

ДАХИН БОЛОВСРУУЛСАН АСФАЛЬТБЕТОН ХОЛЬЦЫН ХИМИЙН БОЛОН ЭРДСИЙН БҮТЭЦ, НАЙРЛАГЫН СУДАЛГАА

Д.Энхбаатар^{1*}, М.Цэцгээ¹, Б.Болд¹, Э. Эгшиглэн², Д.Ганбилэг², Ч.Ганзориг^{2**}

¹ШУТИС, Барилга архитектурын сургууль, Барилга инженерийн салбар

²МУИС, Хэрэглээний шинжлэх ухаан инженерчлэлийн сургууль, Хими, биологийн инженерчлэлийн тэнхим, Нано шинжлэх ухаан, нанотехнологийн төв

Received on 2020.12.02; revised on 2020.12.19; accepted on 2020.12.25

Холбоо баригч зохиогч: *uilsiinzam@gmail.com; **ganzorig.ch@seas.num.edu.mn

Хураангуй

Монгол орны замын эвдрэлээс нь хамааруулан бүсчилсэн 2 байршлаас замын суурийн үе болон шинээр зам тавихад ашиглаж буй дахин боловсруулсан хольцын химийн болон эрдсийн бүтэц, найрлагыг харьцуулан судлав. Дээжүүдийн элементийн агуулгыг ICP-OES, EDS болон XRF, гадаргуугийн бүтэц морфологийг SEM, эрдсийн бүтэц найрлагыг XRD, ширхэглэлийн бүрэлдэхүүний тархалтыг TMA анализын аргуудаар тодорхойлсон. Дээж бэлтгэлийг хатаагч, ялгаатай 2 хэмжээст бутлуур болон нунтаглагч ашиглан ширхэглэлийн бүрэлдэхүүний тархалтыг тодорхойлоход дундаж хэмжээсийн утга 83.9 μm байсан.

Туршилтад сонгосон дээжүүдэд нийт 42 элементийн агуулга, 21 эрдсийн бүтэц найрлагыг тодорхойлсон. Чанарын болон тоон шинжилгээний анализын үр дүнг боловсруулан хөрсний элементийн болон эрдсийн тодорхойлогдсон нийт агуулгаар тооцоход дээжүүдэд 5.31% алдаа бүхий 96.11% дундаж утгатай байсанг тогтоосон. XRD анализын дүнд 6% цементээр бэхжүүлсэн хольцын найрлагад алит, белит, морденит, хлорит шинээр илэрч, харин кварц, кальцит, гөлтгөнө нэлээд хувиар ихсэж гарсан нь дүүргэгч материалын гадаргууг гидратжих урвалаас үүссэн нэгдлүүд бүрхэн цементэн төст хагас-байгалийн төрхтэй болсон болсон гэж тодорхойлов.

Эвдрэлтэй замын хуучин суурийн материалыг дахин боловсруулан асфальтбетон хучилт бүхий шинэ зам тавихад ашиглахдаа цементийг бэхжүүлэгчээр ашигласан нь хольцод гидратжих болон пуццоланы урвал явагдсан байх боломжит механизмыг кварц, альбит, анортит болон хлорит эрдсүүдийн эзлэх хувь мэдэгдэхүйц их хэмжээгээр нэмэгдсэн ба мөн дээжүүдэд гематит болон магнетит эрдсүүдийн агуулга эрс багасаж гарсан судалгааны үр дүнтэй холбон тайлбарлав. Энэ дүгнэлт нь нунтаг эрдсийн мөхлөг болон дүүргэгчийн хооронд гидратжих болон пуццоланы урвал дараалан явагдаж хөрсөнд цементэн төст болон пуццоланы нэгдлүүд үүссэн байх таамаглалыг дэвшүүлэв.

