Offloading нь хэрэглэгч болон операторын аль алинд үр ашигтай, мобайл өгөгдлийг динамик, ухаалгаар удирдах шинэ шатны шийдэл болно.

5G/Wi-Fi холимог сүлжээнд ачаалал шилжүүлэлт хийх нь:

- Ачааллыг тэнцвэржүүлэх
- QoS/QoE сайжруулах
- Сүлжээний зардал бууруулах зорилготой.

Шилдэг шийдэл нь ATSSS + MPTCP + AI удирдлагатай урсгалын анализ юм.

5G/Wi-Fi ачаалал шилжүүлэх нь 5G сүлжээний үүрийн захын бүсэд gNB үүрийн дохио шуугианы харьцаа багасаж, QoS буурах тохиодолд сүлжээний үр ашгийг нэмэгдүүлэхэд зориулагдана. Ялангуяа өндөр хэрэглээтэй, эсвэл сүлжээний бүрхэлт хангалтгүй бүсэд өргөтгөл хийх зардал багатай, хурдан гүйцэтгэлтэй, илүү боломжтой.

5G/WiFi ачаалал шилжүүлэх арга нь ашиглалтын үр ашгийн судалгаанаас харахад гарч болон орж буй ярианы 30%-ийг offload хийвэл, цөм сүлжээний зардал 63,600 ам.доллараас 52,152 ам.доллар болж буурч, 11,448 ам.долларын хэмнэлт гарах боломжтой байна.

ТӨВЧИЛСОН ҮГИЙН ЖАГСААЛТ

3GPP	Third Generation Partnership Project
ABS	Almost Blank Subframe
AI	Artificial intelligence
AMF	Access and Mobility Management Function
ANDSF	Access Network Discovery and Selection Function
AP	Access Point
ATSSS	Access Traffic Steering, Switching and Splitting
AUSF	Authentication Server Function
BS	Base Station
CSAT	Carrier Sense Adaptive Transmission
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DDQN	Double Deep Q Network
DRL	Deep Reinforcement Learning
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
eMBB	enhanced Mobile Broadband
eNB	eNodeB
EPC	Evolved Packet Core
HetNet	Heterogeneous Network
gNB	Next Generation NodeB IEEE
IFOM	IP Flow Mobility
IoT	Internet of Things
IETF	Internet Engineering Task Force
ITU-T	International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector
IMT-2020	International Mobile Telecommunications-2020
LAA	Licensed Assisted Access
LAN	Local area network
LBO	Local Breakout
LBT	Listen Before Talk
LIPA	Local IP Access
LTE-U	Long-Term Evolution-Unlicensed
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Media Access Control
MDP	Markov Decision Process
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
mMTC	massive Machine-Type Communications
MPTCP	Multipath Transmission Control Protocol
NFV	Network Functions Virtualization
NG-RAN	Next-Generation Radio Access Network
NR	New Radio

NSA	Non-Standalone
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PCF	Policy Control Function
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RAT	Radio Access Technology
RSRP	Reference Signal Received Power
SA	Standalone
SDN	Software Defined Radio
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SIPTO	Selected IP Traffic Offload
SMF	Session Management Function
UE	User Equipment
UDM	Unified Data Management
ULCL	Uplink Classifier
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Service
VoIP	Voice over Internet Protocol
VR	Virtual Reality

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

1. Report ITU-R M.2370-0(07/2015) IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030, M Series Mobile, radio determination, amateur and related satellite services.
2. Signals Research Group, “The prospect LTE Wi-Fi sharing unlicensed spectrum”, Qualcomm, San Diego, CA, USA, White Paper, Feb. 2015.
3. M. Agiwal, A. Roy, et al., "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, third quarter 2016.
4. F. Hu, B. Chen, et al., "Full Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks Toward 5G: A Survey" *IEEE Access*, vol. 6, pp. 15754-15776, 2018.
5. G. Naik, J. Liu, et al., “Coexistence of Wireless Technologies in the 5 GHz Bands: A Survey of Existing Solutions and a Roadmap for Future Research”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol 20, pp. 1777-1798, 2018.
6. B. Chen, J. Chen, et al., “Coexistence of LTE-LAA and Wi-Fi on 5 GHz with Corresponding Deployment Scenarios: A Survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 1553-877X (c) 2016.
7. C. Capretti, F. Gringoli, et al., “LTE/Wi-Fi Co-existence under Scrutiny: An Empirical Study”, October 2016 Pages 33–40, <https://doi.org/10.1145/2980159.2980164>
8. K. Kinoshita, K. Ginnan, et al., "Channel Assignment and Access System Selection in Heterogeneous Wireless Network with Unlicensed Bands", 2020 21st Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), pp. 96-101, 2020.
9. J. Wszolek, S. Ludyga, et al., “Revisiting LTE LAA: Channel Access, QoS, and Coexistence with Wi-Fi”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 2, pp. 91-97, February 2021.
10. G. Naik, J. M. Park, et al., "Next Generation Wi-Fi and 5G NR-U in the 6 GHz Bands: Opportunities and Challenges", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 153027-153056, 2020..
11. M. Alhulayil, M. López-Benítez, et al., "Novel LAA Waiting and Transmission Time Configuration Methods for Improved LTE-LAA/Wi-Fi Coexistence Over Unlicensed Bands", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 162373-162393, 2020.
12. N. Bitar, O. Al Kalaa, et al., "On the Coexistence of LTE-LAA in the Unlicensed Band: Modeling and Performance Analysis", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 52668-52681, 2018.
13. V. Maglogiannis, A. Shahid, et al., “Enhancing the Coexistence of LTE and Wi-Fi in Unlicensed Spectrum Through Convolutional Neural Networks”;
14. M. Hirzallah, M. Krunzet, et al., "5G New Radio Unlicensed: Challenges and Evaluation", *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 7, no. 3, pp. 689-701, Sept. 2021.

