

Блоклон нурааж олборлох уурхайн зарим сорилтуудыг шийдвэрлэх нь

Ярослав Якубек ^{a,*}

^a SRK Consulting, Канад улс

Товч хураангуй

Өнгөрсөн 100 гаруй жилд далд уурхайд нураан олборлолтын (Cave mining methods) төрөл бүрийн арга хэлбэрийг ашиглаж иржээ. Энэхүү аргыг нэвтрүүлснээс хойш уул уурхайн инженерүүд, практик дээр ажиллаж буй мэргэжилтнүүд түүний аюулгүй байдал, эдийн засгийн үр өгөөж, үр ашиг, бүтээмжийг дээшлүүлэх чиглэлд тасралтгүй ажилласан. Энэ хугацаанд хүдэр олборлолтод шинэ технологиуд нэвтэрч, уурхайн үйл ажиллагааг урьдчилан таамаглах, хянах систем хөгжихийн хэрээр бид илүү гүнд, илүү хүнд нөхцөлд, илүү өндөр бүтээмжтэй ажилладаг болжээ. Гэсэн хэдий ч энэхүү аялал дандаа дардан байсангүй. Үнэн хэрэгтээ, уурхай тус бүрийн үр дүнг нэг бүрчлэн шүүмжлэлтэйгээр үнэлж үзвэл, ихэнх нь ямар нэг байдлаар хүлээлтэд хүрээгүй байна. Энэхүү өгүүллийн зохиогч уул уурхайн салбарын өнгөрсөн 40 жилийн түүхийг эргэн харж, эдгээр дутагдалтай талуудын зарим шалтгааныг "нураалтын дүрэм" (caving rules) болон өнгөрсөн туршлагад үндэслэн авч үзсэн болно. Мөн уурхайн диазйн, нураалтын процессуудын талаарх өнөөгийн зөрүүтэй байр суурь, эсрэг тэсрэг үзэл бодлыг авч үзэв.

Түлхүүр үгс: нураан олборлох уурхай, нураалтын дүрэм, уурхайн дизайн, нураалтын процесс

1 Оршил

Нураан олборлох тухай санаа 100 гаруй жилийн өмнө концепци байдлаар тодорхойлогдсон хэдий ч сүүлийн хорин жилд л цөөн хэдэн анхдагч уурхайнуудаас хальж, бодитоор өргөжин тэлсэн байна. Өнөөдөр 5 тивийн 9 улсад байрлах 13 нураан олборлох уурхайд 17 бие даасан блок/панель (Хүснэгт 1) үйлдвэрлэл явуулж буйн зэрэгцээ судалгааны янз бүрийн шатанд байгаа 50 гаруй төсөл (тэдгээрийн зарим нь хэд хэдэн блок, ашиглалтын давхартай) хэрэгжихээр бэлтгэгдэж байна (Зураг 1).

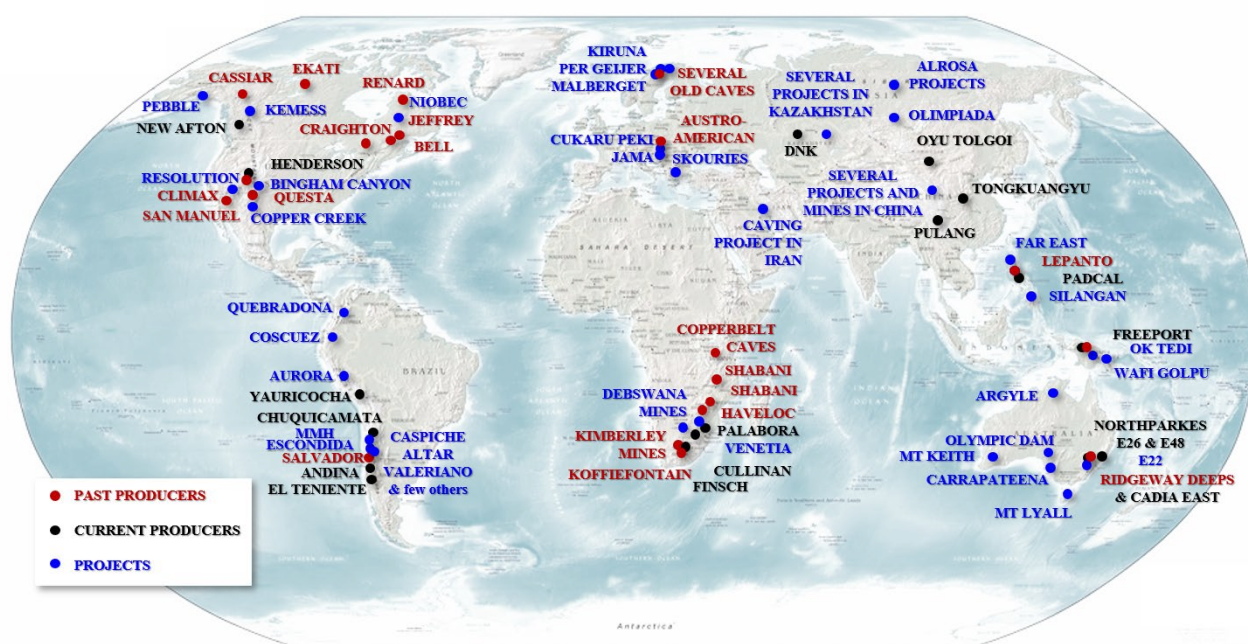
Table 1 2026 оны байдлаар үйлдвэрлэл явуулж буй Блоклон нурааж олборлох болон Панелиар нурааж олборлох уурхайнууд

#	Уурхай	Ашиглалтын блокууд	Улс
1	Кадиа Зүүн	PC1, PC2, PC3	Австрали
2	Нортпарк	E26 Ашиглалтын давхар 1 Хойд	Австрали
3	Шинэ Афтон	C-Zone	Канад
4	Андина	Панел III	Чили
5	Чүкикамата далд уурхай	S01N, S01S Макроблокууд	Чили
6	Эл Тэниентэ	Хэд хэдэн уурхай	Чили
7	Пуланг коппэр	Ашиглалтын давхар 1	Хятад
8	Тонкуанги	Ашиглалтын давхар 530 м	Хятад
9	Гразбэрг	Deep mill level zone, Гразбэрг	Индонези
10	Донский ГОК	DNK Уурхай	Казакстан

* Гол зохиогч.

11	Оюу Толгой	Хойд Хюго Панель 0	Монгол
12	Яурикоча	—	Перу
13	Падкал	760, 798 түвшингүүд	Филиппин
14	Палабора	Ашиглалтын давхар 1 & 2	Өмнөд Африк
15	Пример/Калинан	C-Cut Фаз 1	Өмнөд Африк
16	Хэндэрсон	7210 панелиуд	АНУ

Ил уурхайгаар олборлох боломжтой гадаргууд ойр орших хүдрийн биетүүд шавхагдахын хэрээр өндөр бүтээмжтэйгээр тогтвортой үйл ажиллагаа явуулах боломж олгодог, мөн их хүчин чадлаар олборлолт явуулдаг далд уурхайн бусад аргуудаас харьцангуй хямд үйл ажиллагааны зардал бүхий нураан олборлолтын аргыг нэвтрүүлэх уурхайнуудын тоо нэмэгдэж байна. Ил аргаар ашиглаж байгаад хөрс хуулалтын коэффициент нь хязгаарын утгаа давж, хүдрийн агуулга зардлаа нөхөх боломжгүй болсон хэд хэдэн тохиолдолд ордыг цааш үргэлжлүүлэн ашиглах цорын ганц хувилбараар нураалтын аргыг сонгож байв. Далд уурхай байгуулах явцад л хоосон чулуулаг бага зэрэг хөнддөг, ил уурхайтай харьцуулахад гадаргад эзлэх талбай бага тул байгаль орчны талаасаа ч уг арга илүү дэмжигддэг.



Зураг 1 Өнгөрсөн хугацаанд ажиллаж байсан болон ирээдүйн зарим төслүүдийг багтаасан нураалтын уурхайнууд

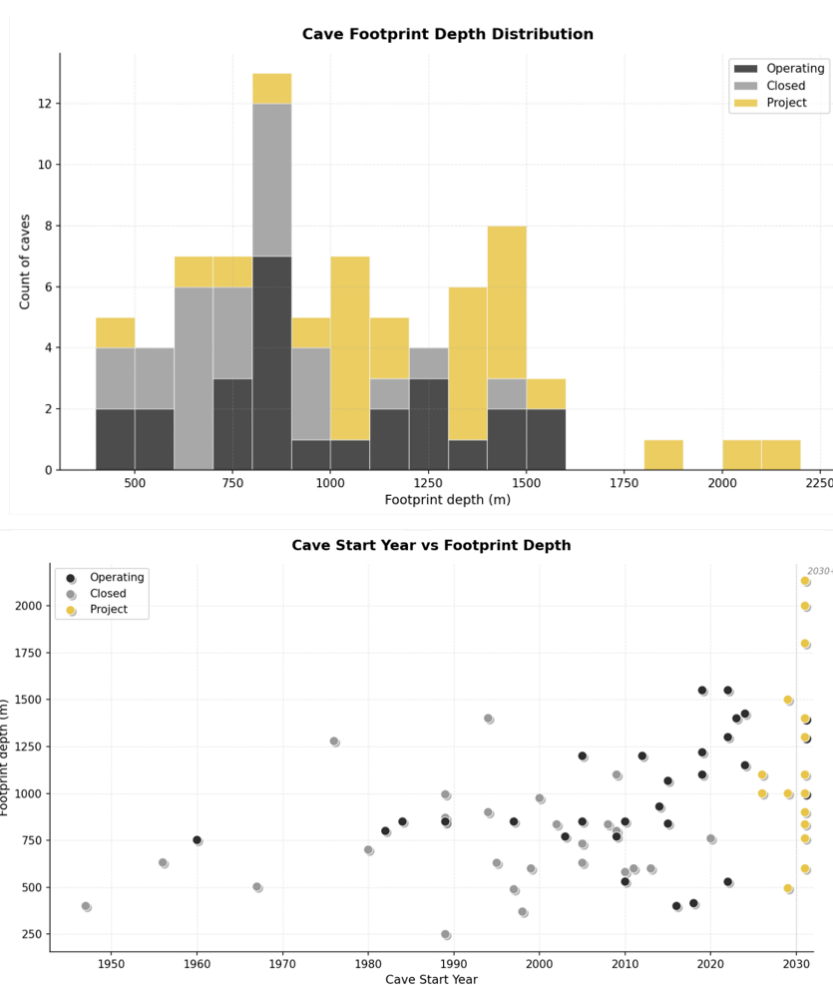
Нураан олборлох аргаар хүдэр олборлож эхлэхээс өмнө газрын гүнд их хэмжээний суурин дэд бүтэц барьж байгуулах шаардлагатай "доороос дээшээ" чиглэлтэй арга тул анхны хөрөнгө оруулалт нэн өндөр. Хүдэр буулгуур тус бүрийн олборлолын хүчин чадал өндөр, нэгж хүдэр буулгуураар буух хүдрийн тоо хэмжээ их байж гэмээнэ уг хөрөнгө оруулалт нөхөгдөж, эдийн засгийн үр ашиг хангагдана. Нураалтын арга ашиглаж буй орчин үеийн хэд хэдэн уурхай хоногт 50,000 тонноос давсан бүтээлтэй ажиллаж байхын зэрэгцээ дараа үеийн "супер уурхайнууд" (Чили улсын Чүкикамата болон Эл Тэниентэгийн Олборлолтын Шинэ түвшин, Монгол улсын Оюу Толгой, Индонезийн Гразбэрг уурхайн цогцолбор, Аризона дахь Резолюшн Коппэр) хоногт 100,000 тонн буюу түүнээс дээш нэрлэсэн хүчин чадалтайгаар төлөвлөгдөж байна. Гэсэн хэдий ч үйл ажиллагаа бодитоор эхлүүлэх супер уурхайнуудын тоо ба өөдрөг таамаглалууд хооронд зөрөө бий.

Нураалтыг эхлүүлсний дараа үйл ажиллагааг хөтлөн явуулахад бус харин эхлүүлэх хүртэлх үе шатуудад гол асуудал, хүндрэлүүд оршиж байна. Анхны судалгаанаас эхлээд анхны бүтээгдэхүүн гаргах хүртэлх хугацаа ихэвчлэн 7-10 жил, заримдаа түүнээс ч урт байдаг. Уурхайн дизайны үзүүлэлтүүдийг бүх талаас нь бүрэн итгэл үнэмшилтэйгээр тогтоож авахаас өмнө уурхай байгуулалтын ажил ихээр хийгдэх

шаардлагатай болдог тул ялангуяа шинэ (greenfield) төслүүдийн хувьд дизайны шийдлүүд нь ирээдүйд гарч болзошгүй өргөн цар хүрээ бүхий үр дагаврыг урьдчилан тооцсон, ямар ч хувилбар нь тулгарахад даван гарах шийдэлтэй, уян хатан байх, богино хугацааны эдийн засгийн оновчлолоос илүүтэйгээр техникийн оновчтой шийдэл хийх хэрэгцээ тулгардаг.

Нураалт хийж буй уурхайнуудын ажлын тоон үзүүлэлтүүд дотор сургамж авах, харамсалтай жишээ их байна. 1990 оноос хойш бүтээн байгуулалт хийгдсэн, ашиглалтад орсон дор хаяж 60 шинэ блок дээр дүн шинжилгээ хийж үзэхэд дийлэнх олонхид нь материаллаг хүндрэлүүд тулгарч, 5 уурхай хугацаанаасаа өмнө хаагдаж, хэд хэдэн уурхайд уулын чулуулгийн даралтын ноцтой асуудал үүссэний улмаас ашиглалтад бэлтгэсэн талбайн томоохон хэсэгт нэвтрэх боломжгүй болсон байна. Үүнд нураалт (collapses), чулуулгийн өөрийн бутлагдлын ширхэглэл тооцсон хэмжээнээс илүү овортой байх (coarser fragmentation), уул уурхайн үйл ажиллагаанаас үүдэлтэй газар хөдлөлт (mining-induced seismicity), шавар халилт/шаврын гэнэтийн үрсгал (mudrushes), бэхэлгээг дутуу тооцох (ground support underestimation), нураалтын суурь зарчмууд алдагдах, ялангуяа огтлогоо хийх дараалал (undercutting sequence) болон буулгалтын менежмент (draw management) алдагдах зэрэг шалтгаанууд дурьдагдаж байна. Эргээд харахад, эдгээр асуудлуудын ихэнхийг урьдчилан таамаглаж, тэдгээрт тохируулан зураг төсөл боловсруулах эсвэл хүдэр буулгуурууд дээрх сахилга батыг хатуу мөрдөх зэргээр урьдчилан сэргийлэх боломжтой байжээ.

Ирээдүйд нураан олборлох арга нь шинэ хил хязгаар руу нэвтрэн орж байна: уулын цул илүү бат бөх, нураалтын багана илүү өндөр, ордууд илүү гүн болж агуулга нь буурч байна (Зураг 2).



Зураг 2 Үйл ажиллагаа явуулж буй болон төлөвлөгдөж буй уурхайнуудын гүн

Резолюшн уурхай 2,100 метрийн гүнд босоо ам нэвтрэж, гүний зэсийн порфирын орд нээснээр энэ төрлийн уурхайн хувьд хамгийн гүнд хүрч, шинэ хязгаар тогтоогоод байна. Ирээдүйн өндөр

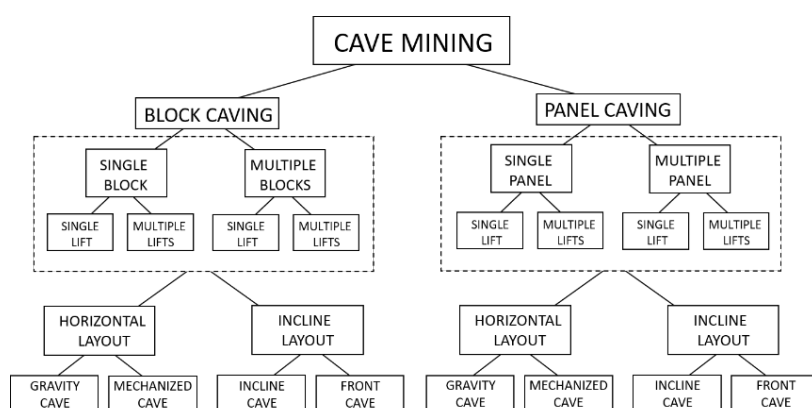
автоматжуулсан уурхайнууд газрын дор 50-иас 60 хүний хүчээр хоногт 100,000 тонноос илүү хүчин чадалд хүрэх төлөв харагдаж байна. Өрөмдлөгийн нарийвчлал, тэсрэх бодис, бэхэлгээ, хяналт-мониторинг, багаж хэрэгсэл, хөдлөх бүрэлдэхүүний цахилгаанжилт зэрэгт гарч буй тасралтгүй ахиц дэвшилүүд ирээдүйг өөдрөгөөр харах боломж олгож байна. Ирээдүйд нураан олборлох уурхайнуудын өнгө төрхийг тодорхойлох тулгамдсан асуудлууд мөн тодрон гарч ирж байна: үүнд уурхайн гүн нэмэгдэх ба түүнийг дагаж үүсэх уулын даралт (стресс), температур болон сейсмик идэвхжил; агуулга бага бөгөөд бохирдол өндөртэй хүдрийн биетүүд; бат бэх өндөртэй уулын цулын нурах үзүүлэлт (caveability) болон чулуулгийг урьдчилан бэлтгэх ажлын үүрэг оролцоо; гадаргуугийн суултын эргэн тойрон дахь нийгмийн болон хууль эрх зүйн өсөн нэмэгдэж буй дарамт; уурхайн хаалтын зардал өсөх асуудал; түүнчлэн цаг уурын өөрчлөлтөөс үүдэлтэй хүчтэй шуурга, уурхайн үер, лаг шаврын үрсгал зэрэг гидрологийн эрсдэлүүдийг дурьдаж болно.

Энэхүү өгүүлэл ирээдүйн чиг хандлагыг түр хойш тавьж, зуу гаруй жилийн турш хуримтлуулсан мэдлэг, сүүлийн арван жилийн хугацаанд гарсан технологийн хурдацтай ахиц дэвшил байсаар атал нураалт хийж буй орчин үеийн уурхайнуудын бодит гүйцэтгэл яагаад ийн олонтаа хүлээлтээс хоцорч байгаа шалтгааныг хөндөж байна. Ялангуяа өнгөрсөн хугацаанд хамгийн хөнөөл бүхий сүйрэлүүдээс уурхайчдыг хамгаалж ирсэн “нураалтын дүрэм – saving rules” -ийг эргэн харж, уурхайн дизайны болон нураалтын процессийн асуудал дээр өнөөгийн практик хаана зөрж байгааг шалгаж, дараа үеийн нураалтын инженерүүд юуг хадгалж үлдэх, юуг сорих, хаана инженер хүний мэргэжлийн шийдвэр загварчлалын дээр тавигдах ёстой вэ гэдэг дээр өөрийн байр суурийг илэрхийлж байна.

2 Нураан олборлох аргын хувьсал

Нураан олборлох арга нь өнгөрсөн хэдэн арван жилийн туршид эхэн үеийн блоклон нураах аргаас гриззли (grizzly), слушер (slusher) аргуудыг дамжин хувьсаж, орчин үеийн механикжуулсан масс олборлолт хүртэл хөгжиж ирсэн. Олборлолт, хүдэр буулгалтын хяналт (draw control), таамаглал, мониторингийн чиглэлд технологийн дэвшлүүд гарсан байна.