Түлхүүр үг: Дахин боловсруулсан асфальтбетон хучилт, суурийн үе, цемент бэхжүүлэгч, минералогийн анализ, эрдсийн мөхлөг, гидратжих урвал, пуццоланы урвал

1. Удиртгал

Байгаль орчны асуудлууд тулгамдаж буй энэ цаг үед дахин ашиглах, дахин боловсруулах, хэрэглээг танах зэрэгт анхаарал хандуулах болсон (VicRoads, 2011). Үүний адилаар элэгдэл хорогдолд орж хуучирч гэмтсэн замын материалыг дахин боловсруулан шинэ зам тавих ажилд ашиглах нь олон улсад үр өгөөжөө өгч, боловсронгуй болон тэлсээр байна (Verma *et al.*, 2017). Уг технологи нь өндөр температур шаарддаг өртөг ихтэй уламжлалт аргыг халж хуучин замын материалыг бэхжүүлэн шинэ замын материалаар ашигладаг хүйтнээр дахин боловсруулах (ХДБ) арга юм (Thives & Ghisi, 2017). Эвдрэл үүссэн замын

хучилтын болон суурийн үеийн бутлан нийлмэл хольц үүсгэн шинээр хучилт болгон ашиглаж буйг дахин боловсруулсан асфальтбетон хучилт (ДБАХ) гэнэ (Wirtgen, 2012b).

Зам засварын ажилд тухайн бүсийн цаг уур, элэгдэл хорогдолд тэсвэртэй материалыг зөөвөрлөхөөс илүүтэйгээр тухайн бүс нутгийн байгалийн хөрсийг инженерийн материал болгон ашиглах нь өртөг зардлыг хэмнэсэн сонгогдсон арга юм (Xiao *et al.*, 2018). ХДБ арга нь олон улсад ашиглагдсан судалгаа шинжилгээ, туршлагаар баялаг боловч тухайн орны цаг уурын байдал, байгалийн хөрсний шинж чанарт тулгуурладаг нь улс бүрд ижил орц найрлага, стандартаар зам

засварын ажлыг гүйцэтгэх боломжгүйд хүргэдэг (Loo *et al.*, 2005). Замын материалын шинж чанар түүнийг бүрдүүлэгч байгалийн хөрс, дүүргэгч материал, бэхжүүлэгчийн шинж чанараас хамаарна (Thakur & Nan, 2015).

Хөрс нь үндсэн 4 бүрдэл болох эрдсийн мөхлөг (~45%), органик бодис (~5%), сүвэрхэг орон зай ус (~25%) болон хийгээр (~25%)-ээр дүүргэгдсэн байгалийн чулуулаг хольц юм. Ихэнх чулуулгийн сүвэрхэгжилт ~1-40% байх ба энэ нь эрдсийн найрлага, мөхлөгийн хэмжээс, орон зайн бүтэц зэргээс хамаардаг. Чулуулгийн өгөршлөөс болж эрдсийн мөхлөгүүд нь хатуу фаз бүхий хөрсний дүүргэгч материалыг бий болгоно (Desconhecido, 2012). Хөрс нь физик болон химийн найрлагаар харилцан адилгүй хэдий ч инженерийн зориулалтаар нь үндсэн 6 (бул чулуу, чулуулаг, хайрга, элс, лаг, шавар) төрөлд ангилна (Zhang *et al.*, 2015).

Хөрсний материал гэдэг нь дээр дурдсан төрлүүдийн янз бүрийн агуулгаас бүрдсэн хольц юм. Хөрс нь хөрсний төрлүүдийн тодорхой хувь болон ус, агаараас бүрдэнэ (Of, 1983). Хөрсний материал хэт их хоосон орон зай буюу нүхсүвшилттэй үед тогтвортой байдлаа алддаг. Шаврын эрдсийн геометр бүтцүүд нь цахиурын тетраэдр (Т), хөнгөнцагааны октаэдр (О) болон бүтэц хоорондын завсрын үе (I, interlayer) гэсэн тодорхой зүй тогтолтой нэгдлээс бүрддэг. Бүтцүүд хоорондох завсрын үе нь илүүдэл сөрөг цэнэгийг чөлөөт катион ионоор саармагжуулах, эсвэл бүтцүүд хооронд байх орон зайг катион болон усны молекулаар эзэлж тэлэлт үүсгэдэг (Barton & Karathanasis, 2002). Тэлэлт үүсгэдэг шаврын эрдсүүд шинж чанараа амархан алддаг, бат бэх шинж чанар багатай байна (Ochieng, 2016).