15. N. Najem, M. Martinez, et al., "Cognitive Radio Resources Scheduling using Multi-Agent Q-Learning for LTE", International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC) Vol.14, No.2, March 2022

ХАВСРАЛТ

Хавсралт 1

Excel-д суурилсан offload нөлөөллийн загварууд:

```
# Build an Excel-style offload impact model DataFrame
```

```
# Define parameters
```

```
offload_scenarios = [0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5] # 10% to 50% offload
```

```
core_cost_per_min = 0.002 # $ per minute in core network
```

```
wifi_cost_per_min = 0.0005 # $ per minute using Wi-Fi
```

```
total_offloadable_traffic_min = offloadable_traffic_min # in minutes
```

```
# Build the data
```

```
model_data = []
```

```
for ratio in offload_scenarios:
```

```
    offloaded = total_offloadable_traffic_min * ratio
```

```
    core_handled = total_offloadable_traffic_min - offloaded
```

```
    cost = (offloaded * wifi_cost_per_min) + (core_handled * core_cost_per_min)
```

```
    savings = baseline_cost - cost
```

```
    model_data.append({
```

```
        "Offload хувь": f"{int(ratio * 100)}%",
```

```
        "Offload траффик (минут)": offloaded,
```

```
        "Core траффик (минут)": core_handled,
```

```
        "Нийт зардал ($)": cost,
```

```
        "Хэмнэлт ($)": savings
```

```
    })
```

```
# Create DataFrame
```

```
offload_model_df = pd.DataFrame(model_data)
```

```
# Display to user
```

```
display_dataframe_to_user(name="Wi-Fi Offload Impact Excel загвар",  
dataframe=offload_model_df)
```

Хавсралт 2

```
matlab
CopyEdit
% 5G болон WiFi сүлжээний параметрууд
wifi_bandwidth = 100; % Mbps
wifi_latency = 30; % ms
f5g_bandwidth = 200; % Mbps
f5g_latency = 15; % ms
% Хэрэглэгчийн урсгалын шинж чанар (10 хэрэглэгч)
num_users = 10;
app_type = ["video", "web", "voip", "file", "video", "web", "voip", "file", "video", "web"];
% Bandwidth & latency шаардлага
bw_req = containers.Map({'video','web','voip','file'}, [50, 10, 20, 40]);
latency_req = containers.Map({'video','web','voip','file'}, [40, 80, 20, 100]);
% Offloading decision
offload_target = strings(num_users,1);

for i = 1:num_users
    app = app_type(i);
    required_bw = bw_req(app);
    required_latency = latency_req(app);

    % WiFi-г шалгах
    if wifi_bandwidth >= required_bw && wifi_latency <= required_latency
        offload_target(i) = "Wi-Fi";
        wifi_bandwidth = wifi_bandwidth - required_bw;
    % 5G-г шалгах
    elseif f5g_bandwidth >= required_bw && f5g_latency <= required_latency
        offload_target(i) = "5G";
        f5g_bandwidth = f5g_bandwidth - required_bw;
    else
        offload_target(i) = "Blocked";
    end
end

% Үр дүн
disp(table((1:num_users)', app_type', offload_target, ...
    'VariableNames', {'User', 'Application', 'OffloadedTo'}));
```

Хавсралт 3

```
# Now calculate a separate scenario for WiFi offloading
# Assume WiFi offloading is even more cost-effective than edge offload
# Cost assumptions:
# Core network voice handling cost: $0.002 per minute (same)
# WiFi offload voice handling cost: $0.0005 per minute (cheaper than edge)
wifi_offload_cost_per_min = 0.0005
# Same 30% offloading ratio
wifi_offloaded_traffic = offloadable_traffic_min * 0.30
wifi_core_handled_traffic = offloadable_traffic_min - wifi_offloaded_traffic
wifi_cost_core = wifi_core_handled_traffic * core_cost_per_min
wifi_cost_offload = wifi_offloaded_traffic * wifi_offload_cost_per_min
wifi_total_cost = wifi_cost_core + wifi_cost_offload
wifi_savings = baseline_cost - wifi_total_cost
# Create results DataFrame
wifi_result_data = {
    "Зардлын төрөл": ["Core network (бүх ачаалал)", "WiFi Offload ашигласан",
"Хэмнэлт"],
    "Нийт зардал ($)": [baseline_cost, wifi_total_cost, wifi_savings],
    "Тайлбар": [
        "Offload ашиглаагүй нөхцөлд нийт зардал",
        "30% WiFi offload ашигласан үед",
        "WiFi Offload-ийн үр дүнд үүссэн хэмнэлт"
    ]
}

wifi_result_df = pd.DataFrame(wifi_result_data)
# Display the WiFi offloading simulation result
display_dataframe_to_user(name="WiFi Offload ашиглалтын эдийн засгийн симуляц",
dataframe=wifi_result_df)
# Now calculate a separate scenario for WiFi offloading
# Assume WiFi offloading is even more cost-effective than edge offload
# Cost assumptions:
# Core network voice handling cost: $0.002 per minute (same)
# WiFi offload voice handling cost: $0.0005 per minute (cheaper than edge)
wifi_offload_cost_per_min = 0.0005
# Same 30% offloading ratio
wifi_offloaded_traffic = offloadable_traffic_min * 0.30
wifi_core_handled_traffic = offloadable_traffic_min - wifi_offloaded_traffic
```

```

wifi_cost_core = wifi_core_handled_traffic * core_cost_per_min
wifi_cost_offload = wifi_offloaded_traffic * wifi_offload_cost_per_min
wifi_total_cost = wifi_cost_core + wifi_cost_offload
wifi_savings = baseline_cost - wifi_total_cost
# Create results DataFrame
wifi_result_data = {
    "Зардлын төрөл": ["Core network (бүх ачаалал)", "WiFi Offload ашигласан",
"Хэмнэлт"],
    "Нийт зардал ($)": [baseline_cost, wifi_total_cost, wifi_savings],
    "Тайлбар": [
        "Offload ашиглаагүй нөхцөлд нийт зардал",
        "30% WiFi offload ашигласан үед",
        "WiFi Offload-ийн үр дүнд үүссэн хэмнэлт"
    ]
}

wifi_result_df = pd.DataFrame(wifi_result_data)
# Display the WiFi offloading simulation result
display_dataframe_to_user(name="WiFi Offload ашиглалтын эдийн засгийн симуляц",
dataframe=wifi_result_df)
Result