Нураан олборлох уурхайн дизайн хэд хэдэн чиглэлд хуваагдан төрөлжсөн бөгөөд ямар шалгуурыг гол болгон авч үзэж байгаагаас хамааран хэд хэдэн ангилал схем хэрэглэж болно. Үндсэн хувилбаруудад панелийн ба блоклон нураах аргууд, ганц ба олон тооны блок/панель, ашиглалтын ганц ба олон давхар (lifts), хэвтээ ба налуу зохион байгуулалт, хүндийн хүчний ба механикжуулсан олборлолт (Зураг 3), нураалтыг эхлүүлэх болон тогтвортой хадгалахад хөндлөнгөөс ямар хэмжээнд оролцох (үүнд ердийн нураалтаас эхлээд урьдчилсан бэлтгэл ажил, улмаар бүрэн дэмжлэгтэй нураалт хүртэлх үе шатууд хамаарна) зэрэг багтдаг байна.



Зураг 3 Нураан олборлох уурхайн хувилбарууд (Якубек 2023)

Дээрх ангиллаас гадна уулын цулын нөхцөл олборлох арга сонгоход хүчтэй нөлөө үзүүлдэг. Өнгөрсөн хугацаанд цөөнгүй уурхай (ялангуяа алмаз болон асбестос олборлолт) сул, шахагдмал (squeezing) чулуулагт олборлолт явуулжээ. Хожим үеийн Зүүн Кадиа болон зэсийн анхдагч порфирийн орд

ашиглаж буй Коделкогийн зарим уурхайнууд маш бат бөх, компентент чулуулгийн массив руу нэвтэрч байна. Гүехэн уурхайнуудын нураалт ихэвчлэн гравитацийн нөлөөн дор явагддаг бол гүний, бат бөх чулуулаг бүхий уурхайнуудынх уулын даралтын нөлөөн дор (stress-driven) явагдах тул уул уурхайн үйл ажиллагаанаас үүдэлтэй чичирхийллийн асуудал нэн тэргүүнд тавигддаг. Их гүнд сул уулын цүлд үйл ажиллагаа явуулах далд уурхайн хувьд дизайны өөр шийдлүүд шаардагддаг. Хүдрийн биет бүр өөрийн өвөрмөц шинж чанар, хязгаарлах үзүүлэлтүүдтэй байх тул уурхайн дизайн нь тодорхой хэмжээгээр тухайн талбайн онцлогийг харгалзсан (site specific) байдаг. Хүдрийн биетийн талаархи мэдлэг (геологи, структур, болон геотехникийн) нь уурхайн дизайныг найдвартай гаргах, түүнд үнэлгээ хийх суурь хүчин зүйл хэвээр байна.

Нураалт хийх уурхайг өргөтгөх (Webster et al. 2020), өмнө нь нураалт явуулсан уурхайг дахин нээх зэрэг тусгай асуудлууд байдаг гэдгийг мөн дурьдах нь зүйтэй.

Нураан олборлох аргуудын хувилбаруудыг бүрэн тодорхойлох асуудал энэхүү өгүүллийн хүрээнээс хальж буй тул цаашид дэлгэрүүлсэнгүй. Орчин үеийн олборлолтод зонхилж буй хэвтээ олборлолтын түвшин ба налуу олборлолтын түвшин бүхий панель ба блок нураалт гэсэн гурван аргыг цаашид үргэлжлүүлэн авч үзнэ.

Ойролцоогоор 1990-ээд он хүртэл ихэнх нураалтууд сул чанарын чулуулалт гравитацийн аргуудыг (гризли, скрепер эсвэл налуу зохион байгуулалт) ашиглан хийгддэг байсныг эргэн санах нь зүйтэй. Эдгээр ажиллагаанууд нь гар ажиллагаа ихтэй бөгөөд ажиллах хүчнийг орчин үеийн механикжуулсан уурхайнуудаас илүү өндөр эрсдэлд оруулдаг байв. Бизнесийн зорилгоор олборлолт явуулж байсан гравитацийн технологи бүхий хамгийн сүүлийн уурхай болох Кимберли уурхай хүний амь эрсэдсэн шавар халилтын улмаас энэ жил хаагдсан.

2.1 Панелиар нурааж олборлох арга: олборлолтын хэвтээ түвшинтэй

Панелиар нураах нь хүдрийн биетийг хэд хэдэн параллель панелиудад хувааж, үе шаттайгаар огтлогоо хийж, нураадаг арга юм. Амжилттай хэрэгжсэн жишээнүүдэд Колорадо дахь Henderson уурхай болон Чили дэх El Teniente уурхай багтана. Ийш ажиллагааны нийтлэг шинж чанар нь панелийн өндөр харьцангуй хязгаарлагдмал, ихэвчлэн 200 метрээс бага байдаг.

Панелиар нурааж олборлох арга нь том олборлолтод өртөх талбайтай (large footprints) хүдрийн биетүүдэд хамгийн сайн тохирно. Олборлолтод өртөх талбайг панель болгон хуваах бөгөөд панелийн үрт нь блокийн өндрөөс их байна. Огтлогоог (undercut) эхнээс нь бүх талбайн хэмжээнд нэгэн зэрэг явуулдаггүй; үүний оронд нэг панель эсвэл зурвасыг огтолж, нурах боломжийг олгодог бөгөөд огтлогоо нь хүдэр буулгуурын юүлүүр (drawbell) барих болон ашиглалтад оруулах хурдтай уялдан панелийн уртын дагуу тасралтгүй урагшилдаг. Үйлдвэрлэлийн хүчин чадал нь талбайн өргөн, баганын өндөр, огтлогооны урагшлах хурдаар тодорхойлогдоно. Нураалт урагшлах тусам хүдэр-хаягдлын зааг гадаргууг (ore-waste interface) налуу байдалтай барихын тулд хүдэр буулгалтыг нарийн хянах шаардлагатай.

van As & Guest (2020) нарын тэмдэглэснээр, "блок нураалт" (block caving) гэсэн нэр томъёог өнөөдөр блок болон панель нураалтыг хольж ерөнхий нэршил болгон буруу ашиглаж байгаа нь зураг төсөлд ч сөрөг нөлөө үзүүлж байна: энэ хоёр нь нураалт гэх нэг бүлд багтах хувилбарууд боловч тэдгээрийн хөгжүүлэлтийн дараалал болон үйлдвэрлэлийн философи нь зарчмын хувьд огт өөр юм.

Маш том хүдрийн биетүүдэд олборлолт явуулах талбайн түвшинг ихэвчлэн өндөр агуулгатай эрдэсжилтийн сууринд байрлуулдаг бөгөөд энэ нь блокийн өндрийг маш өндөр (ихэвчлэн 400 метрээс дээш) байхаас өөр аргагүйд хүргэдэг. Төвөгшлийг бууруулах, дэд бүтцийн зардал бууруулах талаасаа ашиглалтын олон давхар бүхий комплекс уурхай барихын оронд ганцхан маш өндөр баганатай панелийн дизайн гаргах хүсэл сонирхлыг ойлгож болох хэдий ч ингэснээр хийцийн тодорхой хүндрэлүүдийг мөн бий болгодог: үүнд ширгэсэн болон шинээр ашиглалтад орсон хүдэр буулгуур хоорондын буулгалтын зөрүү (олборлолтын хүчин чадлын муруйгаар илэрхийлэгддэг) маш их; нураалтын фронтын өнцөг хэт эгц; төлөвлөсөн хүдрийн хэмжээ их; эдгээрийн улмаас огтолгооны (хүрч болох) хурд удаан.

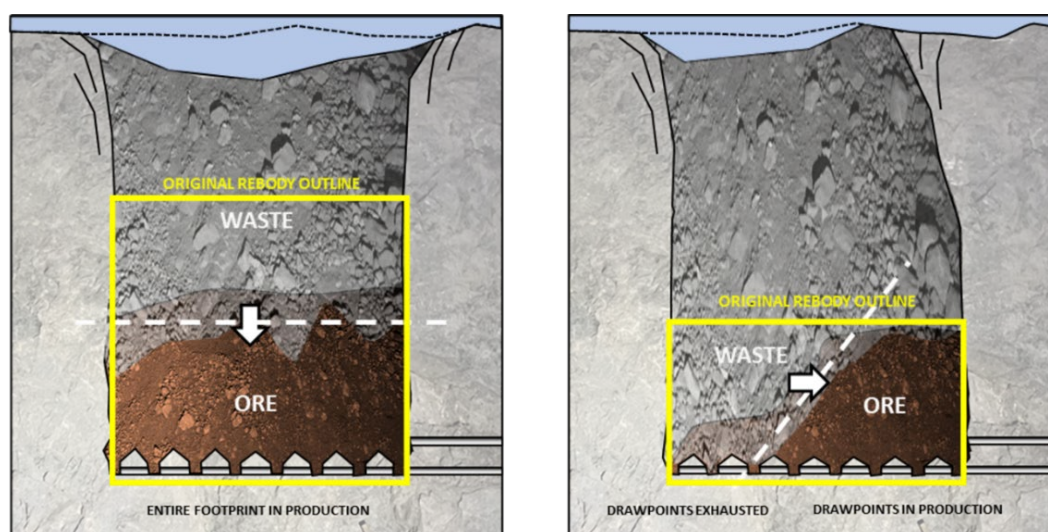
Өндөр баганатай панель нураалтын гол эрсдэлүүдийг van As & Guest (2020) нар тодорхойлохдоо: тогтворгүй, хяналтгүй нураалт, нураалт гацах (cave stall), нураалтын арын жигд бус геометр болон нураагүй шаантаг хэлбэрийн хэсгүүдэд хүдэр алдагдах, түүнчлэн уул уурхайн үйл ажиллагаанаас үүдэлтэй томоохон газар хөдлөлт болон чулуулгийн тэсрэлт (rock bursts) үүсэх магадлал өндөр байдаг гэжээ.

2.2 Блоклон нурааж олборлох арга: олборлолтын хэвтээ түвшинтэй

Блоклон нурааж олборлох арга нь олборлолтод өртөх талбайг бүхэлд нь огтлогоо хийж, бүх хүдэр буулгуураас нэгэн зэрэг, харилцан уялдаатайгаар олборлолт явуулдаг арга юм. Блокийн өндрийг ихэвчлэн ашиглалтын нөхцөл байдал (хүдрийн биетийн геометр, чулуулгийн массивын бат бөх чанар, бутлагдах чадвар, хүдэр буулгуурын элэгдэл гэх мэт) тодорхойлох бөгөөд ихэнх тохиолдолд олборлолт явуулах талбайн уртаас их байдаг.

Олборлолтын нэг талбайтай (single footprint) уурхайн жишээнд Нортпаркс E26 болон E48, Рижвэй Дийпс, Палабора, болон Финсч, Кимберли уурхайнууд, Koffiefontein зэрэг хэд хэдэн алмазын уурхайнууд багтана. Олборлолтын олон талбайтай болон ашиглалтын олон давхартай уурхайн жишээнд Калинин алмазын уурхай, маш өндөр ашиглалтын давхар бүхий Зүүн Кадиа, болон саяхан ашиглалтад орсон, макроблок загвар ашигладаг Чүкикамата уурхай багтана (Flores & Catalan 2019).

Гадаргуу руу цөмрөлт үүсэхээс өмнө нураалтын тархалтыг хянах, мөн буулгалтын бүсүүдийн харилцан үйлчлэлийг дэмжих үүднээс уурхайн талбайн хэмжээнд олборлолтын буулгалтыг харьцангуй жигд авч явдаг, ингэснээр уулын цулын урсгалыг зохицуулж, бохирдол орж ирэхээс сэргийлэх давуу тал олгодог. Блоклон нураалтын мөн нэг давуу тал нь материал тээвэрлэлт болон агааржуулалтын дэд бүтцийг олборлолтод өртөх талбайн гадна байрлуулж, хамгийн өндөр даралттай бүсээс холдуулах боломжтой байдагт оршино.



Зураг 4 Панелиар нурааж олборлох болон блоклон нурааж олборлох аргуудын ялгаа

2.3 Налуулан нураан олборлох арга

Хүдэр буулгах цэгүүдийг налуу хавтгай дээр эгнээ эгнээгээр нь байгуулж олборлолт явуулахыг "Налуулан нураах схем" (incline cave layout) -ээр ашиглах гэж нэрлэдэг. Налуу хавтгай дахь хүдэр буулгах цэгүүд хоорондын зайг (нэг эгнээ доторх болон дэд түвшин хооронд) буулгалтын бүс (full

drawzone interaction) хоорондоо бүрэн харилцан үйлчилж байхаар тооцож, олборлолтын хэвтээ түвшинтэй ашиглалтын аргатай ижил аргачлалаар тогтоодог.

Дэд түвшин үүсгэж байгаа схем нь зураг дээр тун төстэй харагддаг ч налуулан нураан олборлолтын хүдэр буулгах арга, харилцан үйлчлэл нь дэд давхаргаар нураах (SLC) олборлолтын аргаас зарчмын хувьд огт өөр юм (Jakubec & Laubscher 2012).

Хүдрийн биетийн хэлбэр хэмжээс ба түүнээс хамаарах тогтворжилтын хэрэгцээ шаардлагыг харгалзан налуугийн өнцгийг тодорхойлдог. Цилиндр хэлбэртэй босоо кимберлитийн хоолой төрлийн ордод ашиглах налуу нь эгц налуу уналтай хавтан хэлбэрийн хүдрийн биетэд ашиглах налууугаас өөр байна.

Якубец болон Лаубшер (Jakubec & Laubscher, 2012) нарын үзэж байгаагаар олборлолтын хэвтээ түвшинтэй аргатай харьцуулахад налуулан нураан олборлох схем нь: засвар үйлчилгээ хийх, овор хэтэрсэн хүдрийг тэсэлж бутлахад илүү уян хатан, малталтууд структурын хувьд илүү бат бэх, уурхайн үс болон нойтон хүдрийг (wet tuck) илүү хялбар зайлуулах зэрэг давуу талуудтай. Дутагдалтай талуудаас дурдвал: уурхай байгуулалтын ажлын анхны хөрөнгө оруулалт өндөр, олон дэд түвшинд хүдэр олборлолт явах тул хяналт удирдлага талаас илүү өндөр шаардлага тавигддаг; цахилгаан ачигч-тээвэрлэгч (LHD) машин ашиглахад тийм ч тохиромжтой биш байдаг.

Налуулан нураах аргын санааг анх Янелид (Janelid, 1975) дэвшүүлж, албан ёсоор патентжуулсан. Практик дээр Швед, АНУ, Канад, Зимбабве, Өмнөд Африк улсуудад ашигласан. Налуулан нураах аргыг хамгийн сүүлд 2020 онд Экати (Ekati) уурхайд амжилттай нэвтрүүлсэн (Jakubec & Woodward 2020).

2.4 Фронтээр нураан олборлох арга

Фронтээр нураан олборлох арга (front caving) нь блокоор нураах аргын зайг шахаж ойртуулан өөрчилсөн хувилбар бөгөөд огтолгооны болон олборлолтын түвшнүүд босоо чиглэлд маш ойрхон (ихэвчлэн ердөө 12-15 метрийн зайтай) байрладаг ба огтолгоог олборлолтын талбайг бүхэлд нь хамруулан нэг дор хийхгүй, харьцангуй нарийн босоо блокуудыг дэс дарааллан огтлох байдлаар нураалтын фронтыг ахиулдаг. Дээд түвшинд огтолгооны ажил гүйцэтгэж, доод түвшинд хүдэр буулгуурууд байгуулж, олборлолт явагдана.

Ийнхүү орон зайн зайг шахаж өгснөөр нэгж блокийн огтлогоог хийх ба тухайн блокийн хүдэр буулгууруудыг ашиглалтанд оруулах ажил хоорондын хугацааг багасгаж, уулын цул дахь хэсэгхээн босоо орон зайд уулын өндөр даралттай бүсийг хязгаарлан удирдах боломж бүрддэг. Схемийн хувьд фронтын нураалт нь дэд давхаргаар нураах (sublevel cave) аргатай төсөөтэй харагдаж болох ч огтолгоогоор өдөөгддөг, хүндийн хүчний нөлөөгөөр буудаг, олборлолтын түвшинг бүхэлд нь хамарсан хүдэр буулгуурууд дахь хүдэр авалтын харилцан үйлчлэлд тулгуурласан олборлолт явагддаг тул блокийн нураалтын (block cave) төрөлдөө хамрагддаг. 37 дугаар түвшинээс дээшхи түвшингүүдэд дэд давхаргаар агуйлан нураах арга ашиглаж байгаа бөгөөд түүнээс доошхи түвшингүүд дэх блокуудыг ашиглах боломж бүрдүүлэхийн тулд Koffiefontein уурхайд фронтээр нураах арга нэвтрүүлснээр нэг ордод хоёр өөр ашиглалтын технологи зэрэгцэн хэрэгжсэн (Hannweg нар. 2004).

Олборлолтын хэвтээ түвшин бүхий уламжлалт блоклон нураах аргатай харьцуулахад, фронтээр нураах схемийн (front caving layout) огтолгооны ажил дуусах ба хүдэр буулгуур ашиглалтад оруулах хоорондын уурхайн бэлтгэл ажлын хугацаа богино; дээд талд орших багавтар өндөртэй блокийг авах явцдаа дорхи илүү гүн блокийг олборлох практик давуу тал олгодог; мөн бүтэн блоклон нураах арга зохимжгүй нарийн хүдрийн биет болон ангилан ялгаж олборлолт явуулах шаардлагатай хүдрийн биетүүдийг олборлоход илүү уян хатан ажиллах боломж олгодог.

Маш нарийн чанд сахилга бат, хяналтын дор хүдэр буулгалт явуулах шаардлагатай; уурхайн бэлтгэл малталт явуулах орон зай илүү хязгаарлагдмал байдаг тул нөхцөл байдал зураг төслөөс зөрөх тохиолдолд инженерийн шугам сүлжээ, дагалдах дэд бүтцэд өөрчлөлт оруулахад уян хатан байдал бага; мөн алмазаас бус ашигт малтмал олборлолтод ашигласан практик туршлага, түүхэн мэдээлэл хязгаарлагдмал байдаг зэрэг сул талуудтай.

Фронтээр агуйлан нураах аргыг Өмнөд Африкийн Koffiefontein уурхайд илүү иж бүрэн нэвтрүүлсэн гэж үзэж болох бөгөөд 100м босоо блокуудад хуваасан олборлолтын түвшингүүдэд ашиглалт явуулдаг.

2.5 Өгсөөн нураах

ЛКАВ компани болон Леобений уул уурхайн их сургуулийн (Montanuniversität Leoben) хамтын ажиллагааны үр дүнд бий болсон гибрид шинэ арга болох өгсөөн нураах арга маш их гүнд, бат бэх чулуулгийн массивт нураалт хийх үеийн гол бэрхшээл болох үйлдвэрлэлийн дэд бүтцэд үүсэх уулын даралт болон сейсмийн нөлөөллийг удирдах асуудлыг шийдвэрлэсэн. Блокийг улаар нь огтлож хүндийн хүчний нөлөөгөөр олборлолт явуулдаг уламжлалт нураалтын элементүүдийг өгсөөн олборлох үеийн уулын даралтыг идэвхтэй удирдах логиктой хослуулдаг. Энэхүү аргыг Ладиниг (Ladinig et al. 2022a, 2022b), Карлссон (Karlsson et al. 2022) болон Гамс (Gams, 2023) нарын цуврал өгүүлэлд албан ёсоор дэвшүүлж, тодорхойлсон байдаг.