ХДБ технологийн үед дахин боловсруулж буй материал дээр бэхжүүлэгчийг нэмэлтээр хийснээр дүүргэгчийн салангид жижиг хэсгүүдийг холбон барьцалдуулах, бат бэх, хатуурлыг нэмэгдүүлэх, замын суурийн материалыг ус болон эдэлгээнд тэсвэртэй байх физик механик шинж чанарыг сайжруулах үүрэгтэй (Matsumoto *et al.*, 2017). Бэхжүүлэгч нь эрдэст ба органик гэж ангилагдах ба хэрэглэх хүрээнээс хамааран ялгаатай үүргүүдийг гүйцэтгэдэг (Xiao *et al.*, 2018). Түүнчлэн бэхжүүлэгч нь авто замын материалд үзүүлж буй ачаалал даралтаас хамаарсан хэв гажилт, хагарал үүсэх эрсдэлийг бууруулна (Adlinge & Gupta, 2009), (Wirtgen, 2012a). Бэхжүүлэгчид дотроос цементэн бэхжүүлэгчийн хүртээмж болон өртгийн

хувьд давуу байдал нь өргөн хүрээнд хэрэглэх гол шалтгаан ба дахин боловсруулах материалын бат бэхийг сайжруулахад үнэтэй түлхэц болдог (Taha *et al.*, 2002) бол портланд цементэн бэхжүүлэгч нь замыг ус болон байнгын хэв гажилтад тэсвэртэй болгодог (Xiao *et al.*, 2018).

Цемент нь оксидуудаас бүрэлдэх ба химийн томъёог дараах байдлаар тэмдэглэдэг. Үүнд, $\text{CaO} = \text{C}$; $\text{SiO}_2 = \text{S}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$; $\text{SO}_3 = \text{S}$; $\text{H}_2\text{O} = \text{H}$; $\text{Ca}_3\text{SiO}_5 = \text{C}_3\text{S}$; $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 = \text{C}_2\text{S}$; $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 = \text{C}_3\text{A}$; $\text{Ca}_2(\text{Al}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{O}_5 = \text{C}_2\text{AF}$; $\text{Ca}_4(\text{AlO}_2)_6\text{SO}_3 = \text{C}_4\text{A}_3\text{S}$; $\text{Ca}_x\text{SiH}_y\text{O}_{(x+2+y)} = \text{C-S-H}$; $\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CH}$ гэж тэмдэглэнэ. Цементээр хөрсийг бэхжүүлэх үед шинж чанар сайжирсан нь голчлон гидратжих урвал явагдсантай холбоотой гэж үздэг (Mohamed Sutan *et al.*, 2018).

Монгол орны байгаль орчин, цаг уурын онцлог шинж чанарт тэсвэртэй замын материалын найрлагыг зөв оновчлох, түүнийг бүрдүүлэгчдийн шинж чанарыг тодорхойлох нь тулгамдаж буй асуудал болоод байна. Монгол орны хөрсөн бүрхэвч нь уулын ой тайга, өндөр уул, хээр, говь, цөлийн бүсийн онцлогоос хамаарч, олон янз байх ба ерөнхийдөө чулуулаг, органик агууламж багатай, шүлтлэг хөрс давамгайлна. Говь, цөлийн бүсийн хөрс бусад бүсийн хөрснөөс ихээхэн ялгаатай бөгөөд ялзмагт хуримтлалын давхаргагүй, чулуулаг болон гөлтгөнө, карбонатын хуримтлал ихтэй байна (*Эвдэрсэн газрыг нөхөн сэргээх болон аж ахуйн эргэлтэд оруулах чиглэл*, 2015).

Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд Монгол орны цаг уур, газарзүйн өөр байрлалд элэгдэл хорогдолд орсон замын хучилтын доод үе (хуучин суурийн үе) болон хүйтнээр дахин боловсруулсан асфальтбетон хольцын дүүргэгч материалын химийн болон минералогийн судалгаа, эрдсийн мөхлөгт явагдах урвалын механизмыг тайлбарлахад гол зорилго оршино.

2. Туршилтын хэсэг

2.1 Дээж бэлтгэл

Монгол орны замын эвдрэлээс нь хамааруулан бүсчилсэн бүсчлэлээс дээж сонгож авсан. Тухайлбал 2-р бүс болох Улаанбаатар-Арвайхээр (УБ-АХ) 384 км, 3-р бүс болох Таван Толгой-Гашуунсухайт (ТТ-ГШ) 239 км дэх зам засварын ажлын талбайгаас тус тус хуучин суурийн (ХС) болон ДБАХ хольцыг дээжлэн авсан.

- Дээж А: УБ-АХ чиглэлийн авто замын хуучин суурь

- Дээж Б: УБ-АХ чиглэлийн авто замын ДБАХ
- Дээж В: ТТ-ГШ чиглэлийн авто замын хуучин суурь
- Дээж Г: ТТ-ГШ чиглэлийн авто замын ДБАХ

(А-Г) дээжид химийн болон минералогийн шинжилгээнд бэлтгэхдээ агаараар хатаах зууханд 105°C -т 60 минутын турш чийгшлийн хэмжээг арилгаж, 2 төрлийн бутлуур болон нунтаглагчид шилжүүлсэн. Анхны ба нунтагласан дээжийг Зураг 1-г үзүүлэв.



Зураг 1. Сонгож авсан бүсчлэлийн дээж: (А) Дээжийн анхны зураг; (Б) Нунтаглаж бэлтгэсэн дээж

2.2 Шинж чанарын судалгаа

Энэ судалгааны ажлын арга зүйгээр сонгож авсан дээжүүдэд химийн болон гадаргуугийн физик багажит анализын аргаар хэмжилтүүдийг хийж гүйцэтгэсэн (Зураг 2).



Зураг 2. Туршилтад сонгосон дээжүүдэд эрдсийн бүтэц, найрлага, физик химийн шинж чанарыг тодорхойлоход ашигласан судалгааны арга зүй

Химийн болон гадаргуугийн физик шинжилгээ дундаас ICP-OES (Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry) аргаар дээжийн найрлага дахь элементийн агуулгыг тодорхойлохдоо 4 (HF - HClO_4 - HNO_3 - HCl) хүчлийн задаргаа хийж, уусмал хэлбэрт шилжүүлсэн. Уг хэмжилтийг “Ханлаб” ХХК-ийн Эрдэс судлал, орчны лабораторт дээж бэлтгэлийн хамт хийж гүйцэтгэсэн. Тухайлбал

бүрэн задаргаа буюу 4 хүчлээр задлах аргаар (А) ба (В) дээжээс 0.5 гр жинлэн авч концентрацтай 6 мл HNO_3 , 5 мл HCl , 4 мл HF болон 70% концентрацтай HClO_4 хүчлүүдээр дараалан уусгаж задалсан. Хүчилд уусгасан дээжийг 24 цагийн турш урвал бүрэн явагдсаны дараа 90 - 250°C хязгаарт чийглэг давсны байдалтай болтол ширгээж дараа нь концентрацтай 5 мл HCl хийж бага зэрэг хөргөн 50 мл нэрсэн усаар шингэлж бэлтгэсэн.