```


Хавсралт 4

```
# Convert monthly savings from WiFi offload into annual savings
monthly_wifi_savings = wifi_savings
annual_wifi_savings = monthly_wifi_savings * 12

# Create a new DataFrame to summarize annual WiFi offload savings
annual_wifi_result = pd.DataFrame({
    "Тайлбар": ["Жилийн хэмнэлт (WiFi Offload ашигласан үед)"],
    "Нийт хэмнэлт ($)": [annual_wifi_savings]
})

# Display the annual WiFi savings
display_dataframe_to_user(name="WiFi Offload ашиглалтын жилийн хэмнэлт",
dataframe=annual_wifi_result)

# Convert monthly savings from WiFi offload into annual savings
monthly_wifi_savings = wifi_savings
annual_wifi_savings = monthly_wifi_savings * 12
# Create a new DataFrame to summarize annual WiFi offload savings
annual_wifi_result = pd.DataFrame({
    "Тайлбар": ["Жилийн хэмнэлт (WiFi Offload ашигласан үед)"],
    "Нийт хэмнэлт ($)": [annual_wifi_savings]
})

# Display the annual WiFi savings
display_dataframe_to_user(name="WiFi Offload ашиглалтын жилийн хэмнэлт",
dataframe=annual_wifi_result)
Result
```

Хавсралт 5

HetNet 5G–Wi-Fi threshold-based steering demo (Python implementation)

Notes:

- This simulates RSRP/SINR (5G) and RSSI/SNR (Wi-Fi) along a short user trajectory.

- Implements three policies: Wi-Fi-first (threshold), 5G-first (threshold), and ATSSS Split.

- Outputs: a CSV with the timeline, decisions, and QoE; plus a few charts.

```
import numpy as np
```

```
import pandas as pd
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
from pathlib import Path
```

```
np.random.seed(42)
```

```
T = 600 # number of time-steps (~ e.g., 10 minutes at 1s)
```

```
t = np.arange(T)
```

```
# --- Generate a simple mobility / channel scenario ---
```

```
# Slow fading trend + fast fading noise
```

```
def band_limited_noise(n, scale=1.0, smooth=15):
```

```
    x = np.random.randn(n)
```

```
    k = smooth
```

```
    kernel = np.exp(-np.linspace(-3, 3, 2*k+1)**2)
```

```
    kernel /= kernel.sum()
```

```
    return np.convolve(x, kernel, mode="same") * scale
```

```
# 5G channel (RSRP, SINR), Wi-Fi channel (RSSI, SNR)
```

```
rsrp_5g = -90 + band_limited_noise(T, 3.0, 25) # around -90 dBm
```

```
sinr_5g = 12 + band_limited_noise(T, 3.5, 20) # around 12 dB
```

```
rss_i_wifi = -62 + band_limited_noise(T, 4.0, 18) # around -62 dBm
```

```
snr_wifi = 28 + band_limited_noise(T, 4.0, 18) # around 28 dB
```

```
# Network load dynamics
```

```
prb_usage_5g = 55 + 30*np.clip(np.sin(t/80) + 0.2*band_limited_noise(T,0.7,10), -1, 1) # 25-85%
```

```
chan_util_wifi = 50 + 35*np.clip(np.cos(t/90) + 0.3*band_limited_noise(T,0.7,10), -1, 1) # 15-85%
```

```
# RTT models: baseline + load- and SINR/SNR-dependent
```

```
rtt_5g = 15 + (prb_usage_5g-50)*0.25 - (sinr_5g-10)*0.8 # ms
```

```
rtt_wifi = 25 + (chan_util_wifi-50)*0.35 - (snr_wifi-25)*0.9 # ms
```

```
# Clip reasonable ranges
```

```
sinr_5g = np.clip(sinr_5g, -5, 25)
```

```

snr_wifi = np.clip(snr_wifi, 5, 45)
rsrp_5g = np.clip(rsrp_5g, -120, -70)
rssi_wifi = np.clip(rssi_wifi, -85, -45)
rtt_5g = np.clip(rtt_5g, 5, 80)
rtt_wifi = np.clip(rtt_wifi, 5, 120)
prb_usage_5g = np.clip(prb_usage_5g, 10, 95)
chan_util_wifi = np.clip(chan_util_wifi, 10, 95)

# --- Thresholds (as discussed) ---
TH = {
    "wifi_rssi": -65, # dBm
    "wifi_snr": 25, # dB
    "wifi_util_hi": 70, # %
    "nr_rsrp": -95, # dBm
    "nr_sinr": 10, # dB
    "nr_prb_hi": 80 # %
}

# --- Traffic mix weights ---
# Two classes: latency-sensitive (LS) 40%, throughput-sensitive (TS) 60%
w_LS = 0.4
w_TS = 0.6

# Utility functions (0..1)
def util_latency(rtt_ms):
    # 1 at 10ms, ~0 at 120ms (clipped)
    return np.clip(1 - (rtt_ms-10)/110, 0, 1)

def util_throughput_from_snr(snr_db):
    # Simple mapping: 0 at 5dB, 1 at 35dB (clipped)
    return np.clip((snr_db-5)/30, 0, 1)

def util_throughput_from_sinr(sinr_db):
    # 0 at -5dB, 1 at 25dB
    return np.clip((sinr_db+5)/30, 0, 1)

def qoe_wifi(rtt, snr, util):
    return 0.5*util_latency(rtt)*w_LS + 0.5*util_throughput_from_snr(snr)*w_TS + 0.0

def qoe_5g(rtt, sinr, prb):
    # Light penalty when PRB usage is high
    load_penalty = np.clip((prb-70)/30, 0, 0.25)
    base = 0.5*util_latency(rtt)*w_LS + 0.5*util_throughput_from_sinr(sinr)*w_TS
    return np.clip(base*(1 - load_penalty), 0, 1)