Уг арга хоёр үе шаттайгаар хэрэгждэг. Уулын даралтаас чөлөөлөх (de-stressing) үе шатанд зөвшөөрөгдөх хамгийн минимум бэхлэгээтэйгээр нэвтэрсэн босоо өгсөөх малтлагуудаас (raises) томоохон камерууд (slots) урьдчилан нэвтэрдэг. Эдгээр камерууд уулын даралтын магнитудыг хянах, агуй үүсэх үйл явц хяналтаас гарч тааз талын уулын цул уруу нэвтрэхээс сэргийлэх давхар үүрэг бүхий томоохон хэмжээний цул тулгуур багануудаар өөр хоорондоо тусгаарлагдана. Камеруудын орчимд "уулын даралтын нөмөр" (stress shadows) үүсэж, хөрш зэргэлдээх уулын цулыг уулын даралтаас чөлөөлдөг. Олборлолтын үе шатанд, үйлдвэрлэлийн дэд бүтцийг (хүдэр буулгах цэгүүд, штрэкүүд болон хүдэр тээвэрлэлт) уг уулын даралтын нөмөрт байгуулах бөгөөд хүдэр олборлолт уулын даралтаас чөлөөлөгдсөн бүсэд явагдана. Ашиглалтын явцад уулын даралт эргэн нэмэгдэж тулгуур багануудыг эвдэх бөгөөд нурсан тулгуур багануудыг шат дараатайгаар олборлосноор тааз талын уулын цул өөрөө нурах үйл явц эхэлнэ.

Хүдрийн биетийн хэлбэр хэмжээс, гүн, уулын цулын шинж чанар нь уламжлалт дэд давхаргаар агуйлан нураах арга хэрэглэхэд улам бүр хүнд болж ирж буй Шведийн умард нутаг дахь Кируна төмрийн хүдрийн уурхайд эхний туршилт хийгдэж байна. Энэхүү өгүүлэл бичигдэж байх цаг мөчид үйлдвэрлэлийн болон арилжааны хэмжээнд өгсөөн нураах аргыг хараахан нэвтрүүлж амжаагүй байна. Иймд уг аргыг уурхайн практикт бүрэн нэвтэрсэн технологи гэхээсээ илүүтэйгээр туршигдаж буй хөгжүүлэлтийн шатны концепци гэж ойлгох нь зүйтэй.

2.6 Босоо тогоолон нураалтын тусламжтай нураан олборлох арга

Босоо тогоолон нураалтын тусламжтай нураан олборлох арга (VCR-assisted caving) нь блокоор нураах аргын зарчмуудыг VCR (Vertical Crater Retreat) далд малталтын хяналттай тогоолон тэсэлгээний техниктэй хослуулсан хувилбар юм. Энэхүү аргыг 1980-аад оны сүүлээр Кимберли дүүргийн Де Бирс (De Beers) болон Бултфонтейн (Bultfontein) уурхайнуудад нарийн кимберлитийн хоолойд уламжлалт блокийн нураалт ашиглахад тогтмал тулгардаг хоёр асуудлыг шийдвэрлэх зорилгоор боловсруулж хэрэглэсэн: үүнд байгалийн жамаар аяндаа нурах үзүүлэлт сул, усаар ханасан, хэврэг кимберлит чулуулагтай холбоотой шаврын цөмрөлтийн өндөр эрсдэл (Granger 1992).

Уламжлалт блокоор нураах аргад хүдрийн биетийг улаар нь огтлон нураалтыг эхлүүлдэг бөгөөд малталтаар огтлогдсон талбайн хэмжээ тухайн чулуулаг аяндаа нурахад шаардагдах гидравлик радиуст хүрмэгц хүндийн хүчний нөлөөгөөр нураалт дээш чиглэлд явагдаж эхэлдэг. Харин VCR-ийн тусламжтай нураах аргад олборлолтын түвшнээс дээш хүдрийн биет рүү том диаметртэй босоо цоонуудыг өрөмдөж, тогоолох тэсэлгээгээр (crater blasting) нураалтын процессыг дэмжин, уурхайн ашиглалтын хугацааны туршид нураалтын чиглэлийг залж өгдөг.

Нураалтын ажилд тэсэлгээний гүйцэтгэх үүрэг нь VCR-ийн тусламжтай нураах аргыг уламжлалт блокоор нураах болон орчин үеийн эрчимтэй урьдчилсан сулруулах аргуудаас ялгах гол онцлог болж өгдөг.

Грэнжер (Granger, 1992) энэхүү аргыг Кимберлигийн уурхайнуудад анх санал болгосон бөгөөд дараа нь Де Бирс болон Бултфонтейн уурхайн ажиллагаанд нэвтрүүлж, 1979-1989 оны хооронд ашиглагдаж

байсан дэд давхаргаар агуйлан нураах аргыг орлуулсан. Байгалийн жамаар аяндаа нурах үзүүлэлтэд найдах боломжгүй хүнд нөхцөлтэй чулуулагт нураалт хийх асуудалд очир эрдэнийн салбарын зүгээс нэлээд олон жилийн өмнө санал болгож байсан хувилбаруудын нэг нь энэхүү арга байсан.

2.7 Нэвт нураан олборлох арга

Нэвт үргэлжлүүлэх (тасралтгүй суваг, нэвт агуйлах, үргэлжилсэн конус суваг гэхчилэн нэрлэх нь бий) арга бол Лаубшер (Laubscher, 2000)-ийн тодорхойлсон, блокоор нураах аргын хүдэр гаргалтын түвшний 5 үндсэн схемийн нэг бөгөөд үүнд мөн зөрүүтэй болон зөрүүлээгүй загасан нуруу (herringbone, offset herringbone), Хэндерсоны Z загвар (Henderson Z design), болон Эль Тэниентэгийн загвар (El Teniente layout) багтдаг. Хоорондоо жижиг апекс тулгуур багануудаар тусгаарлагдсан хүдэр бүүх тусгай цэгүүд байгуулахын оронд хүдрийн биетийн уртын дагуу нэвт штрек нэвтрээд үүн уруугаа хүдэр бүүх цэгүүд нь холбогддог нь энэ схемийн онцлог. Бүрэн утгаар нь ашиглах тохиолдолд энэ схемд тусад нь огтлоогоны түвшин гаргаж өгөх шаардлагагүй бөгөөд нэвт малталт нэвтэрч, тухайн түвшингээс нь цацраг хэлбэрээр цооногууд өрөмдөн тэсэлнэ. Нэвт цацрагууд өрөмдөн тэсэлснээр дээд талын түвшинд огтлоогоны малталт хийх шаардлагагүй болж нураалтыг илүү хурдтай эхлүүлэн, уурхай байгуулалтын зардал буурах давуу талтай гэж үзсэн байдаг (Weiss 1981, Jude 1990). Жижиг апекс тулгууруудын нөлөөгөөр том апекс тулгуур багануудад ирдэг тулаас үгүй болж улмаар олборлолтын түвшиний тогтворжилт алдагдаж байгаа нь Сан Мануэл уурхайд ажиглагдсан (Стивэнс нар. 1987) бөгөөд Шабани уурхайн Блок 7AB дээр 2B – 3A ангиллын уулын цул бүрэн нурсан байдаг (Хэслон 1981). Энэ аргыг хамгийн анх ашигласан гэж баримтжуулсан тохиолдол нь Австри дахь Австро-Американы магнетитын (Austro-American Magnetite) уурхай юм

2.8 Куб хэлбэртэй нураан олборлох арга

Австралийн "Caveman Consulting" компанийн Жеофф Данстан Куб нураалт (Cube caving)-ыг дизайны санаа хэлбэрээр дэвшүүлээд байна (Dunstan 2024). Олборлолтын түвшинг бүхэлд нь 90° уулзваруудаар хэрж (орчин үеийн нураалттай уурхайн дүр төрхийн илэрхийлэл болсон өнцөг үүсгэн байрласан хүдэр бүүлгууруудыг халж), уулзвар хоорондох тулгуур багануудын хэмжээг хамгийн максимум хэмжээнд хүргэн их гүн дэх илүү өндөр даралтыг тэсвэрлэх боломж бүрдүүлж, олборлолтын түвшинд ажиллаж буй ухах ба ачих процессыг хооронд нь салгана. Тэгш өнцгөөр огтлолцуулан торолж үүсгэснээр олборлолтын түвшинд бараг куб пропорц бүхий блокууд үүсдэг нь энэ аргыг куб олборлолтын арга хэмээн нэрийдэхэд хүргэсэн байдаг. Энэхүү өгүүллийг бичиж байх үед уг арга нь практик үйл ажиллагаанд нэвтрээгүй дизайны концепц түвшинд байна.

2.9 Суултын баганыг дүүргэгчтэйгээр нураан олборлох арга

Суултын баганыг дүүргэгчтэйгээр нураан олборлох нь дээр дурдсан аргууд шиг нураалтын шинэ схем биш бөгөөд харин нураалтын эвдрэл газрын гадаргад ил гарч ирсэн үеэс эхлэн уурхайн хаалт хүртэл нураалтыг хэрхэн удирдахтай холбоотой хувилбар юм. Энэхүү аргачлалыг Якубец болон бусад (Jakubec et al. 2026a, 2026b), мөн Монис (Monis 2026) нар нарийвчлан тодорхойлсон бөгөөд нураан олборлох арга ашиглах үед гадаад орчинд үзүүлдэг үр дагавруудын нэг болох нураалтын бүс газрын гадаргууд ил гарч ирсний дараа үүсдэг шаталсан суултыг шийдвэрлэхэд чиглэсэн.

Уламжлалт технологиор нураан олборлож буй үед гадаргууд эхлээд чулуулгийн эластик шинж чанартай холбоотой хэв гажилт үүсэх ба улмаар суналтаар хүчний нөлөөгөөр гадаргад ан цав үүсэж, суултын тогоо (subsidence crater) хэлбэрийг олоод, цаашид хүдэр олборлолт үргэлжлэх тусам гүн уруугаа болон хөндлөн чиглэлд уг тогоо нь тэлж, томордог. Уурхайн хаалтын шатанд суултын тогоо хамгийн эцсийн, хамгийн том

хэмжээндээ хүрдэг байна. Баганыг дүүргэгчтэйгээр нураах арга нь идэвхтэй суултын бүс рүү дүүргэгч материал цутгах замаар (ихэвчлэн далд уурхайн нуруалтын үйл явц газрын гадаргад ил гарахын өмнө эсвэл ил гарсны дараахан эхэлж, уурхайн ашиглалтын хугацааны туршид үргэлжилнэ) энэхүү үйл явцад хөндлөнгөөс нөлөөлж, эргэн тойрны чулуулгийн массыг дотогш шилжих болон нураалтын хөндий рүү нурахаас сэргийлнэ.

Суултын менежментгүй ердийн нураалтын аргатай харьцуулахад баганыг дүүргэгчтэйгээр нураах арга нь эвдрэлд орох гадаргуугийн хүрээг хязгаарлаж, дээд хязгаарыг нь анх гадаргууд ил гарсан талбайн хэмжээнд барих зорилготой. Түүнчлэн гадаргуугийн усны урсгал дотогш нэвтрэхийг үр дүнтэйгээр бууруулж, шаварлаг шингэний гэнэтийн урсгал (mudrush)-ын эрсдэлийг багасгаснаар урт хугацааны үс цэвэршүүлэх зардлыг хэмнэдэг. Гүний чулуулаг болон гадаргуугийн материалыг дүүргэгчээр хучсанаар хүчилтөрөгч, устай харьцах, урвалд орох нөхцлийг бууруулж, хүчиллэг чулуулгийн шүүрэл (acid rock drainage) үүсэх эрсдэлийг багасгана. Уламжлалт байдлаар газрын гадарга дээр хадгалдаг баяжуулах үйлдвэрийн хаягдлыг үр ашигтайгаар ашиглана. Мөн тогтворжсон, ургамал ургах чадвартай гадаргуугийн профилийг бий болгосноор уурхайн хаалтын үр дүнг сайжруулдаг байна.

Гол сүл талууд нь урьдчилсан хөрөнгө оруулалт болон үйл ажиллагааны зардал өндөр; далд уурхайн нураалт газрын гадаргууд хаана ямар хэлбэртэйгээр гарч ирэх нь тодорхойгүй байх тохиолдолд гадаргыг бэлтгэх ажлын дизайнд шууд нөлөөлдөг; нарийн ширхэгт фракцууд нурсан хүдрийн үйрмэг дүндүүр шилжих боломжтой бөгөөд энэ нь олборлож буй хүдрийг бохирдуулах болон шаварлаг урсгал үүсэх эрсдэлийг нэмэгдүүлэх магадлалтай; мөн гадаргуу дээрх тоосжилт, шуугиан, тээврийн хөдөлгөөн зэрэг техникийн бүс нөлөөллүүдийг дурьдаж болно.

Суултын баганыг дүүргэгчтэйгээр нураах аргыг хэд хэдэн уурхайд (Филиппиний Падкал уурхай, Аризонагийн Сан Мануэль, Австралийн Тэлфэр, Шведийн Кируна зэрэг) хэсэгчлэн эсвэл нөхцөл байдалд тохируулан нэвтрүүлж байсан. Түүнчлэн Канад дахь Нью Афтон (New Afton) уурхайд илүү системтэйгээр ашиглаж, өтгөрүүлсэн болон цементээр баяжуулсан хаягдлыг идэвхгүй суултын тогоо руу цутгаж байжээ (Jakubec et al. 2026b). Гадаргууд анх ил гарсан үеэс эхлэн хаалт хүртэл бүрэн хэмжээний багана дүүргэлтийг хараахан ямар ч уурхай нэвтрүүлээгүй байгаа тул энэхүү аргыг тогтсон практик гэхээсээ илүүтэйгээр шинээр гарч ирж буй үйл ажиллагааны хувилбар гэж ойлгох хэрэгтэй. Энэхүү аргын цаашдын хөгжил нь орчин үеийн нураан олборлох уурхайн зураг төсөлд нийгэм, зохицуулалт болон уурхайн хаалтын асуудлууд улам бүр жин дарах болсныг, мөн нураалтын улмаас үүсэх гадаргуугийн үр дагаврыг удирдах нь зарим нөхцөлд төслийн оршин тогтнох чадварт гүний уурхайн зураг төслийн адил чухал ач холбогдолтой болсныг харуулж байна.

2.10 Цөмийн дэлбэрэлтийн тусламжтай блокоор нураан олборлох арга

Цөмийн дэлбэрэлтийн тусламжтай блокоор нураах арга (эсвэл цөмийн дэлбэрэлтээр чулуулаг бутлах) нь 1960-иад оны АНУ-ын "Plowshare" хөтөлбөрийн үед боловсруулсан, блокоор нураах аргын нэгэн хувилбар байсан юм. Гүнд булсан цөмийн тэсрэх бодис дэлбэрэхдээ суллах энерги нь ердийн үед нурах боломжгүй, маш бат бөх чулуулгийн асар их эзлэхүүнийг нэг удаагийн үйлдлээр бутлан ан цав үүсгэж, улмаар блокоор нураах эсвэл газар доор уусган олборлоход тохиромжтой үйрмэг чулуулгийн багана үүсгэнэ хэмээх санаа тухайн үед гарч байжээ. Уг аргыг анх Флангас, Шаффер (Flangas & Shaffer 1960) нар дэвшүүлж, техникийн болон эдийн засгийн нарийвчилсан тооцооллыг нь Хардвик (Hardwick 1970) боловсруулжээ.

Ордын ёроолд байрлуулсан цөмийн төхөөрөмжийг дэлбэлснээр бутарсан чулуулгийн босоо багана (үйрмэг багана) үүсэх бөгөөд үүнийг геометр хэлбэр хэмжээсийн хувьд ердийн блокоор нураахтай төстэй зарчмаар доороос нь олборлохоор төсөөлөж байв. Зэсийн ядуу агуулга бүхий порфирийн

ордуудын хувьд бутарсан чулуулгийг газар дээр нь уусгаж, зэсийг уусмалд шилжүүлэн гарган авах боломжтой гэж үзэж байсан (Russell 1964; Hardwick 1970).

Зэсийн порфирийн ордод ашиглахаар хамгийн бүрэн хэмжээнд боловсруулсан санал нь Аризонагийн Саффорд орд газарт зориулж 1967 онд Кеннекотт Зэсийн Корпораци болон Атомын Эрчим Хүчний Комисс хамтран боловсруулсан "Project Sloop" байв. Гэвч уг төсөлд зориулж ямар ч цөмийн төхөөрөмж дэлбэлээгүй бөгөөд уг саналыг эцэст нь хаасан байна. Түүнчлэн энэхүү арга нь нураан олборлох аргын түүхэн дэх нэгэн сонирхолтой хуудас бөгөөд Хүйтэн дайны тодорхой нөхцөл байдалд дэвшигдсэн боловч арилжааны практикт уруу хэзээ ч шилжиж чадаагүй техникийн чухал санал байсан гэж ойлговол зохино.

3 Нураалттай холбоотой сорилтууд

Өмнөх бүлэгт өдгөө практикт ашиглагдаж буй нураан олборлох аргын үндсэн схемүүд болон уламжлалт сэтгэлгээнээс ангид, цоо шинэ нураалтын концепцуудын заримыг тодорхойлсон. Энэ хэсэгт эдгээр аргуудыг орчин үеийн практикт ашиглах үед гүн, олборлолтын хурд, нураалтын багана, мөн нийгэм, хууль эрхзүйн зохицуулалт талаас тавигддаг шахалт зэрэг нөхцөл байдлуудтай холбоотой түгээмэл тулгардаг сорилтуудыг авч үзнэ. Эдгээр сорилтууд нь өөрсдөө шинэ төрлийн зүйл биш бөгөөд ихэнх нь нураан олборлох аргын эхний арван жилүүдээс эхлэн танигдсан байдаг боловч уурхайн үйл ажиллагаа улам гүн рүү шилжиж, цар хүрээ нь томорч, илүү бат бэх уулын цүлд нэвтрэхийн хэрээр тэдгээрийн далайц, тулгамдсан байдал болон үр дагавар нь улам бүр ноцтой болж ирж байна.

Орчин үеийн нураан олборлолтод уул уурхайн ажиллагаанаас үүдэлтэй сейсмик идэвхжил, нойтон лаг шаврын гэнэтийн урсгал, бат бэх уулын цулын нурах чадвар, бутлалтын хяналт, нураалтын таазны тогтворгүй байдал, гадаргуугийн суулт, түүнчлэн өдгөө 1500 метрээс доош гүнд хүрч буй гүн–стресс–температурын хязгаарлалтууд зэрэг инженерийн болон чулуулгийн механикийн үндсэн сорилтууд тулгарч байна.

Уурхайн үйл ажиллагааг удирдахтай холбоотой хүдэр буулгалтын хяналтын сахилга бат, улаар огтлох дараалал, олборлолтын хурдыг нураалтын таазны эвдрэх хурдтай уялдуулах, юүлүүр дээрх нойтон лаг шаврыг тусгаарлах, мониторингийн нягтруулалт ба тайлал, анхны судалгаанаас эхлээд анхны олборлолт хүртэлх 7–10 жилийн бэлтгэл ажлын хугацаа зэрэг гол сорилтууд тулгарч байна.