Эрдсийн бүтэц, найрлагыг тодорхойлохдоо рентген дифракц (XRD, X-ray diffraction) анализын багажийг ашигласан. Дээжийн бүтэц найрлагыг зэс анод ($1.541874 \text{ \AA}$)-той, 40 кВт чадалтай, 30 мА гүйдлийн хүчтэй байхаар тохируулж, 20 өнцгийн 10.00 - 90.00° өнцгийн мужид 0.02° өнцгийн алхамтайгаар тасалгааны температурт Японы “Shimadzu Maxima 7000” маркийн рентген дифракцын анализатор ашиглан ШУА-ийн харьяа Физик технологийн хүрээлэнгийн багажит анализын лабораторт хэмжсэн.

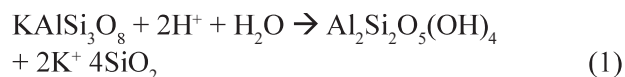
Дээжийн бүрэлдэхүүн хэсэг хоорондын химийн урвалаар үүссэн микро-хэмжээст дэх эрдсийн найрлага, гадаргуугийн хэлбэр, морфологийн судалгааг сканнинг электрон микроскоптой хосолсон энергийн дисперсийн рентген спектроскоп (SEM-EDS, Scanning electron microscopy with electron dispersive X-ray spectroscopy) аргаар тодорхойлж, уг хэмжилтийг ШУТИС-ийн Хээрийн судалгааны лабораторт хийж гүйцэтгэсэн.

Эрдсийн бүтэц, найрлагыг XRD болон рентген флуоресценц (XRF, X-ray fluorescence) спектрометрийн аргаар нарийвчлан тодорхойлсон болно. Микро- болон мезо-хэмжээст дэх эрдсийн фаз болон мөхлөг хоорондын зураглалыг буулгах, эрдсийн чөлөөлөгдсөн партикл хэсгийн мөхлөгт минералогийн шинжилгээг хийдэг бүрэн автомат эрдсийн анализын шинэ арга болох TMA (Tescan integrated mineral analyzer)-аар (Г) дээжид хэмжилтийг Эрдэнэт үйлдвэр ТӨҮГ-ын дэргэдэх Туршилт, судалгааны төвд хийж гүйцэтгэсэн.

2.3 Гидратжих болон пуццоланы урвал

Цементээр бэхжүүлсэн дээжид судалгаа шинжилгээ хийсэн нь уг процесст гидратжих болон пуццоланы урвал явагдсан байх боломжит механизмыг судлахад чиглүүлнэ. Хөрсний чулуулаг устай үйлчилж шаврыг үүсгэдэг. CO_2 хий усанд уусаж карбоны хүчил үүсгэнэ. Жишээ нь,

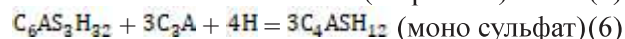
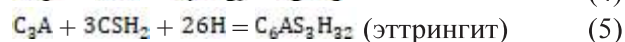
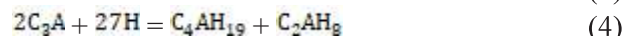
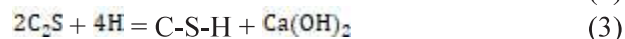
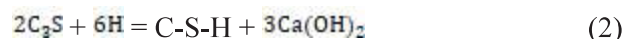
устөрөгчийн болон бикарбонатын ионууд болж, усыг бага зэрэг хүчиллэг болгоно. Хүчиллэг ус нь чулуулгийн гадаргуутай урвалд орж хээрийн жоншны эрдсээс калийн ион болон SiO_2 ууссаны үр дүнд шаврын эрдэс каолинит үүсдэг.



Устөрөгчийн ион нь катионуудыг чөлөөлж өгдөг.

Гидратжих урвалыг авч үзвэл цементийн найрлага болох C_3S , C_2S , C_3A , C_2AF бүхий нунтаг эрдсийн мөхлөгүүд усанд уусаж эзлэхүүн ихтэй мөхлөгүүд нь хоорондоо холбогдсон C-S-H гидрат төлөвийг үүсгэдэг. Ca^{2+} , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^-$, OH^- , SO_4^{2-} ионуудын оролцоотой урвал явагдсанаар үндсэн бүтээгдэхүүн болох C-S-H (~45-48%), CH (~11-14%), AFt (эттрингит) (~4%), AFm (алюминатын моно феррит) (~9-11%), нүхсүвшил (~14-16%), үл гидратжсан цемент (~3%) болон бусад (~4%) хольц бүхий материал үүсэж хатуу гидратын эзлэхүүн ихэсдэг.