```

```

q_wifi = qoe_wifi(rtt_wifi, snr_wifi, chan_util_wifi/100)
q_5g = qoe_5g(rtt_5g, sinr_5g, prb_usage_5g)

```

--- Policies ---

```
def policy_wifi_first(i, state):
```

```
    # Prefer Wi-Fi if above thresholds and not overloaded; else 5G if above thresholds; else pick higher QoE
```

```
    wifi_ok = (rssi_wifi[i] >= TH["wifi_rssi"]) and (snr_wifi[i] >= TH["wifi_snr"]) and (chan_util_wifi[i] <= TH["wifi_util_hi"])
```

```
    nr_ok = (rsrp_5g[i] >= TH["nr_rsrp"]) and (sinr_5g[i] >= TH["nr_snr"]) and (prb_usage_5g[i] <= TH["nr_prb_hi"])
```

```
    if wifi_ok:
```

```
        return "Wi-Fi"
```

```
    if nr_ok:
```

```
        return "5G"
```

```
    return "Wi-Fi" if q_wifi[i] >= q_5g[i] else "5G"
```

```
def policy_5g_first(i, state):
```

```
    nr_ok = (rsrp_5g[i] >= TH["nr_rsrp"]) and (sinr_5g[i] >= TH["nr_snr"]) and (prb_usage_5g[i] <= TH["nr_prb_hi"])
```

```
    wifi_ok = (rssi_wifi[i] >= TH["wifi_rssi"]) and (snr_wifi[i] >= TH["wifi_snr"]) and (chan_util_wifi[i] <= TH["wifi_util_hi"])
```

```
    if nr_ok:
```

```
        return "5G"
```

```
    if wifi_ok:
```

```
        return "Wi-Fi"
```

```
    return "Wi-Fi" if q_wifi[i] > q_5g[i] else "5G"
```

ATSSS Split: LS flows go to the lower-RTT access that meets min thresholds;

TS flows go to the higher-throughput (via SNR/SINR) access; overall QoE is mix.

```
def policy_atsss_split(i, state):
```

```
    # Check minimum access viability
```

```
    wifi_viable = (rssi_wifi[i] >= TH["wifi_rssi"]+3) and (snr_wifi[i] >= TH["wifi_snr"]) and (chan_util_wifi[i] <= TH["wifi_util_hi"]+5)
```

```
    nr_viable = (rsrp_5g[i] >= TH["nr_rsrp"]+3) and (sinr_5g[i] >= TH["nr_snr"]) and (prb_usage_5g[i] <= TH["nr_prb_hi"]+5)
```

Latency-sensitive steering

```
    ls_to = None
```

```
    if wifi_viable and nr_viable:
```

```
        ls_to = "Wi-Fi" if rtt_wifi[i] < rtt_5g[i] else "5G"
```

```
    elif wifi_viable:
```

```
        ls_to = "Wi-Fi"
```

```
    elif nr_viable:
```

```
        ls_to = "5G"
```

```
    else:
```

```
        ls_to = "Wi-Fi" if rtt_wifi[i] <= rtt_5g[i] else "5G"
```