Нийгэм, эрх зүйн зохицуулалт болон байгаль орчны үндсэн сорилтууд нь уурхайн урт хугацааны хаалт ба усны менежмент, орон нутгийн иргэдтэй тогтоох нийгмийн зөвшөөрөл (social licence), хүний амь нас эрсэдсэн ослын дараах хууль эрх зүйн үр дагавар, гүйцэтгэгч компанийн ажилчдын эрсдэлд өртөх байдал, уур амьсгалаас шалтгаалсан гидрологийн эрсдэл, түүнчлэн хаягдлын далан эсвэл гадаргуу дээрх хуучин дэд бүтэц болон идэвхтэй нураалтын бүсийн хоорондын харилцан үйлчлэл зэрэг болно.

Энэ хэсэгт хамгийн хөнөөлтэй үр дагавар бүхий 2 сорилтыг авч үзнэ. Эхнийх нь үйл ажиллагаа явуулж буй уурхайнууд орчин үед өргөнөөр баримтжуулсан уул уурхайн ажиллагаанаас үүдэлтэй сейсмик идэвхжил, удаах нь нойтон лаг шавар нэвтрэх эрсдэл буюу нийтлэгээр "mudrush" гэж нэрлэдэг сорилт. Бусад сорилтуудыг бүлгийн төгсгөлд цухас дурдах бөгөөд өгүүллийн дараагийн бүлгүүдэд, ялангуяа нураалтын дүрмүүд, дизайн, процессуудын талаар өөр өнцгөөс авч үзэх хэсгүүдэд гүнзгийрүүлэн авч үзэх болно.

3.1 Уул уурхайн ажиллагаанаас үүдэлтэй сейсмик идэвхжил

Өнөө цаг үед нураалт явуулж буй уурхайн гүн болон хүчин чадлын улмаас уул уурхайн ажиллагаанаас үүдэлтэй сейсмик идэвхжил нь сүүлийн 30 жилийн хугацаанд энэ салбарт тулгарч буй инженерийн үндсэн сорилтуудын нэг болон хувираад байна. Энэхүү үзэгдлийг өдгөө нураалтын 3 өөр аргыг хэрэглэж буй 4 орны дараах 5 уурхайн үйл ажиллагаанд маш өргөн хүрээнд баримтжуулаад байна. Үүнд: панелийн нураалт бүхий Зүүн Кадиат (Австрали) болон Эл Тениенте (Чили), дэд давхаргаар нураалттай ЛКАБ Кируна болон Малмбергет (Швед), блокоор нураах арга ашиглаж буй Грасберг цогцолбор

(Индонези). Эдгээр уурхайнуудад цугласан баримтууд нарийн деталиараа өөр хоорондоо ялгаатай хэдий боловч нэгэн ижил дүгнэлт уруу хөтөлдөг нь: сейсмик идэвхжлийг онцгой тохиолдол биш, харин өдөр тутмын тогтмол үзэгдэл гэж хүлээн зөвшөөрч инженерийн шийдэл гаргах ёстой.

3.1.1 Зүүн Кадиа

Дэлхийд үйл ажиллагаа явуулж буй хамгийн өндөр блоклон нураах уурхайнуудын тоонд ордог Зүүн Кадиа (Cadia East)-ийн панелийн нураалттай уурхайд (Cuello & Whiteman 2020) 2017-2026 оны хооронд үйл ажиллагаанд томоохон нөлөө үзүүлсэн сейсмик идэвхжлийн 3 тохиолдол бүртгэгдсэн байна. Анхных нь 2017 оны 4-р сарын 14-нд болсон 4.3 магнитудын хүчтэй уурхайн ажиллагаанаас үүдэлтэй газар хөдлөлт байсан бөгөөд уг үйл явдал нь PC1 блок дахь бутлуурын камер болон хүдэр гаргалтын штрекүүд, мөн PC2 блок дахь нэвтрэх замуудыг гэмтээж, ойролцоогоор 3 сарын түрш нөхөн сэргээх ажил хийх шаардлага үүсгэсэн ба тухайн жилийн алтны гарцыг 55%-иар буурахад хүргэжээ (Newcrest Mining Limited 2017). 2021 оны 7-р сард PC2 блокт болсон хэсэг газрыг хамарсан чичирхийлэл нь нураалтын ажил гүнзгийрч, тогтворжих шатандаа орсон ч сейсмик идэвхжил үргэлжилсээр байгааг харуулсан байна. Хамгийн сүүлийн тохиолдол 2026 оны 4-р сарын 14-нд (2017 оны үйл явдлаас яг есөн жилийн дараа) болж, 4.5 магнитуд хүрсэн нь Шинэ Өмнөд Уэльс мужийн төв хэсэгт урьд өмнө бүртгэгдэж байсан хамгийн том сейсмик үзэгдэл болжээ. Гүний уурхайн бүх 153 ажилтан гадаргуу дээр аюулгүй гарч чадсан ч уурхайн үйл ажиллагаа 2026 оны гуравдугаар улирал хүртэл бүрэн хүчин чадлаараа ажиллах боломжгүй төлөвтэй байна (Newmont Corporation 2026a, 2026b). Сейсмик идэвхжилтэй заримдаа холбон үздэг 2018 оны 3-р сарын 9-ний өдрийн хойд хаягдлын далангийн нуралт (суулт)-ыг хараат бус техникийн хяналтын зөвлөлөөс судалж үзээд, энэ нь уул уурхайн ажиллагаанаас үүдэлтэй чулуулгийн тэсрэлт (rockburst)-тэй холбоогүй, харин далангийн суурийн эвдрэл болон далангийн хашилтын шингэрэлт (liquefaction)-ээс үүдэлтэй нуралт байсан гэсэн дүгнэлтэд хүрсэн байдаг (Newcrest Mining Limited 2019).

3.1.2 ЛКАВ Кируна болон Малмбэргэт

Шведийн хойд хэсэгт орших ЛКАВ (LKAB)-ийн дэд давхраар агуйлан нураах (sublevel cave) технологиор ашиглаж буй төмрийн хүдрийн 2 уурхай нь Кадиа (Cadia) блоклон нураах уурхайтай дүйх жишээ юм. 2020 оны 5-р сарын 18-нд Кируна (Kiruna) уурхайд дотоод магнитуд нь 3.3 / моментын магнитуд нь 4.2-оор бүртгэгдсэн (Скандинавын хойгт урьд өмнө тэмдэглэгдсэн уул уурхайн ажиллагаанаас үүдэлтэй хамгийн том газар хөдлөлт) чичирхийлэл болсон бөгөөд үүний гипоцентр нь хүдрийн биетийн үл талын хананы (footwall) ойролцоогоор -1,146 м-ийн түвшинд байв. Уг үзэгдэл нь чулуулгийн тэсрэлт (rockburst)-ийн асар их эвдрэл дагуулж, уурхайгаас 286 км хүртэлх зайд хэт авиан дохиолол илрэх хэмжээнд хүрсэн байдаг (LKAB 2020; Mawson et al. 2022)

3.1.3 Эл Тениенте болон Коделкогийн уурхайнууд

Дэлхийн хамгийн том гүний зэсийн уурхай болох Эл Тениенте (El Teniente) нь уул уурхайн салбарын түүхэнд уурхайн үйл ажиллагаанаас үүдэлтэй сейсмик идэвхжлийн хамгийн урт хугацааны тасралтгүй баримтжуулсан түүхийг хадгалж байдаг. Чулуулгийн тэсрэлтийн системчилсэн судалгаа 1990-ээд оны эхээр эхэлсэн бөгөөд 1992 онд уурхайг бүхэлд нь хамарсан 25 сейсмик станц бүхий дижитал сейсмик хяналтын системийг суурилуулжээ. 1990 онд гарсан үхэлд хүргэсэн чулуулгийн тэсрэлтийн улмаас 6 ажилчин амь үрэгдэж, 2017 онд Эсмеральда (Esmeralda) секторт нуралт үүсэж байсан бөгөөд 2023 оны 7-р сарын 24-нд Андес Норте (Andes Norte буюу Уурхайн Шинэ Түвшин) төслийн агааржуулалтын дэд түвшинд болсон 3.3 магнитудын чичирхийлэл нь шинэ гүний бэлтгэл малталт дотор чулуулгийн тэсрэлтийг өдөөсөн байна.

2025 оны 7-р сарын 31-нд уул уурхайн ажиллагаанаас үүдэлтэй 4.2–4.3 магнитудын хүчтэй сейсмик үзэгдэл болж, идэвхтэй панелийн нураалтын олборлолтын бүсүүдэд газрын гадаргуугаас доош ойролцоогоор 2400 метрийн гүнд томоохон хэмжээний нуралт үүсгэжээ. Үүний улмаас гэрээт 6 ажилтан амь үрэгдэж, өөр 9 ажилтан бэртэж гэмтсэн бөгөөд сейсмик идэвхжлийн голомт нь Андесита (Andesita)

сектор болон Эл Тениенте уурхайн хойд хэсгийн 7-р дэд түвшин гэсэн хоёр өөр цэгт бүртгэгдсэн байна. Үүний улмаас үйл ажиллагааг зогсоосон (Mining Technology 2025; Mining Weekly 2026). Үүнээс хойш Андес Нортегийн туузан дамжуулагчийн туннель нь чулуулгийн тэсрэлтийн шалтгааны дүн шинжилгээний чиглэлээр хэвлэгдсэн кэйс судалгаа (case study) болоод байна (Rodríguez et al. 2026).

3.1.4 Гразбэрг комплекс (гүн хүдрийн бүс, гүн бутлуурын түвшингийн бүс, Гразбэрг блоклон нураах уурхай)

Папуа дахь ПТ Фрипорт Индонези (PT Freeport Indonesia) компанийн Гразберг (Grasberg) блоклон нураах уурхайн цогцолбор нь панелийн болон блокоор нураан олборлолтын үйл явцаа сайтар баримтжуулсан байдаг. 2000 оноос эхлэн 2021 онд хаагдах хүртлээ олборлолт явуулсан Гүний хүдрийн бүсийг (Deep Ore Zone буюу DOZ) ашиглах явцад уулын даралтын тэсрэлт (strainburst) байнга тохиолдож байв. Рой болон бусад судлаачид (Roy et al. 2022) DOZ уурхайг Эл Тениенте, Нортпаркс, Кадиа, Тэлфэр уурхайнуудын уулын даралтын тэсрэлтийн мэдээлэлтэй нэгтгэн харьцуулж үзээд, тулгуур цул дээр ирэх ачааллаас үүдэлтэй уулын даралт (ачаалал)-ын тэсрэлт нь гүний блоклон нураах арга ашиглах үед гардаг нийтлэг асуудал гэдгийг нотолсон байдаг. 2019 оноос хойш тогтвортой олборлолт явуулж буй Гүний бутлуурын түвшний бүс (Deep Mill Level Zone буюу DMLZ) нь сейсмик хяналтын чиглэлээр хэвлэгдсэн олон тооны томоохон судалгааны бүтээлийн гол объект болоод байгаа бөгөөд үүнд нураалтын үед уулын даралт авч буй тулгуур цул дахь микросейсмик чичирхийллийн дүн шинжилгээ, нураалтын ахилт, стрессийн хуваарилалтыг бодит хугацаанд (near real time) дүрслэн харуулах дөрвөн хэмжээст (4D) хугацааны томограф судалгаанууд багтаж байна (Hidayat et al. 2024). Гидравлик ан цав үүсгэх урьдчилсан бэлтгэл ажил (hydraulic-fracture preconditioning) хийж, олборлолт явуулах дарааллыг оновчлох менежмент хийх замаар сейсмик чичирхийллээс шалтгаалсан үйлдвэрлэлийн саатлыг бууруулсан хэдий боловч бүрмөсөн арилгаж чадаагүй байна.

3.1.5 Уурхайн үйл ажиллагаанаас үүдэлтэй сейсмик идэвхжилд өгөх дүгнэлт

Дээрх 5 уурхайн үйл ажиллагаанаас хуримтлуулсан туршлага нь хоорондоо нэгэн ижил байна. Гүний нураан олборлолт бүхий уурхайнууд дахь уурхайн ажиллагаанаас үүдэлтэй сейсмик идэвхжил нь:

- Олборлолтын аргаас хамааралгүй: панелийн нураалт, дэд давхаргаар нураалт, блокоор нураах аргуудын алинд нь ч ижилхэн тохиолддог бөгөөд уурхайн олборлолтын арга эсвэл литологи (чулуулгийн шинж чанар)-оос илүүтэйгээр, нураалтын явцад уулын даралтын ачаалал авч буй хэсгийн геометр хэлбэр хэмжээс болон олборлолтын явцад үүсэх стрессийн дахин хуваарилалтаас шалтгаалдаг.
- Түр зуурынх биш, харин тогтвортой үргэлжилдэг: Нураалтын ажил ахиж, агуйлалт хэлбэрших үед сейсмик идэвхжил намжих зүй тогтол ажиглагдаагүй бөгөөд зарим тохиолдолд хүдрийн биетийн тодорхой хэсгүүдийг ашиглах боломжгүйгээр бүрмөсөн алдахад ч хүргэдэг.
- Олборлолт явуулах схем, дарааллыг өөрчлөх арга хэмжээнүүд нь дангаараа чичирхийллийг бууруулахад хангалттай нөлөө үзүүлж чадахгүй: Инженерийн зүгээс эрчимтэй сейсмик хяналт (мониторинг), гидравлик ан цав үүсгэх урьдчилсан бэлтгэл ажил, уян хатан олборлолтын дараалал болон бэхэлгээг сайжруулах зэрэг олон аргыг хослуулж хариу арга хэмжээ авах шаардлага тулгардаг.

Уурхайн үйл ажиллагаа болон нийгэм, эрх зүйн зөвшөөрөлд улам бүр жин дарах болсон: Ганцхан удаагийн том хэмжээний сейсмик чичирхийллийн дараах сэргээн босголт л гэхэд олон сарын хугацаа, мөн хөрөнгө оруулалт ихээр шаарддаг, хүний амь нас, эрүүл мэндэд учруулах хохирол нь ноцтой байж болох бөгөөд эрх зүйн зохицуулалтын үр дагаврууд нь өдгөө тогтмол тулгардаг асуудал болжээ.

Энд дурьдсан арга хэмжээнүүдийн аль нь ч аюулыг бүрмөсөн устгах боломжгүй байх талтай. Гагцхүү эдгээр хариу арга хэмжээнүүдийг авснаар асуудлыг хэмжигдэхүйц, тодорхой хэмжээнд урьдчилан таамаглахуйц, асуудал үүссэн тохиолдолд удирдаж болохуйц хэмжээнд авч ирж байгаа юм.

3.2 Нойтон лаг шаврын урсгалын эрсдэл

Нураан олборлолтод тогтмол тохиолддог удаах сорилт бол нойтон лаг шаврын урсгал буюу "mudrush" (гүний малталт руу нойтон материал гэнэт, хяналтгүйгээр цутган орж ирэх үзэгдэл) юм. Сейсмик идэвхжил нь олборлолтын аргаас хамааралгүй бөгөөд ажлын зохион байгуулалт, олборлолтын дарааллыг өөрчилөх төдийгөөр бууруулах боломжгүй байдаг бол лаг шаврын урсгал нь механизмын хувьд илүү өвөрмөц шинжтэй: нарийн ширхэгт фракц (үйрмэг), ус, нойтон эх үүсвэрээс хүдэр юүлүүр хүртэл нээлттэй суваг үүсэх гэсэн гурван хүчин зүйл нэг дор бүрдсэн байх тохиолдолд бий болдог.

Хүдэр буулгуураас (orepass) гэнэт шавар асгарсны улмаас ажилчид бэртэж гэмтэх, цаашлаад амь нас нь эрсдэж байсан тохиолдлууд бий. Далд уурхайн төрөл бүрийн аргуудыг ашиглах үед нягтаршаагүй эсвэл муу нягтаршсан дүүргэгч материал цөмрөх, түүнийг дагаж чулуулаг гоожих тохиолдол байдаг бөгөөд уг орон зайд гадаргын болон гүний ус, нарийн ширхэгтэй материал хуримтлагдах боломжтой тул уурхайн үйл ажиллагааны нөлөөгөөр болон хүдэр буух цэгүүдээр дамжин газрын хэвлийд үүссэн "дотоод" лаг шавар урсаж гарч ирэх эрсдэл бий болдог. Блоклон нураах уурхайн хувьд хүдэр олборлох цэг нь газрын гадаргатай эвдрэлд орсон чулуулгаар "холбогдсон" байдаг тул "гаднаас угшилтай" шаврын урсгалд өртөх эрсдэл байдаг (Butcher et al. 2000; Jakubec et al. 2012). Нойтон лаг шаврын урсгал нь нураан олборлох аргын түүхийн түршид тогтмол тохиолдсоор ирсэн бөгөөд орчин үеийн уурхайнуудад нураалтаас үүдэлтэйгээр үхэлд хүргэх аюултай үр дагаваруудыг тэргүүлж байна.

Сүүлийн 15 жилийн хугацаанд нураан олборлох уурхайнуудад гарсан лаг шаврын урсгалын хэд хэдэн үхэлд хүргэсэн үйл явдал нь 5 тивийг дамнасан 6 уурхайн үйл ажиллагааг хамарч, хамгийн багадаа 18 ажилтан амь насаа алджээ. Үүнд Хятад улсад гарсан байж болох, олон нийтэд нээлттэй бүс байгаа лаг шаврын урсгалын ослоудыг оруулаагүй болно.

2012 оны 12-р сард Филиппиний Падкал (Padcal) блоклон нураах уурхайд (Philex Mining) хуурай байх ёстой гэж тооцоолж байсан бүсэд буюу 782 м-ийн түвшинд лаг шаврын гэнэтийн асгалт үүсэж, өөрөө ачигч-тээвэрлэгч (LHD) машины операторыг даржээ; дээр байгаа хүдрийн багана дотор ус хуримтлагдсаныг урьдчилан таамаглаагүй байсан бөгөөд оператор эмнэлэгт хүрэх замдаа амьсгал хураасан байна (Inquirer News 2012).

2014 оны 1-р сард Тасмани дахь Мт Лайелл (Mt Lyell) зэс-алтны уурхайд ажилтан амь үрэгдсэн бөгөөд уг осол болсон бүсийн аюулгүй байдлын үнэлгээг "бага"-аас "дунд" түвшин рүү ахиулсан байсан хэдий ч үйл явдал болохоос хэдхэн минутын өмнө шалгалт хийсэн түршлагатай операторууд тухайн хэсгийг албан ёсны үнэлгээнээс харьцангуй бага эрсдэлтэй гэж дүгнэж байжээ (Australian Mining 2014). Үүний дараа тус уурхай хаагдсан байна.

2021 оны 2-р сард Бритиш Колумби дахь Нью Афтон (New Afton) блоклон нураах уурхайд "Lift 1" нураалтын доор лаг шаврын урсгал үүссэний улмаас гэрээт өрөмдлөгийн нэг ажилтан амь үрэгдэж, өөр 2 ажилтан бэртэж гэмтжээ (Canadian Mining Journal 2021).