Throughput-sensitive steering

```
    ts_to = "Wi-Fi" if util_throughput_from_snr(snr_wifi[i]) >= util_throughput_from_snr(sinr_5g[i]) else "5G"
```

```
return f"LS→{ls_to} | TS→{ts_to}"
```

```
# Hysteresis for on/off ping-pong (apply to single-access policies)
```

```
def apply_hysteresis(decisions, min_hold=5):
```

```
    out = []
```

```
    hold = 0
```

```
    last = None
```

```
    for d in decisions:
```

```
        if last is None:
```

```
            last = d
```

```
            hold = 1
```

```
        elif d != last and hold < min_hold:
```

```
            # keep last
```

```
            pass
```

```
        else:
```

```
            if d != last:
```

```
                last = d
```

```
                hold = 1
```

```
            else:
```

```
                hold += 1
```

```
        out.append(last)
```

```
    return out
```

```
# Run policies
```

```
dec_wifi = [policy_wifi_first(i, None) for i in range(T)]
```

```
dec_5g = [policy_5g_first(i, None) for i in range(T)]
```

```
dec_wifi_h = apply_hysteresis(dec_wifi, 8)
```

```
dec_5g_h = apply_hysteresis(dec_5g, 8)
```

```
dec_split = [policy_atsss_split(i, None) for i in range(T)]
```

```
# Effective QoE per policy
```

```
def qoe_for_decision(i, d):
```

```
    if d == "Wi-Fi":
```

```
        return q_wifi[i]
```

```
    elif d == "5G":
```

```
        return q_5g[i]
```

```
    else:
```

```
        # Split: combine class utilities by where they land
```

```
        ls_to_wifi = d.startswith("LS→Wi-Fi")
```

```
        ts_to_wifi = "TS→Wi-Fi" in d
```

```
        # LS part from chosen access based on latency metric
```

```
        ls_q = util_latency(rtt_wifi[i]) if ls_to_wifi else util_latency(rtt_5g[i])
```

```
        # TS part from chosen access based on throughput metric
```

```
        ts_q = util_throughput_from_snr(snr_wifi[i]) if ts_to_wifi else util_throughput_from_snr(snr_5g[i])
```

```

# small load penalties
if ls_to_wifi or ts_to_wifi:
    wifi_pen = np.clip((chan_util_wifi[i]-70)/30, 0, 0.25)
else:
    wifi_pen = 0
if (not ls_to_wifi) or (not ts_to_wifi):
    nr_pen = np.clip((prb_usage_5g[i]-70)/30, 0, 0.25)
else:
    nr_pen = 0
q = w_LS*ls_q*(1-wifi_pen) + w_TS*ts_q*(1-nr_pen)
return float(np.clip(q, 0, 1))

q_wifi_first = np.array([qoe_for_decision(i, d) for i, d in enumerate(dec_wifi_h)])
q_5g_first = np.array([qoe_for_decision(i, d) for i, d in enumerate(dec_5g_h)])
q_split = np.array([qoe_for_decision(i, d) for i, d in enumerate(dec_split)])

# Aggregate stats
avg_q = {
    "Wi-Fi-first": q_wifi_first.mean(),
    "5G-first": q_5g_first.mean(),
    "ATSSS Split": q_split.mean(),
}

handover_count_wifi = sum(1 for i in range(1, T) if dec_wifi_h[i]!=dec_wifi_h[i-1])
handover_count_5g = sum(1 for i in range(1, T) if dec_5g_h[i]!=dec_5g_h[i-1])

# Save CSV
df = pd.DataFrame({
    "t": t,
    "RSRP_5G_dBm": rsrp_5g,
    "SINR_5G_dB": sinr_5g,
    "PRB_5G_%": prb_usage_5g,
    "RTT_5G_ms": rtt_5g,
    "RSSI_WiFi_dBm": rssi_wifi,
    "SNR_WiFi_dB": snr_wifi,
    "Util_WiFi_%": chan_util_wifi,
    "RTT_WiFi_ms": rtt_wifi,
    "QoE_5G": q_5g,
    "QoE_WiFi": q_wifi,
    "Decision_WiFiFirst": dec_wifi_h,
    "Decision_5GFirst": dec_5g_h,
    "Decision_ATSSS_Split": dec_split,
    "QoE_WiFiFirst": q_wifi_first,
    "QoE_5GFirst": q_5g_first,
    "QoE_ATSSS_Split": q_split
})

```

```

out_dir = Path("/mnt/data")
csv_path = out_dir / "het_net_threshold_simulation.csv"
df.to_csv(csv_path, index=False)

# Display a subset table for quick inspection
from caas_jupyter_tools import display_dataframe_to_user
display_dataframe_to_user("HetNet Threshold Simulation (first 200 rows)", df.head(200))

# --- Charts ---
# 1) Channel quality over time
plt.figure(figsize=(10,4))
plt.plot(t, rsrp_5g, label="5G RSRP (dBm)")
plt.plot(t, rssi_wifi, label="Wi-Fi RSSI (dBm)")
plt.title("Signal Levels over Time")
plt.xlabel("Time (arbitrary units)")
plt.ylabel("Level (dBm)")
plt.legend()
img1 = out_dir / "signal_levels.png"
plt.tight_layout()
plt.savefig(img1, dpi=150)
plt.close()

# 2) QoE per policy over time
plt.figure(figsize=(10,4))
plt.plot(t, q_wifi_first, label="Wi-Fi-first QoE")
plt.plot(t, q_5g_first, label="5G-first QoE")
plt.plot(t, q_split, label="ATSSS Split QoE")
plt.title("QoE over Time by Policy")
plt.xlabel("Time")
plt.ylabel("QoE (0..1)")
plt.legend()
img2 = out_dir / "qoe_over_time.png"
plt.tight_layout()
plt.savefig(img2, dpi=150)
plt.close()

# 3) Average QoE bar chart
plt.figure(figsize=(6,4))
policies = list(avg_q.keys())
scores = [avg_q[p] for p in policies]
plt.bar(policies, scores)
plt.title("Average QoE by Policy")
plt.ylabel("Average QoE (0..1)")
img3 = out_dir / "avg_qoe.png"

```

```
plt.tight_layout()  
plt.savefig(img3, dpi=150)  
plt.close()
```

```
csv_path, str(img1), str(img2), str(img3), avg_q, handover_count_wifi, handover_count_5g
```


ХАВСРАЛТ 5

```
# UB downtown peak-hour offloading simulation (retry after kernel reset)
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from pathlib import Path
from caas_jupyter_tools import display_dataframe_to_user

np.random.seed(7)

T = 900 # 15 minutes at 1s resolution
t = np.arange(T)

def smooth_noise(n, scale=1.0, k=25):
    x = np.random.randn(n)
    w = np.exp(-np.linspace(-3, 3, 2*k+1)**2)
    w /= w.sum()
    return np.convolve(x, w, mode="same") * scale

# 5G channel state
rsrp_5g = -92 + smooth_noise(T, 2.5, 28)
sinr_5g = 8 + smooth_noise(T, 3.0, 22)
prb_5g = 88 + 6*np.sin(t/70) + 3*smooth_noise(T, 0.4, 10)

# Wi-Fi channel state
rssi_wifi = -60 + smooth_noise(T, 3.0, 20)
snr_wifi = 28 + smooth_noise(T, 3.0, 20)
util_wifi = 42 + 8*np.cos(t/90) + 3*smooth_noise(T, 0.4, 10)

# Clip ranges
rsrp_5g = np.clip(rsrp_5g, -120, -75)
sinr_5g = np.clip(sinr_5g, -3, 20)
prb_5g = np.clip(prb_5g, 60, 98)
rssi_wifi = np.clip(rssi_wifi, -80, -45)
snr_wifi = np.clip(snr_wifi, 10, 45)
util_wifi = np.clip(util_wifi, 20, 80)

# RTT models
rtt_5g = np.clip(18 + 0.35*(prb_5g-70) - 0.7*(sinr_5g-10), 8, 120)
rtt_wifi = np.clip(22 + 0.45*(util_wifi-40) - 0.8*(snr_wifi-25), 6, 150)

TH = {"wifi_rssi": -65, "wifi_snr": 25, "wifi_util_hi": 70, "nr_rsrp": -95, "nr_sinr": 10, "nr_prb_hi": 80}

def util_latency(rtt_ms):
    return np.clip(1 - (rtt_ms-10)/110, 0, 1)

def util_tp_snr(snr_db):
    return np.clip((snr_db-10)/30, 0, 1)

def util_tp_sinr(sinr_db):
    return np.clip((sinr_db+3)/23, 0, 1)
```

w_LS, w_TS = 0.4, 0.6

def qoe_wifi(rtt, snr, util):

```
    base = w_LS*util_latency(rtt) + w_TS*util_tp_snr(snr)
    pen = np.clip((util-70)/30, 0, 0.25)
    return np.clip(base*(1-pen), 0, 1)
```

def qoe_5g(rtt, sinr, prb):

```
    base = w_LS*util_latency(rtt) + w_TS*util_tp_snr(sinr)
    pen = np.clip((prb-75)/25, 0, 0.3)
    return np.clip(base*(1-pen), 0, 1)
```

q5g_before = qoe_5g(rtt_5g, sinr_5g, prb_5g)

qwf_before = qoe_wifi(rtt_wifi, snr_wifi, util_wifi)

steer_share = np.zeros(T)

wifi_ok = (rssi_wifi >= TH["wifi_rssi"]) & (snr_wifi >= TH["wifi_snr"]) & (util_wifi <= TH["wifi_util_hi"])

trigger = (prb_5g >= TH["nr_prb_hi"]) & wifi_ok

for i in range(1, T):

```
    target = 0.35 if trigger[i] else 0.0
    steer_share[i] = steer_share[i-1] + 0.03*(target - steer_share[i-1])
```

prb_5g_after = np.clip(prb_5g * (1 - 0.45*steer_share), 30, 98)

util_wifi_after = np.clip(util_wifi + 40*steer_share, 20, 98)

rtt_5g_after = np.clip(18 + 0.35*(prb_5g_after-70) - 0.7*(sinr_5g-10), 6, 120)

rtt_wifi_after = np.clip(22 + 0.45*(util_wifi_after-40) - 0.8*(snr_wifi-25), 6, 150)

q5g_after = qoe_5g(rtt_5g_after, sinr_5g, prb_5g_after)

qwf_after = qoe_wifi(rtt_wifi_after, snr_wifi, util_wifi_after)

q_avg_before = (q5g_before + qwf_before)/2

q_avg_after = (1-steer_share)*q5g_after + steer_share*qwf_after

summary = {

```
    "Avg 5G PRB before (%)": float(np.mean(prb_5g)),
    "Avg 5G PRB after (%)": float(np.mean(prb_5g_after)),
    "Avg Wi-Fi util before (%)": float(np.mean(util_wifi)),
    "Avg Wi-Fi util after (%)": float(np.mean(util_wifi_after)),
    "Avg steering share (%)": float(100*np.mean(steer_share)),
    "Avg QoE before (0..1)": float(np.mean(q_avg_before)),
    "Avg QoE after (0..1)": float(np.mean(q_avg_after)),
}
```

df = pd.DataFrame({

```
    "t_s": t,
    "RSRP_5G_dBm": rsrp_5g,
    "SINR_5G_dB": sinr_5g,
    "PRB_5G_before_%": prb_5g,
    "PRB_5G_after_%": prb_5g_after,
    "RTT_5G_before_ms": rtt_5g,
    "RTT_5G_after_ms": rtt_5g_after,
```

```

"RSSI_WiFi_dBm": rssi_wifi,
"SNR_WiFi_dB": snr_wifi,
"Util_WiFi_before_%": util_wifi,
"Util_WiFi_after_%": util_wifi_after,
"RTT_WiFi_before_ms": rtt_wifi,
"RTT_WiFi_after_ms": rtt_wifi_after,
"QoE_5G_before": q5g_before,
"QoE_5G_after": q5g_after,
"QoE_WiFi_before": qwf_before,
"QoE_WiFi_after": qwf_after,
"Steer_share": steer_share,
"QoE_avg_before": q_avg_before,
"QoE_avg_after": q_avg_after
})

out_dir = Path("/mnt/data")
csv_path = out_dir/"UB_peak_offloading_sim.csv"
df.to_csv(csv_path, index=False)

display_dataframe_to_user("UB Peak-Hour Offloading Simulation (first 150 rows)", df.head(150))

# Charts: each as a standalone plot, no explicit colors
plt.figure(figsize=(10,4))
plt.plot(t, prb_5g, label="5G PRB before (%)")
plt.plot(t, prb_5g_after, label="5G PRB after (%)")
plt.title("5G PRB Load: Before vs After Offloading")
plt.xlabel("Time (s)")
plt.ylabel("PRB (%)")
plt.legend()
img1 = out_dir/"ub_5g_prb_before_after.png"
plt.tight_layout()
plt.savefig(img1, dpi=150)
plt.close()

plt.figure(figsize=(10,4))
plt.plot(t, util_wifi, label="Wi-Fi Util before (%)")
plt.plot(t, util_wifi_after, label="Wi-Fi Util after (%)")
plt.title("Wi-Fi Channel Utilization: Before vs After Offloading")
plt.xlabel("Time (s)")
plt.ylabel("Utilization (%)")
plt.legend()
img2 = out_dir/"ub_wifi_util_before_after.png"
plt.tight_layout()
plt.savefig(img2, dpi=150)
plt.close()

plt.figure(figsize=(10,4))
plt.plot(t, q_avg_before, label="Avg QoE before")
plt.plot(t, q_avg_after, label="Avg QoE after")
plt.title("Average QoE Over Time (Downtown UB Peak)")
plt.xlabel("Time (s)")
plt.ylabel("QoE (0..1)")
plt.legend()