2022 оны 9-р сард Перу улсын Яурикоча (Yauricocha) дэд давхаргаар блоклон нураалттай уурхайд шаварлаг хөрсний нуралт үүсэж, гэрээт компанийн 3 ажилтан амь үрэгдэж, дөрөв дэх нь бэртсэн бөгөөд энэ нь лаг шаврын урсгалын эрсдэл зөвхөн блоклон нураах аргаар хязгаарлагддаггүйг харуулсан байна (Mining Magazine 2022).

Хамгийн сүүлийн үеийн хоёр тохиолдол болох Грасберг (Grasberg) болон Кимберли (Kimberley) уурхайнуудын кэйсийг дараах хэсгүүдэд тусад нь авч үзэх болно.

3.2.1 Grasberg block cave 2025

Нураан олборлох уурхайн салбарт гарсан хамгийн сүүлийн үеийн томоохон лаг шаврын урсгал нь 2025 оны 9-р сарын 8-нд ПТ Фрипорт Индонези (PT Freeport Indonesia) компанийн Гразберг (Grasberg) блоклон нураах уурхайд гарсан бөгөөд тухайн үед гадаргуу дээрх хуучин ил уурхайгаас ойролцоогоор 800,000 тонн нойтон материал урьд өмнө илрээгүй байсан суваг замаар дамжин идэвхтэй ажиллаж байсан гүний уурхай руу цутган орж иржээ. Лаг шавар олборлолтын түвшинд нэвтрэн орж, панелийн

штрек болон агааржуулалтын өгсүүр малталтууд, хүдэр буулгуурууд, шүүрүүлэх сүвгуудаар дамжин урссаар 7 уурхайчин ажиллаж байсан тээврийн болон үйлчилгээний түвшинд хүрсэн байна; уг долоон ажилтан бүгд амь үрэгдсэн (Mining 2025). Фрипорт-МкМоРан (Freeport-McMoRan) компани энэхүү гадаад эх үүсвэрээс угшилтай лаг шаврын урсгалыг (урьд өмнө тогтоогдоогүй байсан гадаргуугийн эх үүсвэрээс орж ирсэн материал) тус уурхайн зүгээс олон арван жилийн турш аюулгүйгээр удирдаж ирсэн дотоод нойтон лаг шаврын үүсэлтэй ослуудаас зарчмын хувьд тодорхой зааглан ялгаж үзсэн; 2025 онд тохиолдсон энэхүү осол цар хүрээ болон гарал үүслийнхээ хувьд Грасберг уурхайн түүхэнд урьд өмнө тохиолдож байгаагүй үзэгдэл байв. Биг Госсан (Big Gossan) болон DMLZ уурхайнууд 2025 оны дөрөвдүгээр улирлын дунд үе хүргэж үйл ажиллагаагаа дахин эхлүүлсэн бөгөөд Грасберг блоклон нураах уурхай (GBC)-г өөрийг нь 2026 оны эхний хагаст багтаан үе шаттайгаар дахин ажиллуулж эхлэхээр төлөвлөж байгаа бөгөөд бүрэн хүчин чадлаараа ажиллах хугацааг 2027 оноос наашгүй гэж таамаглаж байна. (The Oregon Group 2025).

3.2.2 Кимберли: Ужгирсан лаг шаврын эрсдэл ба Экапа уурхайд 2026 онд гарсан осол

Де Бирс (De Beers) компанийн Кимберли дэх хуучны скреперээр тоногдсон штректэй блоклон нураах уурхайнуудад (Бульфонтейн, Дутойтспан, Весселтон, Де Бирс, болон анхны Кимберли уурхай) 20-р зууны хоёрдугаар хагасын туршид лаг шаврын урсгалын үйл явдлууд олон удаа давтагдан тохиолдож байжээ. 1950-иад оноос эхлэн лаг шавар үүсэх өндөр магадлалтай, нарийн кимберлитийн хоолойд *slusher drift* олборлолтын схем ашиглан блоклон нураах аргаар ажиллаж байсан эдгээр уурхайнууд уул уурхайн салбарын хэмжээнд лаг шаврын урсгалд хамгийн их өртсөнөөрөө салбарт танигдсан төслүүд бөгөөд Холдер болон бусад судлаачид (Holder et al. 2013) өдгөө ч тус салбарын стандарт лавлагаа материал хэвээр байгаа судалгааны бүтээлийг туурвисан байдаг. Ажиллагсдын амь насанд хүрсэн лаг шаврын урсгал 2026 оны 2-р сарын 17-нд Кимберли дэх Экапа (Екара) алмазны уурхайд гарсан бөгөөд тухайн үед газрын гадаргуугаас доош ойролцоогоор 890 метрийн гүнд орших Дутойтспаны босоо амны 6-р туннелээр лаг шавар, усны урсгал гэнэт түрэн орж ирсний улмаас 5 уурхайчин хашигдаж, яваандаа тэднийг амь үрэгдсэнд тооцсон байна (African Times 2026; News24 2026; Mining Review Africa 2026; Diamond Fields Advertiser 2026). Экапа Майнинг (Petra Diamonds болон Eka Resources компанийн хамтарсан үйлдвэр) уг гарсан эмгэнэлт явдлын зэрэгцээ алмазны зах зээлийн урт хугацааны уналтыг шалтгаан болгон дурдаж, осолд өртсөн уурхайг нэн даруй хааж, дампуурлаа зарлах тухай өргөдлөө өгсөн байна.

3.2.3 Лаг шавар олгойдох эрсдэлд өгөх дүгнэлт

Дээр дурдсан нураан олборлох уурхайд лаг шавар олгойдох кэйсүүдэд хийсэн судалгаагаар 2011 оноос хойш 5 тивийг хамарсан төслүүд дээр 18 уурхайчин амь эрсэдсэн байна. Холбогдох ослын давтамж цаг хугацааны явцад буураагүй байна; лаг шавраар үерлэх эрсдэлийн менежментийн чиглэлээр сүүлийн 3 арваны турш техникийн бүтээлүүд хэвлэгдсээр байгаа хэдий ч эдгээр 18 ослын 15 нь 2022 оноос 2026 оны хооронд тохиолджээ. Цуглуулсан баримтаас дараах дөрвөн зүйл ажиглагдаж байна:

- Уул уурхайн олборлолтын ямар арга хэрэглэж байгаагаас үл хамааран лаг шавраар үерлэх эрсдэл тохиолдож байна. Авч үзсэн кэйсүүд блоклон нураах арга (Кимберли, Грасберг) болон дэд давхараар агуйлан нураах арга (Яурикоча)-ыг хамарч байна; Асуудал гарсан тохиолдолд аль нэг аргаар ашиглаж буй тохиолдлын аль нэг малталт нь энэ аюулд өртөхгүй үлдэж байна гэж үзэх үндэслэл алга байна.
- Лаг шаврын аюул занал бодитоор илрэх хүртлээ ихэвчлэн харагддаггүй. Хүдэр буух цэгийг хяналтын тоног төхөөрөмжөөр тоноглох, шаврын зураглал хийх практик, геофизикийн судалгаануудын түслэмжтайгаар урьдал шинж тэмдгүүдийг илрүүлэх явцыг сайжруулж байгаа боловч осол тохиолдохоос өмнө амжиж сэргийлэх, хариу арга хэмжээ авах хугацаа богино хэвээр байна.

Грасберг уурхайд 2025 онд гарсан осол орчин үеийн нураан олборлох уурхайнууд дахь лаг шаврын урсгалын эрсдэл өдгөө зөвхөн нураалтын бүсээс хальж, өмнөх уул уурхайн ажиллагаа эсвэл

гадаргуугийн дэд бүтцээс уламжлагдан үлдсэн материалын хуримтлал, суваг шуудуунуудаас ч хамаарч болохыг онцлон харууллаа. Тухайн газар нутагт урьд өмнө ямар нэг үйл ажиллагаа явагдаж байсан түүхтэй (идэвхтэй нураалтын дээд талд хуучин ил уурхай, хуримтлагдсан хаягдал чулуулаг эсвэл хаягдлын далантай) газарт нураалт хийж буй уурхайнууд лаг шаврын эрсдэлийн үнэлгээгээ зөвхөн идэвхтэй нураалтын баганаар хязгаарлалгүй, тэдгээр уламжлагдан үлдсэн өвүүдийг хамруулан өргөтгөн авч үзэх шаардлагатай болж байна.

4 Нураалтын дүрмийг эргээд нэг харая

Өмнөх бүлгүүдэд чулуулгийг өөрөөр нь нураан олборлолт хийж буй уурхайнуудын бодит жишээн дээр олборлолтын түвшний тогтворжилт, сейсмик идэвхжил, лаг шаврын үрсгалтай холбоотойгоор гарч буй ослын тохиолдлууд, нөхцөл байдлыг авч үзсэний дараагаар салбарын мэргэжилтнүүд, судлаачдын зүгээс тэр бүр барьж авалгүй орхигдуулаад байсан нэг асуулт зүй ёсоор тавигдана. Энэ нь нураалтын дүрмүүд (сүүлийн хагас зуун жилийн турш нураан олборлох аргыг тодорхойлж ирсэн эмпирик удирдамжуудын цогц) өдгөө бидний боловсруулж буй дизайн, хэрэгжүүлж буй төслүүдийн шаардлагыг хангаж байна уу? Сүүлийн жилүүдэд нураалтын дизайны тал дээр хэд хэдэн ахиц дэвшил гарсан. Өнгөрсөн хугацаанд зарим төслийн дизайнд эдгээр дүрмүүдийг дагаж мөрдөөгүй байдаг бөгөөд энэ нь тэр бүр зураг төсөл зохиогчид санаатайгаар хязгаарыг давж, эсвэл уламжлалт сэтгэлгээнээс ангид сэтгэсэндээ ч биш, харин өнгөрсөн үеийн туршлагаа сайн мэддэггүйтэй, эсвэл бат бөх инженерийн шийдлийг золиослох замаар ашгийг дээд зэрэгт хүргэх гэсэн арилжааны шахалтад ордогтой холбоотой юм. Нураалтын дүрмүүд нураан олборлолтын түүхийн явцад боловсруулагдсан бөгөөд шинэ туршлага хуримтлагдахын хэрээр тасралтгүй шинэчлэгдэж ирсэн байдаг.

4.1 Нураалтын дүрмийн үүсэл гарал, зорилго

Өдгөө нийтлэгээр ойлгогддог нураалтын дүрмүүд нь ойролцоогоор 4 арваныг дамнан хуримтлагдсан эмпирик судалгааны үр дүнгээс урган гарсан байдаг. Анхны дүрмүүдийг голчлон 1960-аас 1990-ээд оны алмаз, шөрмөсөн чулуу (асбест) болон зэсийн порфирийн нураан олборлох уурхайнуудын үйл ажиллагааны туршлага дээр үндэслэн боловсруулсан: үүнд блокийн өндөр нь 100–300 м, гүн нь ихэвчлэн 1000 метр дотор, уулын цул нь багахан гидравлик радиус үүсгээд өгөхөд нуралт найдвартай явагдаж эхлээд цаашид өрнөхөд хангалттай хэмжээний ан цавшилттай байв. Нураалтын дүрмүүдийн суурь бүтээлийг Деннис Лаубшер (Dennis Laubscher) "Блоклон нураах аргын практик гарын авлага" (A Practical Manual on Block Caving) (Laubscher et al. 2000) номондоо тусгасан бөгөөд үүнд уурхайн чулуулгийн массын үнэлгээ (MRMR)-нд суурилсан нурах чадварын график, юүлүүр хоорондын зайн зөвлөмжүүд, улаар огтлох дарааллын дүрмүүд болон хүдэр бүүлгалтын хяналтын зарчмуудыг кодчилон оруулсан нь 1990, 2000-аад оны туршид блоклон болон панелийн нураалтын зураг төслийн де-факто стандарт болсон юм. "Блоклон нураах аргын геомеханик" (Block Caving Geomechanics) (Brown 2003) бүтээл нь энэхүү тогтолцоог илүү нарийвчилсан геомеханик боловсруулалтаар нэгтгэж, өргөжүүлсэн бөгөөд "Нураан олборлох уул уурхайн аргуудын удирдамж: Үндсэн концепцууд" (Guidelines on Caving Mining Methods: The Underlying Concepts) (Laubscher et al. 2017) нь үйл ажиллагааны туршлагад тулгуурлан дүрмүүдийн тодорхой элементүүдийг улам нарийвчлан сайжруулсан байдаг.

4.2 Нураан олборлолтын алтан дүрмүүд

Албан ёсны техникийн удирдамжаас гадна нураан олборлох уурхайн үйл ажиллагааны практикоос урган гарсан цөөн хэдэн "алтан дүрмүүд" байдаг бөгөөд тэдгээрийг туршлагатай мэргэжилтнүүд уурхайн үйл ажиллагаа ноцтой буруу тийшээ эргэх магадлалыг бодитоор бууруулдаг зарчмууд хэмээн тодорхойлдог. Эдгээр нь нураалтыг удирдах албан ёсны тогтолцоог орлох зүйл биш, албан ёсны тогтолцоогоор яваад мухардах, аль эсвэл төсөл эгзэгтэй зааг дээр хэрэгжих үед юу хамгийн чухал

болохыг амьдралын туршлага дээр үндэслэн олж авсан сургамж маягийн зүйлс юм. Онцгой ач холбогдолтой, шалгарсан зарим дүрмээс дурьдвал:

- Богино хугацааны эдийн засгийн үр ашгийг дээд зэрэгт хүргэхээс илүүтэйгээр техникийн амжилтыг урьтал болгох: Инженерийн шийдлийн хувьд амжилт олохыг зорьж боловсруулсан нураалтын уурхай урт хугацаандаа олборлолтын хүчин чадалдаа хурдан хүрэх гэж яарч эсвэл эхний үеийн цэвэр өнөөгийн үнэ цэнэ (NPV)-ийг дээд зэрэгт хүргэхээр төлөвлөж хийсэн уурхайгаас хамаагүй илүү эдийн засгийн үр ашиг бий болгодог. Эсрэгээр яваад амжилт олсон тохиолдол огт бүртгэгдээгүй. Энэ бол хамгийн чухал дүрэм бөгөөд арилжааны шахалтад орсон уурхайнуудын хамгийн их зөрчдөг дүрэм юм.
- Геотехникийн нөхцөл байдал, тавигдаж буй хязгаарлалтад тулгуурлаж тоног төхөөрөмжийн сонголт хийх ёстой болохоос эсрэгээр тоног төхөөрөмжөө сонгогчихоод геотехникийн нөхцөл байдлыг удирдах боломжгүй: Ямар нэг утгуурт ачигч (LHD) сонгогчихоод түүний параметрт тааруулан олборлолтын түвшний малталтуудын дизайн гаргасны дараагаар уулын цулыг уг сонголтдоо захируулах гэж оролдох нь уурхайнуудад нийтлэг ажиглагддаг алдаа. Уулын цулын төлөв байдал өөрчлөгдөшгүй тогтмол, харин тоног төхөөрөмж нь өөрчлөгдөх боломжтой хувьсах үзүүлэлт юм.
- Нураан олборлох аргын амин сүнс нь харилцан үйлчлэл бүхий буулгалтын (interactive draw) зарчим: Хүдэр буух цэг хоорондын зайг ихээр авснаар буулгалтын бүсүүдийг тусгаарлах нь мэргэжилтнүүдийн хэлдгээр "эдийн засгийн амиа хорлолт" юм. Буулгалт тусгаарлагдсанаар хүдэр авалт муудаж, нураалтын таазны хэлбэр жигд бус болж, юлүүрийн амсрын (brow) элэгдэл хурдсах бөгөөд үнэн хэрэгтээ тулгуур баганын тогтворжилтод ямар ч ашиг тус авчирдаггүй.
- Нураалт бүрэн тогтож, жигдрэх хүртэл хүдэр таталтыг бүү эрчимжүүл, бүү хүчлэ: Шинээр нураалт эхлүүлсэн талбайгаас их хүчин чадлаар олборлолт хийх гэж удирдлагын зүгээс үзүүлэх шахалт эсвэл арилжааны үүрэг амлалтууд нь үйл ажиллагааны эхэн үед асуудал үүсгэх хамгийн түгээмэл шалтгаан юм. Нураалт өөрөө тогтворжих боломж олгох ёстой бөгөөд эхэн үеийн олборлолтын муруйг уулын цулын хэлбэр хэмжээс, сейсмик хариу үйлдэлд захируулах ёстой.
- Залруулга тохиргоо хийгдээгүй тоон загварчлалд хэт их бүү найд: Энд "бүх загварууд буруу, харин заримыг нь ашиглаж болохуйц байдаг" гэсэн алдартай афоризм үйлчилдэг. Ашиглаж болох эсэх нь өгөгдөлд хийсэн тохиргоо, залруулгын чанараас хамаардаг бөгөөд нураан олборлолтын хувьд залруулга хийх өгөгдөл нь угаасаа өнгөрсөн үйл явдлыг эргэн харсан шинжтэй байдаг. Компьютер тэгшитгэлийг шийддэг, харин хүмүүс асуудлыг шийддэг. Тоон аргууд нь нураалтын зураг төсөлд тодорхой бөгөөд өсөн нэмэгдэж буй үүрэг гүйцэтгэдэг боловч тэдгээрийг инженерийн шийдвэр гаргалтыг орлуулах биш, харин түүнийг дэмжих зорилгоор ашиглах нь хамгийн зөв юм. Уулын цул болон уурхайн үйл ажиллагааг сайн ойлгодог, загварын үр дүн өөрийнх нь туршлагаас зөрж байгааг таньж мэдэж чаддаг инженер бол уурхай бүрийг амжилтад хүргэх хамгийн чухал, салшгүй элемент юм.
- Хүдэр буух цэг дээрх үйл ажиллагааны сахилга батыг зайлшгүй сахих ёстой: Хүдрийг жигд буулгах, харилцан үйлчлэл бүхий урсгалыг хангах, лаг шаварт өртөмтгий юлүүрүүдийг тусгаарлах, хяналттай хоёрдогч бутлалтыг хийх зэрэг нь орчин үеийн нураалтын уурхай бүрт олборлолтын үр бүтээмжийг хэмжих стандарт хэвээр байна.
- Улны огтолгооны дараалал (undercut sequencing) нь олборлолтын түвшинд ирэх уулын даралтад бодитоор нөлөөлдөг дизайны хамгийн чухал шийдвэр хэвээр байна.
- Ашиглалтын гол параметруудийн консерватив байдлаар тодорхойлсон стандарт хэмжээсүүд (блокийн өндөр, юлүүр хоорондын зай, тулгуур баганын хэмжээсүүд) дизайны суурь утга

хэвээр байгаа бөгөөд эдгээрт ямар нэг байдлаар өөрчлөлт оруулахдаа үндэслэл бүхий тооцоо, судалгаа, нотолгоонд үндэслэх шаардлагатай. Дүрмүүд нь 600 метрийн өндөртэй баганаар олборлох боломжгүй гэж хэлдэггүй; харин 600 метрийн багана нь 200 метрийн баганатай харьцуулахад дизайны хувьд тэс өөр түвшний хэлэлцүүлгийг шаарддаг гэж хэлдэг бөгөөд сүүлийн үеийн хэд хэдэн уурхайн үйл ажиллагаанд энэхүү асуудлыг шаардлагатай хэмжээнд нь хүртэл гүнзгийрүүлэн авч үзээгүй байна.