```

```

img3 = out_dir/"ub_qoe_over_time.png"
plt.tight_layout()
plt.savefig(img3, dpi=150)
plt.close()

plt.figure(figsize=(10,4))
plt.plot(t, 100*steer_share, label="Steering share (%)")
plt.title("Share of UEs Offloaded to Wi-Fi")
plt.xlabel("Time (s)")
plt.ylabel("Percent of UEs (%)")
plt.legend()
img4 = out_dir/"ub_steering_share.png"
plt.tight_layout()
plt.savefig(img4, dpi=150)
plt.close()

summary, str(csv_path), str(img1), str(img2), str(img3), str(img4)

```

Хавсралт 6

Задлан шинжилгээ хийж үзвэл:

```
import pandas as pd

# Data for the comparison table
data = {
    "Vendor": [
        "Huawei i-WiFi Offloading",
        "Ericsson Wi-Fi Offload",
        "Nokia Smart Wi-Fi",
        "Cisco Wi-Fi Offload / Hotspot 2.0"
    ],
    "Architecture": [
        "EPC: ePDG + AAA + HSS + PCRF; 5GC: N3IWF + UPF + PCF + AMF; Huawei CloudCore integration",
        "EPC/5GC Wi-Fi integration; ANDSF + Hotspot 2.0 based control",
        "Cloud Packet Core + NetAct integration for enterprise",
        "EPC/5GC integration; Passpoint (Hotspot 2.0) automation"
    ],
    "Advantages": [
        "Seamless handover (VoWiFi↔VoLTE); CloudPCC policy control; SingleSDB AAA",
        "Strong multivendor interworking; QoE-based offloading policies",
        "Optimized for enterprise/campus; QoS/QoE control",
        "Carrier-grade Wi-Fi expertise; full EAP-SIM/AKA support"
    ],
    "Limitations": [
        "Tightly coupled to Huawei ecosystem (vendor lock-in)",
        "Licensing per-service may increase cost",
        "Focused more on enterprise deployments",
        "Best with Cisco core integration"
    ],
    "Approx. Cost (USD)": [
        "0.5–1 M",
        "0.6–1.2 M",
        "0.4–0.9 M",
        "0.5–1 M"
    ]
}

# Create DataFrame
df = pd.DataFrame(data)

# Save to Excel
file_path = "/mnt/data/5G_WiFi_Offloading_Platforms_Comparison.xlsx"
```

```

df.to_excel(file_path, index=False)

file_path
import pandas as pd

# Data for the comparison table
data = {
    "Vendor": [
        "Huawei i-WiFi Offloading",
        "Ericsson Wi-Fi Offload",
        "Nokia Smart Wi-Fi",
        "Cisco Wi-Fi Offload / Hotspot 2.0"
    ],
    "Architecture": [
        "EPC: ePDG + AAA + HSS + PCRF; 5GC: N3IWF + UPF + PCF + AMF; Huawei CloudCore integration",
        "EPC/5GC Wi-Fi integration; ANDSF + Hotspot 2.0 based control",
        "Cloud Packet Core + NetAct integration for enterprise",
        "EPC/5GC integration; Passpoint (Hotspot 2.0) automation"
    ],
    "Advantages": [
        "Seamless handover (VoWiFi↔VoLTE); CloudPCC policy control; SingleSDB AAA",
        "Strong multivendor interworking; QoE-based offloading policies",
        "Optimized for enterprise/campus; QoS/QoE control",
        "Carrier-grade Wi-Fi expertise; full EAP-SIM/AKA support"
    ],
    "Limitations": [
        "Tightly coupled to Huawei ecosystem (vendor lock-in)",
        "Licensing per-service may increase cost",
        "Focused more on enterprise deployments",
        "Best with Cisco core integration"
    ]
}

```

```

],
  "Approx. Cost (USD)": [
    "0.5–1 M",
    "0.6–1.2 M",
    "0.4–0.9 M",
    "0.5–1 M"
  ]
}

# Create DataFrame
df = pd.DataFrame(data)

# Save to Excel
file_path = "/mnt/data/5G_WiFi_Offloading_Platforms_Comparison.xlsx"
df.to_excel(file_path, index=False)

file_path

Result

'/mnt/data/5G_WiFi_Offloading_Platforms_Comparison.xlsx'