Товчхондоо, эдгээр дүрмүүд нь өөрсдийг нь гаргаж авсан эмпирик хязгаарын хүрээнд ажиллаж буй ямар ч нураан олборлох уурхайн үйл ажиллагааны үндсэн тогтолцоо хэвээр байна. Ирээдүй үеийнхний тулгамдсан асуудал бол өдгөө энэхүү эмпирик хязгаараас гадна оршиж буй уурхайн үйл ажиллагаануудад ямар дүрмүүд эсвэл нэмэлт удирдамжуудыг хэрэглэх вэ гэдэг асуудал юм.

4.3 Арилжааны шахалтын улмаас дүрмүүдийг хэрхэн зөрчдөг вэ

Орчин үеийн нураан олборлох уурхайнууд тогтсон дүрмүүдийн уламжлалт анхны параметруудээс системтэйгээр ухарч байна. Уламжлалт дүрмээс зөрж буй дараах хоёр хэлбэр ажиглагддаг. Зарим нь өдгөө олборлож буй ордуудын эдийн засгийн нөхцөл байдал болон сүүлийн үеийн технологийн ололтуудыг ашиглах гэсэн инженерийн амбицаас үүдэлтэй; эдгээр нь дүрмүүдийг анхааралдаа авч, ухамсартайгаар хийсэн хууль ёсны инженерийн сонголтууд бөгөөд тэдгээрийг дэмжиж буй дүн шинжилгээ нь нарийн чанд байх тохиолдолд сайшааж хүлээн авах нь зүйтэй. Харин бусад нь зураг төсөл зохиогчид дүрмийг бий болгоход нөлөөлсөн өнгөрсөн үеийн туршлагыг сайн мэддэггүйн улмаас, эсвэл тухай уурхайн үйл ажиллагааг удирдаж буй баг найдвартай инженерийн шийдлийг золиослох замаар богино хугацааны ашгийг дээд зэрэгт хүргэх гэсэн арилжааны шахалтад орсноос үүдэж байна. Эхний төрлийн үхралтыг өөрийнх нь давуу тал, үндэслэлээр хамгаалж болох бол хоёр дахь төрлийг нь хамгаалах ямар ч боломжгүй юм. Салбарын хувьд тулгарч буй хүндрэл нь юу вэ гэвэл, уурхайд эвдрэл, нуралт үүсэх хүртэл энэхүү хоёр өөр үхралтаас үүдэн гарах үйл ажиллагааны үр дагаврууд нь хоорондоо ихэвчлэн ялгагдахааргүй ижил байдагт оршино.

4.4 Шинэчлэгдсэн удирдамж руу чиглэх нь

Нураалтын дүрмүүдийг бүрэн хэмжээнд шинэчлэн засварлах нь ганц өгүүллийн хүрээнээс, мөн уурхайн аль нэг оператор компанийн дангаар хуримтлуулсан туршлагын хязгаараас хальсан асуудал юм. Энэхүү өгүүллийг толилуулж буй "Нураан олборлолт 2026" (Caving 2026) бага хурал нь салбарын хэмжээний илүү өргөн хүрээний хэлэлцүүлгийг өрнүүлж, уг ажлыг урагшлуулах нэгэн талбар мөн. Шинэчлэгдсэн дүрмийн цогцод тусгах шаардлагатай үндсэн элементүүдийг дараах байдлаар тодорхойлж байна:

- 1000 метрээс доош гүн дэх гүн–стресс–температурын хязгаарлалтууд: Энэхүү гүнд уламжлалт эмпирик удирдамжууд хомс байдаг бөгөөд сейсмик аюул занал, уулын малталтын бэхэлгээ, хөргүүр (агааржуулалт) болон үс шүүрүүлэлтийн асуудлууд нь гүехэн уурхайнуудад ажиглагддаггүй өвөрмөц хэлбэрээр хоорондоо харилцан үйлчилдэг
- Нураалтын геометр хэмжээсүүд болон сейсмик үйл явдлын магнитудын тархалт хоорондын харилцан үйлчлэл
- Чулуулгийг урьдчилан бэлтгэх ажлыг (гидравлик ан цав үүсгэх, хязгаарлагдмал орчин дахь тэсэлгээ) тусгайлсан нэмэлт ажил биш, харин дүрмийн тогтолцоонд нэгдсэн байдлаар тусгах: Үүнд урьдчилсан бэлтгэл ажлыг хэзээ хийх шаардлагатай, түүний үр нөлөөг хэрхэн загварчлах талаар тодорхой удирдамжийг багтаах хэрэгтэй
- Гадаргуугийн менежментийн шаардлагууд (гадаргуугийн суултын хяналт, усны менежмент, нийгмийн зөвшөөрөл болон хууль эрх зүйн үр дагавар): Эдгээр нь уурхайн үйл ажиллагаанд юуг бодитоор хэрэгжүүлэх боломжтой вэ гэдгийг улам бүр тодорхойлох болсон

- Автоматжуулалт болон зайнаас удирдах ажиллагааны үүрэг оролцоо: Энэ нь аюул заналыг бууруулах арга хэмжээ болохын зэрэгцээ үйл ажиллагааны нарийн төвөгтэй байдлын шинэ эх үүсвэр болж байна.

Нураалтын дүрмүүдийн шинэчлэгдсэн хувилбар нь өдгөө мөрдөгдөж буй дүрмүүдтэй харьцуулахад илүү нарийвчилсан, илүү олон нөхцөл шалтгаанаас хамаарсан, мөн мониторингийн (хяналтын) өгөгдөлтэй илүү нягт холбогдсон байх болно. Эрсдэлийн үнэлгээний системчилсэн тогтолцоотой илүү төстэй харагдах бөгөөд чулуулгийн нурах чадварын таамаглал нь уг тогтолцооны олон оролтын өгөгдлүүдийн зөвхөн нэг нь байх болно. Мөн уламжлалт консерватив параметруудээс илүү ихээр хазайх тусам мониторингийн нягтралыг харгалзан заавал нэмэгдүүлэхээр, өөрийн нураалттай уурхайн аюулгүй ажиллагааны мэдээлэлд тулгуурлан тухайн аль нэг параметр үзүүлэлт (сейсмик идэвхжил, лаг шаврын урсгал, бутлалт, гадаргуугийн суулт, нийгмийн зөвшөөрөл) илүү нөлөө үзүүлэхээр байх тохиолдолд түүнд нь тухайлан зааж өгсөн илүү нарийн зохицуулалттайгаар ашиглалтыг явуулах. Харин үүний хүрээнд хэзээ ч өөрчлөгдөхгүй бөгөөд ирээдүй үеийн нураалтын инженерүүдийн ямагт тодорхой санаж явах ёстой зүйл бол олон янзын уурхайнуудын практик туршлагаар дахин дахин батлагдсан цөөн хэдэн алтан дүрмүүд юм. Эдгээр нь: техникийн амжилтыг урьтал болгох, геотехникийн хязгаарлалтуудаар дизайныг тодорхойлох, харилцан үйлчлэл бүхий буулгалтын зарчмыг хүндэтгэх, шинээр эхлүүлсэн нураалтын уурхайг хүчээр хурдтай олборлохгүй байх, баталгаажуулаагүй загварчлалд хэт найдахгүй байх, мөн компьютер тэгшитгэлийг шийддэг ч асуудлыг хүмүүс шийддэг гэдгийг үргэлж санах явдал юм.

5 Уурхайн дизайн болон процессуудын талаарх зөрүүтэй бөгөөд маргаантай үзэл баримтлалууд

Маргаантай, цаашлаад эсрэг тэсрэг байр суурь байнга дагалдаж байдаг гэж хэлж болох хэд хэдэн гол асуудлыг доор авч үзэв.

5.1 Хүдрийн биетийн талаарх мэдлэг: Бодит туршлага уу, эсвэл машин сургалт уу??

Өнөөгийн технологийн ололтууд (лазер сканнер, фотограмметрт суурилсан бүтцийн зураглал, эсвэл машин сургалтад суурилсан керн баримтжуулалт) асар их боломжийг олгож байгаа ч нөгөө талаар үлэмж хэмжээний далд эрсдэлүүдийг дагуулж байна. Давуу талууд нь бодитой: ажилчид эрсдэлтэй налуу эсвэл бэхлэгээгүй мөргөцгөөс хол байж, өгөгдлийн сангийн нягтрал хэд дахин нэмэгдэж, гараар хөтөлдөг тэмдэглэлийн дэвтрийг дижитал төхөөрөмжүүд бүрмөсөн орлож байна. Гэвч үүний цаана нүүгдаж буй өртөг нь геологичид, инженерүүд чулуулгаасаа холдож буй бодит байдал. Өнгөрсөн үед мөргөцөг дээр шууд ажиллаж, эсвэл кернийг гараар барьж үзэж, зорж, хагалж, чулуулгийн ширхэгийг мэдэрч байж геологийн болон геотехникийн дүгнэлт, шийдвэрүүд гардаг байв. Энэхүү “амьд” харилцааг цэгэн үүл (point cloud), компьютерт боловсруулсан моделийн үр дүнгээр орлуулах үед эрсдэл улам бүр нэмэгдэх боломжтой. Ямар нэг “хар хайрцаг” дотор боловсруулж гаргаж авсан үр дүнг нэмэлт ажиглалт, аудит, баталгаажуулалтгүйгээр дараагийн шатанд нөөцийн болон геотехникийн моделиудад шууд бодит үнэн мэтээр хүлээн авах хандлага амархан тогтдог. Түүнчлэн, ирээдүй үеийн нураалтын инженерүүд уул техникийн зүй тогтлыг таньж мэдэх, “чулуулгийг эс ширхэг бүрийг хүрч мэдрэх” чадварыг хэзээ ч хүримтлүүлж чадахгүйд хүрч магадгүй юм.

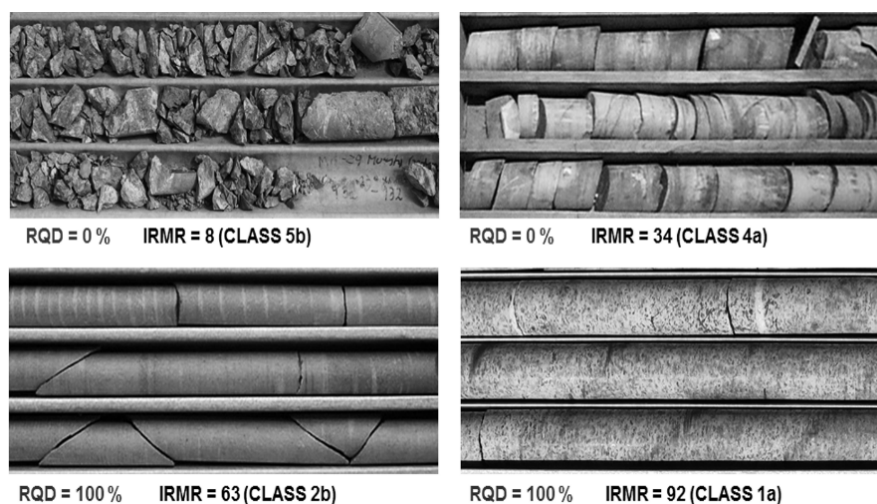
5.2 Хүдрийн биетийн талаарх мэдлэг: уулын цулын ангилал

Өөрийн нураалттай уурхайн дизайн, ажлын гүйцэтгэлийн бүх асуудлууд зөв бөгөөд иж бүрэн хийсэн уулын цулын үнэлгээ, домэйнчлэл, уулын цулын бат бэхийн тооцоонд тулгуурладаг. Геологийн бат бэхийн индекс (GSI), чулуулгийн массын үнэлгээ (RMR), Q үзүүлэлт зэрэг уулын цулын ангиллуудыг энэ зорилгоор түгээмэл ашигладаг бөгөөд эдгээр үзүүлэлтүүд салбарт өргөн хэрэглэгддэг тоон загварчлалын өгөгдөл байдлаар ашиглагддаг. Ангиллын системүүд зарим хүмүүсийн үздэг шиг

өнгөрсөн үеийн өв үлдэгдэл биш, салбарт өөрсдийн үүргийг зохих хэмжээнд үргэлжлүүлэн гүйцэтгэсээр байх болно.

1976 онд Лаубшер, Тайлор нар нураан олборлох үйл ажиллагаанд тусгайлан зориулсан MRMR ангиллыг нэвтрүүлсэн бөгөөд дагалдуулан нурах чадвар, нураалтын хурд, буулгалтын бүс/юулүүр хоорондын зай, бэхэлгээ зэргийг тооцох эмпирик аргачлал боловсруулсан байдаг. Ихэнх ангиллын системүүд чулуулгийн чанарын тодорхойлолт (RQD)-ын хэмжилтэд тулгуурладаг боловч асар их ан цавтай, эсвэл маш бага ан цавтай чулуулагт RQD-ын утга нь нурах чадвар, бутлалт эсвэл тогтворжилтыг илэрхийлэх ашигтай үзүүлэлт болж чадахгүй байх талтай (Зураг 5).

1990 онд Лаубшер нэгэн хувилбарыг санал болгож, RQD-ыг ан цав хоорондын зай (joint spacing) эсвэл ан цавын давтамж (fracture frequency)-аар орлуулсан байна. Түүнчлэн, уулын цулын төлөв байдалд нээлттэй ан цаваас гадна чулуулгийн блокийн дотоод согогууд (internal rock block defects) нөлөөлдөг болохыг тогтоосон бөгөөд 2001 онд энэхүү концепцыг шинэчлэгдсэн IRMR/MRMR системд нэгтгэн оруулсан байдаг (Laubscher & Jakubec 2001). Шинэ аргачлал гараад 25 жил өнгөрч байгаа хэдий ч уулын цулын шинж чанарын тодорхойлолт болон тоон загварчлал хийхдээ RQD утгыг өгөгдөл болгон ашигласаар, чулуулгийг хэврэгшүүлэх боломжтой блокийн дотоод согогуудыг тооцож үздэггүй ангиллын системүүд дээр суурилсан хэвээр байгаа нь алдаатай дүгнэлтүүдэд хүргэж байна.



Зураг 5 Уулын цулын агуйлагдах болон бутлагдах үзүүлэлтүүдийг тодорхойлоход чулууны чанарын тодорхойлолт (RQD) ашиглах нь оновчгүй байж болохыг илтгэх жишээ

5.3 Өөрийн нураалт ба урьдчилсан бэлтгэл ажлын дараа нураалт хийх

Гидравлик ан цав үүсгэх (hydraulic fracturing) болон хязгаарлагдмал орчинд хийх тэсэлгээний (confined blasting) аргуудыг 1997 онд Нортпаркс (Northparkes) уурхайд туршилтын шатанд нэвтрүүлж эхэлсэн (van As et al. 2004) бол өдгөө орчин үеийн ихэнх хатуу чулуулгийн нураалтын уурхайнуудын (Эл Тениенте, Зүүн Кадиа, Нортпаркс, Грасберг DMLZ) хувьд стандарт практик болон өргөжжээ. Эдгээр аргууд нь ердийн нөхцөлд нурах боломжгүй чулуулагт нураалтыг эхлүүлэх нөхцөлийг бүрдүүлсэн, бутлалтыг сайжруулсан, Гутенберг–Рихтерийн сейсмик тархалтыг тогтворжуулсан, мөн хүдэр буулгалтын хурдыг нэмэгдүүлэх боломжийг олгосон хэмээн үнэлэгддэг. Гэвч өдгөө салбарын мэргэжилтнүүдийн зүгээс шүүмжлэлтэй хандаж буй нэг асуудал нь, энэхүү техникт гүн гүнзгий найдах асуудал нь суурь физикийн зүй тогтлын хувьд тэр бүр үндэслэлтэй байж чаддаггүй явдал юм. Гидравлик ан цавын чиглэл чулуулгийн өөрийнх нь анхдагч стрессийн орноор (in situ stress field) тодорхойлогддог бөгөөд инженерийн зүгээс үүнийг шууд удирдан чиглүүлэх боломжгүй байдаг тул дизайны анхны зорилго бүрэн хэрэгжихгүй байх талтай. Техник технологийн талаасаа ан цав үүсэлтийн явцыг баталгаажуулахад төвөгтэй, шууд хэмжих боломж хязгаарлагдмал тул микросейсмик хариу үйлдлээс нь хөөн тооцох замаар буюу дам байдлаар ихэвчлэн тодорхойлдог (Orrego et al. 2024). Мөн зарим тохиолдолд стрессийн бууралт (сулрал) үүссэнээр урьдчилсан бэлтгэл ажлын үр дүнг “салхинд хийсгэж” болзошгүй

гэсэн үзэл баримтлалууд ч бий. Урьдчилсан бэлтгэл ажил олон тохиолдолд үндэслэлтэй бөгөөд ашиг тустай байдаг нь тодорхой боловч үүнийг бүх зүйлд тохирох түгээмэл шийдэл мэтээр үзэж болохгүй бөгөөд нарийвчилсан туршилт, зураг төсөлд тулгуурлан шийдвэр гаргах шаардлагатай.

5.4 Туршлага ба тоон загварчлалын аргууд

Эмпирик дүрмүүд ашиглаад асуудлыг шийдвэрлэх боломж шавхагдахад тоон загварчлалд тулгуурлан асуудлыг шийдвэрлэх оролдлогууд хийгдэж эхэлдэг. Нураалтын өрнөл, уулын даралтын шилжилт, хүдрийн буулгалтын үрсгал, сейсмик хариу үйлдлийг өдгөө 20 жилийн өмнө төсөөлөх аргагүй байсан тийм өргөн цар хүрээ, нарийвчлалтайгаар тогтмол загварчилж байна. Загварчлалын техникийн үндэслэл маш хүчтэй: эмпирик хязгаараас давсан гүн болон баганын өндрийн нөхцөлд загварчилсан таамаглалаас өөр сонголт гэж үгүй бөгөөд загварчлал хийхгүй бол ямар ч таамаглалгүй үлдэнэ гэсэн үг юм.

Бүх загварууд буруу байдаг; гол асуудал нь ашиглаж буй тухайн загвар нь тавигдаж буй асуултад хэрэгцээтэй, ашигтай байж чадаж байна уу гэдэгт оршино. Тухайн нэг хүдрийн биетийн түүхэн өгөгдөл дээр суурилсан загварууд нь түүний ажиглагдсан төлөв байдалтай нэлээд сайн тохирдог; харин яг тэрхүү загварыг уг түүхэн өгөгдлөөс үлэмж ангид, тэс өөр нураалтын уурхайд хэрэглэхэд нарийвчлалтай (precise) боловч бодит байдалд нийцэхгүй (not accurate) таамаглалууд гардаг тал бий.

Сүүлийн үед цугласан баримтуудаас бидний авах сургамж бол тоон загварчлалыг бүрмөсөн орхих хэрэгтэй гэсэн үг огт биш, өдгөө дизайн нь хийгдэж буй төслүүдийн гүн болоод цар хүрээг харгалзан үзэх юм бол ингэх ямар ч боломжгүй бөгөөд гагцхүү салбарын зүгээс моделийн үр дүнд хүлээлгэж буй итгэл нь түүнд ашиглагдсан өгөгдөлд хийсэн залруулгатай пропорциональ хамааралтай, тухайн модель зорилгоо биелүүлж байгаа эсэх ба тухайн үр дүнг ашиглах эсэх эцсийн шийдвэрийг туршлагатай инженерүүд гаргадаг байх ёстой. Уурхайн үйл ажиллагаа эмпирик хязгаарын дотор байх тохиолдолд дүрмүүд болон моделиуд хоорондоо тохирох хандлагатай байдаг. Уурхайн үйл ажиллагаа уг хязгаараас хальсан тохиолдолд дүрмүүд нь найдваргүй болж, моделиуд нь калибровкоо алддаг; ийм нөхцөлд инженерийн зүгээс нэмэлт мониторинг хийх, консерватив утгуудыг илүүтэй мөрдөх, мөн моделийг шүүд экстраполяци хийж (хийсвэрлэн сунгаж) ашиглахаас илүүтэйгээр олборлолтыг удаашруулах зэрэг арга хэмжээ авч байх ёстой.

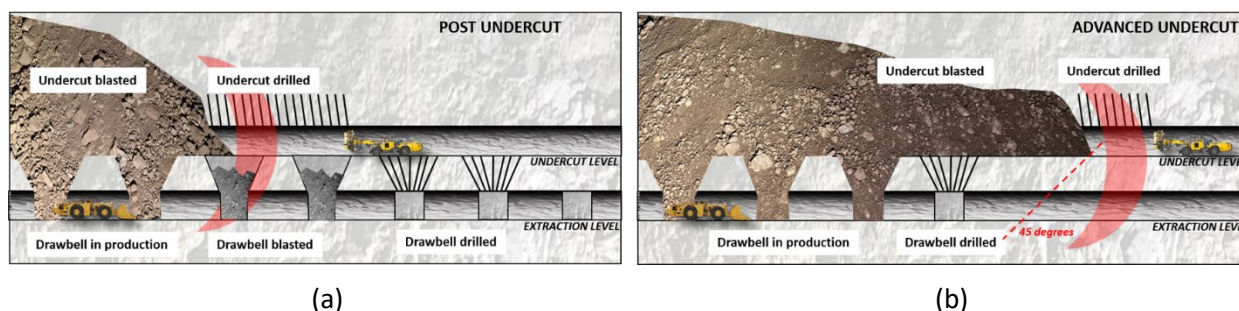
5.5 Буулгалтын бүс болон юүлүүр хоорондын зай

Нураан олборлох арга нь бутармаг чулуулгийг зэргэлдээ орших юүлүүрүүд ашиглан хоорондын харилцан үйлчлэлтэйгээр буулгах (interactive draw) зарчим дээр тулгуурладаг. Хэрэв юүлүүрүүд бие биенээсээ хэт хол байвал энэхүү харилцан үйлчлэл үүсэхгүй бөгөөд юүлүүрүүд нь тэдгээрийн дундах материалыг нөхөн авч чадахгүй болж, бие даасан тусгаарлагдсан буулгалт (isolated draw) бий болно. Гэвч хэрэв юүлүүрүүд бие биедээ хэт ойрхон байвал юүлүүр хоорондын тулгуур багана нураалтын даралтыг тэсвэрлэж чадахгүйд хүрч, тогтворжил алдагдаж болзошгүй. Тулгуур цулын тогтвортой байдал ба харилцан үйлчлэл бүхий буулгалтыг хангах энэхүү эрэлхийлэл нь дизайны үндсэн тулгуур асуултуудын нэг бөгөөд Лаубшер 1990 онд MRMR болон бутлалтын зэрэгт үндэслэн юүлүүр хоорондын зайг тогтоох удирдамж гаргасан. Энэхүү эмпирик удирдамж ерөнхийдөө харьцангуй сул чулуулгийн масс дээр суурилсан байдаг. Сүүлийн жилүүдэд уурхайнууд улам гүнзгийрэхийн хэрээр тулгуур цулын хэмжээг томруулж, тогтвортой байдлыг сайжруулах зорилгоор юүлүүр хоорондын зайг нэмэгдүүлэх хандлага ажиглагдаж байна. Гэвч юүлүүрүүд хэт хол байрлаж, үүний улмаас муу харилцан үйлчлэл болон тусгаарлагдсан буулгалт үүсвэл тулгуур цулд ирэх ачаалал нэмэгдэж, илүү том тулгуур цул ашигласны давуу тал үгүй болох талбай бөгөөд үүний улмаас харилцан үйлчлэл муудахын зэрэгцээ тогтвортой байдал ч мөн алдагдахад хүрдэг. Хүдэр олборлолтын түвшин нь геометрийн хэлбэр дүрсийн

хувьд нарийн төвөгтэй цогц систем бөгөөд тоон загварчлалаар түүнийг, мөн улны огтлоого явагдах үед үйлчлэх хүч, үзүүлэх гэмтэл зэргийг нь найдвартай тодорхойлж чадах эсэх дээр эргэлзээ байсаар байна.

5.6 Түрүүлж ба хоцорч улны огтлоого хийх

Хүдрийн биетийг улаар огтлох (undercutting) хэд хэдэн төрлийн стратеги байдаг хэдий ч сүүлийн үед ашиглалтад орсон өөрийн нураалттай уурхайнуудын ихэнх нь хоцорсон (post) эсвэл түрүүлсэн (advanced) огтлоогоны аргуудын аль нэгийг ашиглаж байна (Зураг 6). Эдгээр хоёр төрлийн улаар огтлох аргын хооронд зарчмын давуу болон сул талууд бий.



Зураг 6 (a) хоцорч огтлох ба (b) түрүүлж огтлох аргууд (Jakubec 2023)

Огтлоогог хоцроож хийх (хүдрийн биетийг улаар огтлох ажил эхлэхээс өмнө хүдэр гаргалтын түвшний юүлүүрүүдийг суурилуулсан байх) нь уулын ажлын төлөвлөгөө гаргахад хамгийн хялбар бөгөөд анхны хүдрийг хамгийн хурдан гаргах боломж олгодог. Учир нь улаар огтлох тэсэлгээгээр бутарсан чулуулгийг огтлолтын ажил эхэлмэгц бэлэн суурилуулагдсан юүлүүрүүдээр шүүд дамжуулан авдаг. Үүний сул тал нь ялангуяа их гүнд ажил явуулж буй уурхайнуудад бат бэх болон уулын даралтын харьцаа (strength-to-stress ratio) тааламжгүй байх тохиолдолд зарчмын хувьд маш ноцтой хүндрэл үүсгэдэгт оршино. Юүлүүрүүд нь бүрэлдэж буй тулгуурын даралтын бүс (abutment-stress envelope) дотор шүүд байрладаг бөгөөд зөвхөн малталтын бэхэлгээ дангаараа үүнээс үүсэх ачааллыг дааж чадахгүй байх талтай. Эвдрэл гэмтэл юүлүүрийн бухын хамар (bullnoses) хэсгээс эхэлж, амсрын (brow) элэгдэл түргэсэж, нурул тасалдах (мүү тэсэлгээнээс үлдсэн цул эсвэл гацсан чулуулаг) эрсдэлийг тухайн хэсэг дээр асуудал үүсэхээс нь өмнө илрүүлж тогтооход хүндрэлтэй байдаг. Эрт үеийн гүехэн, хүндийн хүчний нураалтын уурхайнууд эсвэл Кадиа шиг маш хатуу чулуулагтай уурхайнууд энэхүү горимыг тэсвэрлэж чаддаг байсан; харин харьцангуй сул чулуулгийн масстай орчин үеийн гүний уурхайнуудад энэ систем тохиромжгүй байж болох бөгөөд улны огтлоогог хоцроож хийсний дараа үүссэн гэмтлийг нөхөн сэргээх, засварлах ажил маш өндөр өртөгтэй байхаас гадна олборлолтын талбайн (footprint) үлэмж хэсэг хаагдахад хүргэж болзошгүй.

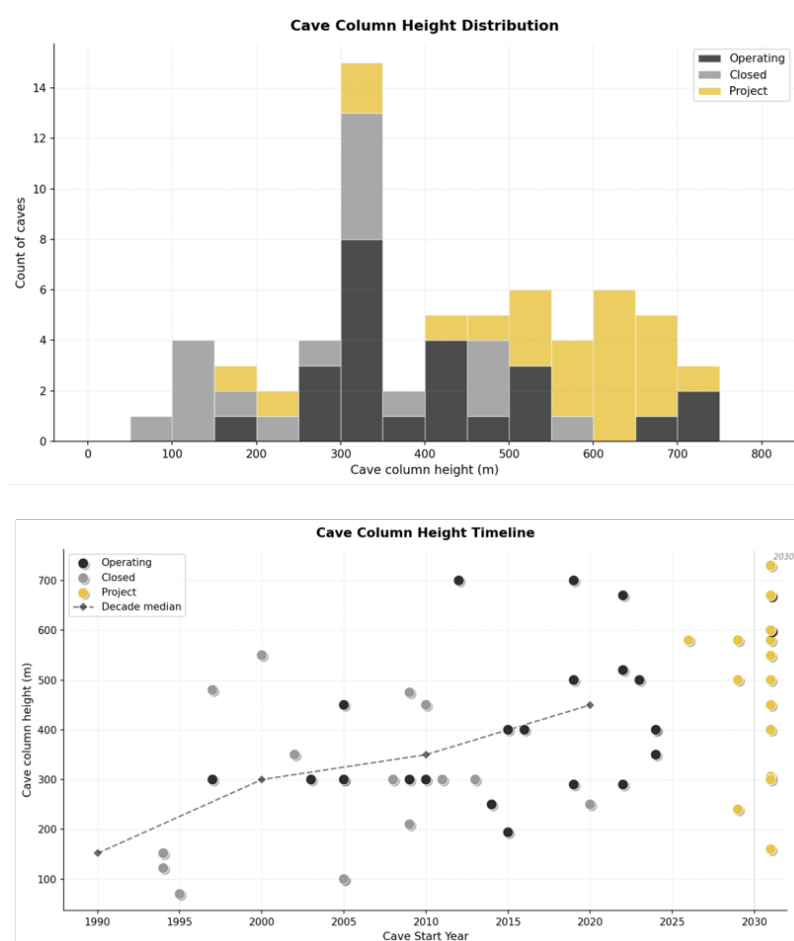
Огтлоогог түрүүлж хийх стратеги баримтлах үед хүдрийн биетийг улаар огтлох ажлыг хүдэр гаргалтын түвшний бэлтгэл малталтаас даруй түвшин хоорондын зайнаас багагүй хэмжээгээр түрүүлж явуулдаг бөгөөд ингэснээр юүлүүрийн амсар болон юүлүүрүүдийг уулын даралтаас аль хэдийн чөлөөлөгдсөн (de-stressed) бүсэд, тулгуурын даралтын фронтын ард байгуулдаг байна. Энэ нь хүдэр гаргалтын түвшний бүрэн бүтэн байдлыг илүү сайн хадгалж, улны огтлоогог хоцроож явуулах үед гардаг засвар үйлчилгээний ажлыг бууруулах буюу бүрмөсөн арилгадаг. Сул тал нь төлөвлөлт хийхэд илүү төвөгтэй: олборлолт ба огтлоого хийж буй хоёр түвшний ажлыг маш нарийн уялдуулан зохицуулах шаардлагатай болдог. Огтлоого хийдэг энэ хоёр стратегийн аль нэгийг сонгохдоо зөвхөн эдийн засгийн үр ашигт тулгуурлаж огт болохгүй.

Улны огтлоогог хоцроож хийх аргыг ихэвчлэн эдийн засгийн давуу талыг нь харгалзан сонгодог боловч чулуулгийн массад учрах эвдрэл гэмтэл болон өндөр өртөгтэй засварын ажлууд нь хэрэгжүүлэлтээс олно гэж тооцсон ашиг тусыг үгүй хийх эрсдэлтэй байдаг.

5.7 Уурхайн талбайн дизайн гаргах уламжлалт ба давшингүй хандлага

Сүүлийн 20 жилийг тодорхойлох дизайны гол хандлага нь уламжлалт консерватив нураалтын геометрээс (дундаж гүнд блокийн өндөр нь 100–300 м байх) илүү давшингүй дизайн уруу чиглэсэн тэмүүлэл байсан бөгөөд: баганын өндөр нь 400 метрээс дээш, зарим тохиолдолд 600 метрт дөхөж очих (Зураг 7), ганц олборлолтын талбайгаас (footprint) өдөрт 50,000–100,000 тонн хүдэр олборлох, панель панелиар нь дарааллуулах биш хүдрийн биетийг бүхэлд нь нэг удаагийн кампанит ажлаар дангаар нь олборлох, мөн уулын цул байгалиасаа өөрөө нурахааргүй байх тохиолдолд урьдчилсан бэлтгэл ажилд найдах зэрэг хамаарна. Үүнийг хөдөлгөгч гол хүчин зүйл нь зонхилон эдийн засгийн үр ашиг байлаа. Илүү том олборлолтын талбайд ашиглалт явуулснаар эдийн засгийн үр ашгийн далайцыг нэмэгдүүлж, илүү өндөр багануудаар нурааснаар ашиглалтын олон давхар барьж байгуулах зардал хэмнэж, олборлолтыг богино хугацаанд дээд хүчин чадалд нь хүргэх замаар эхэн үеийн цэвэр өнөөгийн үнэ цэнэ (NPV)-ийг нэмэгдүүлж, уулын цулыг урьдчилан ан цавшуулах ажлыг өндөр нягтралтайгаар хийснээр хөрөнгө оруулалт нэмэгдэх ч үйл ажиллагааны зардал хямдарснаар нийт зардал буурах зэргээр ажиллаж байна. Үүнийг дагаад эрсдэл ч мөн адил үлэмж хэмжээгээр өсөж байна.

Компаниудын удирдлагуудын зүгээс 2008 онд "10 жилийн дотор 5 супер уурхай олборлолтоо эхлүүлнэ" хэмээн хийж байсан таамаглалууд биелээгүй бөгөөд 15 жилийн дараах байдлаар ердөө ганцхан уурхай л тогтвортой олборлолт явуулж байна. Мөн үйл ажиллагаагаа үргэлжлүүлсэн уурхайнуудын сейсмик идэвхжил болон лаг шаврын урсгалын тохиолдлууд төсөөлж байснаас хамаагүй ноцтой байв. Тиймээс илүү давшингүй дизайн сонгож буй төслүүдийг уурхай тус бүр дээр нь инженерийн шийдлийн үндэслэлийг нь баталгаажуулах шаардлагатай бөгөөд салбарт цугласан мэдээлэлд тулгуурлан, бусад уурхайнууд дээр хэрэгжсэн практик тухайн шинэ уурхай бүр дээр хэрэгжинэ гэж найдалгүйгээр асуудалд хандах шаардлагатай.



Зураг 7 Цаг хугацааны явцад нураалтын баганын өндөр хувьсаж буй нь

6 Дүгнэлт, цаашид анхаарах чиглэл

Нураалтын төслүүд олон арван жилийн турш үргэлжилдэг бөгөөд судалгаа, төлөвлөлтийг салбарын сайн туршлагад (нураалтын дүрмүүд) нийцүүлэн хийж, эхнээс нь тууштай, үнэнчээр хэрэгжүүлж чадвал амжилтанд хүрдэг. Нураалт хэрхэн явагдах нь ажлуудын өрнөл, замналаас хамааралтай (path-dependent): судалгаа, зураг төсөл болон олборлолтын хүчин чадал эзэмших явцад гаргасан шийдвэрүүдийн өөрийн нураалттай уурхайн амьдралын мөчлөгийн турших үйл ажиллагааны үр дүнг тодорхойлоход үзүүлэх нөлөө маш хүчтэй байдаг. Сахилга бат алдагдах тохиолдолд үүсэх хохирол нь зөвхөн тухайн хэсэг газартаа хязгаарлагдан үлддэггүй; уурхайг байгуулах эхэн үед зарим асуудал дээр багахан хэмжээнд буулт хийсэн байлаа гэхэд асуудал нь уурхайн ашиглалтын хугацааны туршид хуримтлагдсаар, яваандаа урт хугацаанд өндөр өртөгтэй нэмэлт ажил ужигруулан хийхээс аргагүй байдалд хүрч, хүдэр авалт муудаж, бохирдол нэмэгдэж, олборлолтын ажлын уян хатан байдал алдагдах зэрэг олон сөрөг үр дагаврууд бий болдог нь бараг л хууль гэж хэлж болно. Тийм атал энэхүү сахилга бат нь арилжааны шахалтад хамгийн амархан өртөж, алдагдах эрсдэлтэй байдаг юм.

Энэхүү зүй тогтол давтагдаж байгаа нь мэдлэгийн хомсдолоос илүүтэйгээр засаглалын асуудал байгааг илтгэж байна. Дараах хэдэн суурь хүчин зүйлс нөхцөл байдлыг улам дэвэргэдэг. Үүнд: төслийн өнөөгийн үнэ цэн (NPV) тодорхойлох аргачлал нь төслийн эхний хэдэн жилд олборлох хүдрийн тоо хэмжээнд ач холбогдол өгөөд, түүнээс хойшхи жилүүдэд устгагдаж үгүй болох нөөцийг олж хардаггүй байдал; давшингүй, шахуу төлөвлөгөөг баталдаг хүмүүс болон дараа нь тухайн нураалтын уурхайг ажиллуулах шаардлагатай болдог хүмүүсийг хооронд нь зааглаж буй арав орчим жилийн цаг хугацааны завсар; корпорацийн багц доторх өртгөө илүү хурдан нөхөх бусад хувилбарууд, төслүүдтэй өрсөлдөх өрсөлдөөн; түүхий эдийн үнийн оргил үеийг амжиж ашиглах болон жилийн төлөвлөгөөт зорилтуудыг биелүүлэх гэсэн шахалт; түүнчлэн шинээр гарч ирж буй мониторинг эсвэл загварчлалын хэрэгслүүдийн тусламжтайгаар бодит байдал дээр шийдэж чадахгүй байгаа тэрхүү эрсдэлүүдийг даван туулж чадна гэсэн гэнэн итгэл үнэмшил түгээмэл байдаг зэргийг дурьдаж болно. Иймээс нураалтын талаарх мэдлэг хангалттай байгаа эсэх гэхээс илүүтэйгээр тухайн байгууллага хүлээн зөвшөөрөгдсөн шилдэг туршлага, удирдамжуудыг тууштай мөрдөх нэгдсэн ойлголт, зохицуулалтыг бүрдүүлж чадаж байна уу үгүй юу гэдгээс тухайн төсөл сүйрэл уруу чиглэх эсэх нь хамаарахаар байна. Салбарын хэмжээнд илүү том, илүү гүн, илүү өндөр бүтээмжтэй бөгөөд илүү нарийн төвөгтэй нураалтын дизайнууд рүү шилжиж байгаа өнөө үед энэхүү харилцан зохицуулалт, нэгдмэл байдал цаашид ч улам бүр чухал болсоор байна.

Талархал

Зохиогчийн зүгээс Алан Гест (Alan Guest), Жош Парсонс (Josh Parsons), Юй-Хан Шү (Yu-Hang Xu) болон Альфина Абдрахимова (Alfina Abdrakhimova) нарын үзүүлсэн туслалцаа, үнэтэй санал сэтгэгдэл болон оруулсан хувь нэмэрт нь гүн талархал илэрхийлж байна.

Мэдэгдэл

Энэхүү бүтээлийг англи эхээс монгол хэл уруу үнэн зөв, чанартай, мэргэжлийн түвшинд орчуулах бүхий л боломжит хүчин чармайлтыг бид гаргасан болно. Гэсэн хэдий ч орчуулагч “Кью Эм Си” ХХК болон ACG нь уг өгүүллийн орчуулгаас үүдэн гарч болох аливаа зөрүүтэй байдал, алдаа ташаа баримт, буруу тайлбартай холбоотой ямар нэгэн үүрэг, хариуцлага хүлээхгүй болохыг мэдэгдэж байна.