```

Хавсралт 7

```
# Regenerate the diagram with simple arrows to avoid oversized arrowheads.
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.patches import FancyBboxPatch
import matplotlib.lines as mlines
fig, ax = plt.subplots(figsize=(16, 10))
def box(x, y, w, h, text, fc='white', ec='black', lw=1.5):
    r = FancyBboxPatch((x, y), w, h, boxstyle="round,pad=0.02,rounding_size=0.02",
        linewidth=lw, edgecolor=ec, facecolor=fc)
    ax.add_patch(r)
    ax.text(x + w/2, y + h/2, text, ha='center', va='center', fontsize=10, wrap=True)
    return r
def arrow(x1, y1, x2, y2, text=None):
    ax.annotate("", xy=(x2, y2), xytext=(x1, y1),
        arrowprops=dict(arrowstyle='->', lw=1.4))
    if text:
        ax.text((x1+x2)/2, (y1+y2)/2 + 0.02, text, ha='center', va='bottom', fontsize=9)
# Common
ue = box(0.08, 0.82, 0.18, 0.09, "UE (Гар умач)\n5G/4G смартфон")
ap = box(0.32, 0.82, 0.22, 0.09, "Wi-Fi AP/AC\n(Hotspot 2.0 / Passpoint)")
arrow(0.08+0.18, 0.865, 0.32, 0.865, "802.11 + EAP-SIM/AKA / EAP-TLS")
# EPC cluster
box(0.02, 0.62, 0.46, 0.17, "EPC (4G) Offload зам", fc='#f8faff', ec='#c5d0ff')
epdg = box(0.06, 0.64, 0.16, 0.09, "ePDG\n(Untrusted WLAN gateway)")
aaa = box(0.25, 0.64, 0.17, 0.09, "AAA / SingleSDB\n(Гэрчилгэээжүүлэлт)")
hss = box(0.47, 0.64, 0.16, 0.09, "HSS (Захиалагч өгөгдөл)")
pgw = box(0.14, 0.50, 0.18, 0.09, "P-GW\n(PDN Gateway)")
pcrf = box(0.36, 0.50, 0.18, 0.09, "PCRF\n(Policy/Charging)")
ims = box(0.08, 0.36, 0.22, 0.09, "IMS (VoWiFi/VoLTE)")
internet = box(0.36, 0.36, 0.18, 0.09, "Интернэт / Services")
arrow(0.32+0.22, 0.865, 0.06, 0.685, "SWu (IPsec/IKEv2)")
arrow(0.06+0.16, 0.685, 0.25, 0.685, "SWm (Diameter)")
arrow(0.25+0.17, 0.685, 0.47, 0.685, "Cx/DIAMETER")
arrow(0.06+0.08, 0.64, 0.14+0.09, 0.50+0.09, "S2b (GTP/PMIP)")
arrow(0.14+0.18, 0.545, 0.36, 0.545, "Gx (PCC)")
arrow(0.14+0.09, 0.50, 0.08+0.11, 0.36+0.09, "")
arrow(0.14+0.18, 0.50+0.045, 0.36, 0.36+0.045, "SGi/N6")
# 5GC cluster
box(0.54, 0.62, 0.44, 0.17, "5GC (5G) Offload зам", fc='#f7fff8', ec='#c9e7c9')
n3iwf = box(0.56, 0.64, 0.18, 0.09, "N3IWF\n(Untrusted WLAN interworking)")
amf = box(0.78, 0.68, 0.16, 0.08, "AMF\n(Control)")
smf = box(0.78, 0.58, 0.16, 0.08, "SMF\n(Session Mgmt)")
upf = box(0.70, 0.50, 0.18, 0.09, "UPF\n(User Plane)")
pcf = box(0.92, 0.62, 0.10, 0.09, "PCF\n(Policy)")
```



```

ausf = box(0.92, 0.50, 0.10, 0.09, "AUSF/UDM\n(Auth+Subs)")
ims5g = box(0.62, 0.36, 0.22, 0.09, "IMS (VoNR/VoWiFi)")
internet5g = box(0.88, 0.36, 0.10, 0.09, "Интернэт")
arrow(0.32+0.22, 0.865, 0.56, 0.685, "NWu (IPsec/IKEv2)")
arrow(0.56+0.18, 0.685, 0.78, 0.68+0.04, "N2/N1")
arrow(0.56+0.12, 0.64, 0.70+0.09, 0.50+0.09, "N3")
arrow(0.78+0.08, 0.58+0.04, 0.70+0.18, 0.50+0.045, "N4")
arrow(0.78+0.16, 0.68+0.04, 0.92, 0.62+0.045, "")
arrow(0.78+0.16, 0.58+0.04, 0.92, 0.50+0.045, "NAusf/Nudm")
arrow(0.70+0.09, 0.50, 0.62+0.11, 0.36+0.09, "")
arrow(0.70+0.18, 0.50+0.045, 0.88, 0.36+0.045, "N6")

ax.text(0.70, 0.80, "ATSSS (Rel-16): 5G NR + Wi-Fi\nЧуулүүлэх/Шилжүүлэх/Хуваах", fontsize=10,
ha='center', va='center')
gnb = box(0.76, 0.82, 0.20, 0.09, "5G NR gNB\n(3GPP Access)")
arrow(0.76+0.10, 0.82, 0.78+0.08, 0.68+0.08, "")
ax.text(0.33, 0.92, "Discovery: ANDSF / Hotspot 2.0 (Passpoint)\nБодлого: PCRF/PCF, QoS/QoE",
fontsize=9, ha='left')
ax.set_xlim(0, 1)
ax.set_ylim(0.25, 1.0)
ax.axis('off')
ax.set_title("Huawei i-WiFi Offloading – Conceptual Architecture (EPC & 5GC)", fontsize=14)
outpath = "/mnt/data/huawei_i_wifi_offloading_architecture_v2.png"
plt.savefig(outpath, dpi=200, bbox_inches='tight')
outpath
Үр дүн: '/mnt/data/huawei_i_wifi_offloading_architecture_v2.png'

```