Ашигласан материал

African Times 2026, ‘Олон хоног үргэлжилсэн аврах ажиллагааны эцэст Экапа уурхайн 5 ажилчныг амь эрсэдсэн гэж таамаглаж байна’, *African Times*, viewed 4 June 2026, <https://www.atnews.co.za/five-ekapa-mineworkers-presumed-dead-after-days-long-rescue-operation/>

Australian Mining, 2014, ‘Маунт Лиелл уурхайн ажилчин амь эрсдэв’, <https://www.australianmining.com.au/worker-killed-at-mount-lyell-mine/>

Brown, ET 2003, *Блоклон нураалтын геомеханик*, JKMRС -ийн Уул уурхай, эрдэс боловсруулалт чиглэлээрхи монограф цуврал товхимол 3, Julius Kruttschnitt -ийн нэрэмжит Эрдэс судлалын төв, Куйнсландын их сургууль, Брисбэн.

- Butcher, R, Joughin, W & Stacey, TR 2000, *Алмаз ба суурь металын уурхайд лаг шаврын урсгалтай тэмцэх аргууд*, Уул уурхайн ажуулгүй ажиллагааны судалгааны зөвлөх хороонд зориулсан тайлан, SRK Consulting, Johannesburg.
- Canadian Mining Journal, Нью Голдс компаний Нью Афтон уурхайд шаврын гулсалт болж нэг хүний амь эрсдэв, <https://www.canadianminingjournal.com/news/mud-slide-at-new-golds-new-afton-mine-leaves-one-dead/>
- Cuello, D & Whiteman, D 2020, 'Өөрийн нураалттай уурхайн геозердэлүүдийг удирдахад уулын цүлд суурилуулсан геотехникийн тоноглолын гүйцэтгэх үүрэг', in R Castro, F Báez & K Suzuki (eds), *MassMin 2020 хурлын эмхэтгэл: Их хүчин чадлын уурхайн найм дахь удаагийн олон улсын бага хурал, үзэсгэлэн*, Чилийн их сургууль, Сантьяго, pp. 50–61.
- Diamond Fields Advertiser 2026, 'Кимберлид бүх таван уурхайчны цогцсыг гарган авсны дараагаар Экапа уурхайд эрүүгийн хэрэг нээж шалгалт эхлүүлэв', *Diamond Fields Advertiser*, viewed 4 June 2026, <https://dfa.co.za/diamond-fields-advertiser/news/2026-03-23-ekapa-mine-probe-launched-after-all-five-miners-bodies-recovered-in-kimberley/>
- Dunstan, G 2024, 'Куб аргачлал, өөрийн нураалттай уурхайн ирээдүйн шинэ дизайн', in Daniel Johansson & Håkan Schunnesson (eds), *MassMin 2024: Их хүчин чадлын уурхайн олон улсын бага хурал, үзэсгэлэнгийн бүтээлийн эмхэтгэл*, Luleå University of Technology, Luleå, pp. 2–16, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2435_A-01
- Flangas, WG & Shaffer, LE 1960, *Блоклон нураалттай уурхайд цөмийн тэсэлгээг ашиглах нь*, Тайлан UCRL-5949, Lawrence Radiation Laboratory, University of California, Livermore.
- Flores, G & Catalan, A 2019, 'Чилийн Коделко компаний Чукикамата уурхайг том ил уурхайгаас блоклон олборлолтын шинэ "макроблок хувилбар" уруу шилжүүлэх нь', *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 549–561, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.010>
- Freeport-McMoRan 2025, 'Фрийпорт компани ПТ Фрийпорт Индонези дахь уурхайн үйл ажиллагааны талаар шинэчилсэн мэдээлэл өгөв', *Freeport-McMoRan Investor News*, viewed 4 June 2026, <https://investors.fcx.com/investors/news-releases/news-release-details/2025/Freeport-Provides-Update-on-PT-Freeport-Indonesia-Operations-df08fc3a7/default.aspx>
- Gams, P 2023, 'Өрсөөх аргаар өөрийн нураалттай технологи бүхий уурхайн хатуу чулуулаг дахь тулгуур баганад ирэх нөлөөллийн судалгаа', *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, vol. 168, no. 11, pp. 484–496, <https://doi.org/10.1007/s00501-023-01387-8>
- Granger, QP 1992, 'VCR-ийн тусламжтай блоклон нураах — Кимберли уурхайд нэвтрүүлэх боломж', in HW Glen (ed.), *MassMin 1992 Товхимол*, South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, pp. 11–19.
- Hannweg, L, Lorig, L, van Hout, G & Guest, A 2004, 'Koffiefontein уурхайн фронтын нураалт – түүхэн жишээ', in A Karzulovic & MA Alfaro (eds), *MassMin 2004: Дөрөв дэх удаагийн олон улсын их хүчин чадлын уурхайн хурал, үзэсгэлэнгийн товхимол*, Instituto de Ingenieros de Chile, Santiago, pp. 393–396.
- Hardwick, WR 1970, *Хадан чулуулгийг цөмийн тэсрэлтийн хүчээр ан цавшуулж модификаци хийсэн блоклон нураах аргаар хүдрийг олборлох нь*, АНУ-ын дотоод хэргийн яамны дэргэдэх Уул уурхайн товчоо, Вашингтон.
- Heslop, PF 1981, 'Өмнөд Африкийн кризолит шөрмөсөн чулууны уурхайд өөрийн нураалттай технологи хэрэгжүүлэх үеийн хүндийн хүчний нөлөөн дорхи буулгалтын хяналт', in DR Stewart (ed.), *Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines*, Society of Mining Engineers, AIME, New York, pp. 755–774.
- Hidayat, W, Sahara, DP, Widiyantoro, S, Suharsono, S, Riyanto, E, Nukman, M, ... & Putra, IPRA 2024, 'ПТ Фрийпорт Индонези уурхайн Гүн Бүтлүүрын Түвшний Бүс (DMLZ)-д нураалтын өрнөлт ба уулын даралтын тархалтыг хянахад 4D time lapse томорграф төхөөрөмж ашиглах нь', *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, vol. 10, art. 39, <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00718-w>
- Holder, A, Rogers, AJ, Bartlett, PJ & Keyter, GJ 2013, 'Кимберли уурхайн хуучин ашиглаж байсан скрэйпэрийн штректэй блонон нураах уурхайд лаг шавар урсгалыг бууруулах чиглэлээр хэрэгжүүлсэн арга хэмжээ', *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 113, no. 7, pp. 529–537.
- Indonesia Business Post 2025, 'Хөрсний нураалт болсоны дараа Фрийпорт компани Гразберг блоклон нураах уурхайг 2027 онд буцаан бүрэн хүчин чадлаар ажиллуулахаар төсөөлж байна', *Indonesia Business Post*, viewed 4 June 2026, <https://indonesiabusinesspost.com/5322/corporate-affairs/freeport-expects-grasberg-block-cave-to-resume-full-operations-in-2027-after-landslide>
- Inquirer News 2012, 'Бенкүэт уурхайд болсон ослоор уурхайчин амь эрсдэв', *Philippine Daily Inquirer*, viewed 4 June 2026, <https://newsinfo.inquirer.net/553325/miner-killed-in-benguet-mine-mishap>
- Jakubec, J 2023, 'Дэд давхаргаар болон блокоор нураах', in P Darling (ed.), *SME Underground Mining Handbook*, Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Englewood, pp. 193–255.
- Jakubec, J & Laubscher, DH 2012, 'Налуугаар агуйлан олборлох – хэвтээ түвшнээр олборлох аргыг орлох боломжит хувилбар', *MassMin 2012 хурлын эмхэтгэл*, Канадын уул уурхай, металург, газрын тосны институт, Sudbury.
- Jakubec, J, Clayton, R & Guest, AR 2012, 'Лаг шаврын урсгалын эрсдэлийн үнэлгээ', in *MassMin 2012 хурлын эмхэтгэл: 6th International Conference & Exhibition on Mass Mining*, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montréal.
- Jakubec, J & Woodward, R 2020, 'Экати алмазын уурхайд налуу өөрийн нураалт ашиглах нь', in R Castro, F Báez & K Suzuki (eds), *MassMin 2020 хурлын эмхэтгэл: Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining*, University of Chile, Santiago, pp. 195–206.
- Jakubec, J, Hockley, D, Lizcano, A, Thomas, A & Xu, Y-H 2026a, 'Өөрийн нураалттай уурхайд үүссэн гадаргын суултыг буцаан дүүргэх үнэлгээний аргачлал', in A van As, D Cumming-Potvin, J Wesseloo (eds), *Caving 2026: Блоклон ба дэд давхаргаар нураах уурхайн зургаа дахь удаагийн олон улсын хурлын эмхэтгэл*, Австралийн геомеханикийн төв, Перт, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2645_58

- Jakubec, J, Xu, YH & Thomas, A 2026b, 'Өөрийн нураалттай уурхайд үүссэн гадаргын суултыг буцаан дүүргэх нь – судалгааны жишээнүүд', in A van As, D Cumming-Potvin, J Wesseloo (eds), *Caving 2026: Proceedings of the Sixth International Conference on Block and Sublevel Caving*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2645_57
- Janelid, EI 1975, Хүдэр, чулуулгийг блоклон агуйлах зарчимд тулгуурлан массаар нь олборлох арга, АНУ Патент # 4,072,352, <https://patents.google.com/patent/US4072352A/en>
- Jude, CV 1990, 'Механикжуулсан утгуурт ачигч бүхий малталтаар улны огтлогоо хийх ашиглалтын технологид хийсэн структур анализ', in WA Hustrulid & GA Johnson (eds), *Rock Mechanics Contributions and Challenges: Proceedings of the 31st US Symposium on Rock Mechanics*, Balkema, Rotterdam, pp. 537–544.
- Karlsson, M, Ladinig, T & Grynienko, M 2022, 'Өгсөөн нураан олборлолтын технологи бүхий туршилтын уурхай: концепцийг баталгаажуулах нэг удаагийн боломж уу?', in Y Potvin (ed.), *Caving 2022: Proceedings of the Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 667–682, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2205_46
- Ladinig, T, Wagner, H, Karlsson, M, Wimmer, M & Grynienko, M 2022a, 'Өгсөөн нурааж олборлох — өөрийн нураалттай их гүнд үйл ажиллагаа явуулах уурхайд тулгарч буй асуудлуудыг шийдвэрлэх гибрид ашиглалтын арга', *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, vol. 167, no. 4, pp. 177–186, <https://doi.org/10.1007/s00501-022-01217-3>
- Ladinig, T, Wimmer, M & Wagner, H 2022, 'Өгсөөн нурааж олборлох: их гүнтэй их хүчин чадлын далд уурхайд зориулсан шинэ технологи', in Y Potvin (ed.), *Caving 2022: Proceedings of the Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 651–666, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2205_45
- Laubscher, DH 2000, *Блоклон нураах аргын практик гарын авлага*, бэлтгэсэн Олон Улсын Өөрийн Нураалттай Ашиглалтын Судалгаа (1997–2000), Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre and Itasca Consulting Group, Brisbane.
- Laubscher, DH & Jakubec, J 2001, 'Ан цавшил бүхий уулын цулын ангиллын IRMR/MRMR систем', in WA Hustrulid & RL Bullock (eds), *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, pp. 475–481.
- Laubscher, DH, Guest, A & Jakubec, J 2017, Өөрийн нураалттай олборлолтын аргачилсан заавар: *Суурь зарчмууд*, WH Bryan Mining and Geology Research Centre, The University of Queensland, Brisbane.
- LKAB 2020, 'Кируна уурхайд 5-р сарын 18нд болсон чичирхийлэлд дүн шинжилгээ хийгдэж дүүслаа', *LKAB компаний хэвлэлийн мэдээ*, viewed 4 June 2026, <https://lkab.com/en/news/analysis-of-the-seismic-event-in-kiruna-on-may-18th-completed/>
- Mawson, M, Dahnér-Lindkvist, CR, Andersson, UB, Thomas, A & Bäckström, A 2022, 'Кирунаа уурхайд үүссэн чичирхийлэл: геотехникийн модель хийсэн чухал ажиглалт', in Y Potvin (ed.), *Caving 2022: Proceedings of the Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 1091–1100, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2205_75
- Mining 2025, *Фрийпортын Гразберг уурхайд сураггүй болсон бүх ажилчид амь эрсэдсэн байна*, <https://www.mining.com/all-missing-workers-found-dead-at-freeports-grasberg-mine/>
- Mining Review Africa 2026, 'Экапа уурхайгаас нэг цогцос гарган авлаа: эрэн хайж авлах ажиллагаа үргэлжилж байна', *Mining Review Africa*, viewed 4 June 2026, <https://www.miningreview.com/news/one-body-recovered-at-ekapa-mine-rescue-efforts-continue/>
- Mining Magazine 2022, *Перугийн уурхайд лаг шавар урсаж гурван хүн амь алдав*, <https://www.miningmagazine.com/underground/news/1439509/mudslide-kills-peru>
- Mining Technology 2025, 'FT Live: Эл Тэниентэ уурхайд нуралт болов "шинэ феноменон" — Коделькогийн ТУЗ дарга', *Mining Technology*, viewed 4 June 2026, <https://www.mining-technology.com/news/ft-live-el-teniente-mine-collapse-a-new-phenomenon-codelco-chairman/>
- Mining Weekly 2026, 'Чилийн эс олборлогч Коделко, гамшиг дагуулсан нуралт болсоны дараа гэрээт компаниудад торгууль тавив', *Mining Weekly*, 13 April 2026, viewed 4 June 2026, <https://www.miningweekly.com/article/chilean-copper-miner-codelco-contractors-fined-after-deadly-mine-collapse-2026-04-13>
- Monis, JA 2026, 'Падкал уурхайн гадаргад үүссэн суултыг буцаан дүүргэх ажиллагаа: блоклон нураах уурхайн онцгой тохиолдол', in A van As, D Cumming-Potvin, J Wesseloo (eds), *Caving 2026: Proceedings of the Sixth International Conference on Block and Sublevel Caving*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2645_59
- Newcrest Mining Limited 2017, *Австралийн хөрөнгийн биржийн мэдээ: Кадиа уурхайн үйл ажиллагаа*, 27 April 2017, Melbourne, <https://announcements.asx.com.au/asxpdf/20170427/pdf/43hrv6bkmmzfkf.pdf>
- Newcrest Mining Limited 2019, *Кадиа уурхайн хаягдлын сангийн эксперийн үнэлгээ — Бие даасан хөндлөнгийн шинжээчдийн хорооны тайлан*, Мелбурн, https://s24.q4cdn.com/382246808/files/doc_news/2019/04/News-Release-1699390465077429.pdf
- Newmont Corporation 2026a, 'Кадиа уурхайн үйл ажиллагааны талаархи шинэчилсэн мэдээ', *Newmont Corporation Investor News*, viewed 4 June 2026, <https://www.newmont.com/investors/news-release/news-details/2026/Update-on-Cadia-Operations-2026-YTUpXnFfd8/default.aspx>
- Newmont Corporation 2026b, 'Шинэчилсэн мэдээ: Кадиа уурхайн орчимд болж буй чичирхийлэл', *Newmont Corporation Investor News*, viewed 4 June 2026, https://www.newmont.com/investors/news-release/news-details/2026/Update-Seismic-Activity-Near-Cadia-2026-YYdIE7_lkv/default.aspx
- News24 2026, 'Сураггүй болсон 5 уурхайчин амь үрэгдсэн гэж үзэж буй Экапа алмазын уурхайг хаав', *News24*, viewed 4 June 2026, <https://www.news24.com/southafrica/news/5-missing-miners-presumed-dead-as-ekapa-diamond-mine-shuts-down-20260225-1151>
- Orrego, C, Viegas, G, Tennant, D & Stonestreet, P 2024, 'Хувьсан өөрчлөгдөж буй блоклон нураалттай уурхай дахь чичирхийллийн аюулын геологи ба түүхэн мэдээлэлд тулгуурласан тоон шинжилгээ', in P Andrieux & D Cumming-Potvin (eds), *Deep*

- Mining 2024: Proceedings of the 10th International Conference on Deep and High Stress Mining*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 1179–1192, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2465_77
- Rodríguez, W, Vallejos, JA & Jaque, M 2026, 'Их гүн дэх өндөр даралт дор байгуулсан малталтад чулуулаг өөрөө тэсрэх үзэгдлийн учир шалтгаанд дүн шинжилгээ хийх аргачлал: Коделкогийн Эл Тэниэнтэ уурхайн Анде Норт төслийн туузан конвейерийн түнэль малталтын жишээн дээр хийсэн судалгаа', *Applied Sciences*, vol. 16, no. 3, art. 1616, <https://doi.org/10.3390/app16031616>
- Roy, J, Primadiansyah, A, Eberhardt, E & Bewick, R 2022, 'Их гүнд байрших өөрийн нураалттай уурхайд үүсэх тулгуурын ачаалал: их даралтын дор чулуулаг өөрөө тэсрэг чанарыг танин мэдэх нь', in Y Potvin (ed.), *Caving 2022: Proceedings of the Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 1121–1134, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2205_77
- Russell, PL 1964, *Ил уурхай — цөмийн тэсэлгээний хүчээр хөрсний чулуулгийг хуулах нь*, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York.
- SBS News 2019, 'Тас уурхайд хөнөөл дагуулсан лаг шаврын урсгал үүсэхийн өмнө гарч байсан асуудлууд', *SBS News*, viewed 4 June 2026, <https://www.sbs.com.au/news/concern-before-fatal-tas-mine-mud-rush>
- Stevens, CR, Sandbak, LA & Hunter, JJ 1987, 'Сан Мануэл уурхайн LHD олборлолт ба дизайны сайжруулалт', in IW Farmer, JJK Daemen, CS Desai, CE Glass & SP Neuman (eds), *Proceedings of the 28th US Symposium on Rock Mechanics*, Balkema, Rotterdam, pp. 1175–1185.
- The Oregon Group 2025, 'Гразберг уурхайд гамшиг дагуулсан лаг шаврын урсгалын дараа Фрийпорт компани форс мажор зарлав', *The Oregon Group — Critical Minerals and Energy Intelligence*, viewed 4 June 2026, <https://theoregongroup.com/commodities/copper/freeport-declares-force-majeure-at-grasberg-after-deadly-mud-rush/>
- van As, A & Guest, A 2020, 'панель болон блоклон нураалттай уурхайн дизайн ба үйл ажиллагааг удирдах философи', in R Castro, F Báez & K Suzuki (eds), *MassMin 2020: Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining*, University of Chile, Santiago, pp. 207–220, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2063_10
- van As, A & Jeffre, RG 2000, 'Нортпарк уурхайд нураалтыг өдөөх зорилгоор гидравлик ан цав үүсгэлт ашиглах нь', *Proceedings of MassMin 2000*, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, pp. 165–172.
- Webster, S, Samosir, E & Wyllie, A 2020, 'Нортпарк уурхайн нураалтын талбайн өргөтгөлийн сургамж ба ирээдүйн нураалттай уурхайнуудын үнэ цэнийг нэмэгдүүлэх шинэ технологи', in R Castro, F Báez & K Suzuki (eds), *MassMin 2020: Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining*, University of Chile, Santiago, pp. 92–102, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2063_01
- Weiss, PF 1981, 'Хүнд нөхцөлд блоклон нураалт хийх уурхайг бүтээн байгуулах систем', in DR Stewart (ed.), *Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines*, American Institute of Mining, Metallurgical New York, pp. 143–146.