Цементийн гидратжих урвал нь дараах ерөнхий тэгшитгэлийн дагуу явагдаж цементэн нэгдлийг үүсгэдэг.



Энэ үед тодорхой хэмжээний кальцийн гидроксид буюу CH (портландит) урвалд ороогүй үлддэг. Тодорхой чийгийн орчинд үлkdсэн CH дээр SiO_2 болон пуццоланы эрдэс агуулсан материалыг нэмэлтээр хийснээр бат бэх шинж чанарт гол хувь нэмэр оруулдаг C-S-H гидрат ахин үүсгэнэ. Энэ процессыг пуццоланы урвал гэж нэрлэдэг.

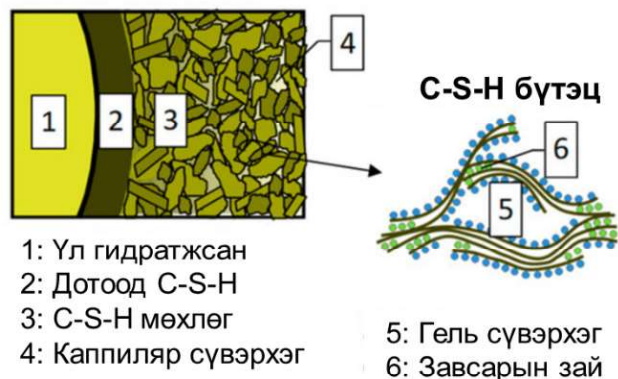
CH илүүдэлтэй үед хөрс эсвэл усанд агуулагдах сульфаттай урвалд орж гөлтгөнө ($\text{CaSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) үүсдэг ба энэ нь эх материалын чанарт сөргөөр нөлөөлдөг. Үүнийг “сульфатын дайралт” гэж нэрлэдэг бөгөөд урвал явагдахаас сэргийлэхийн тулд маш сайн хольж нунтагласан үнс, цахиурын оксид болон пуццолан материалыг ашиглана. Хөрсний орчин нэлээд шүлтлэг байсан тохиолдолд дараах урвал явагдана.



Кальцийн ионууд нь шаврын оронг торд ууссан силикат болон алюминаттай нэгдэж

нэмэлт пуццолан материал болох C-S-H, C-A-H нэгдлүүдийг үүсгэдэг. Үндсэн механизм нь хөрсөн доторх усаар дамжуулан алюминат болон силикатын эсвэл эдгээрийн холимог шаварлаг эрдэст кальцийн гидроксидыг дамжуулан зөөвөрлөх явдал юм. Гадаргуугийн талбай ихтэй алюминат болон силикатын эрдсүүд нь пуццолан фазууд болохоос гадна ус болон шүлт (жишээлбэл, кальци) оршин байхад кальцийн силикат, алюминат гидрат агуулсан цементэн эрдсүүдийг үүсгэдэг.

Пуццоланы урвал нь хэдэн сараас хэдэн жилийн урт хугацааны туршид явагддаг. C-S-H болон C-A-H хатуу гидратжсан холбоос үүссэнээр цементээр бэхжүүлсэн хөрсний бат бэх шинж чанарыг хангах гель болж өгдөг. Цементийн бат бэхээ авах хугацаа нь нэг өдрөөс нэг сарын хугацаанд үргэлжилдэг бол жижиг мөхлөгүүдийн бат бэхээ авах хугацаа нь мөн удаан үргэлжилдэг (Зураг 3).



Зураг 3. Пуццоланы урвалаас үүссэн партиклийн болон C-S-H гелийн бүтцийн бүдүүвч

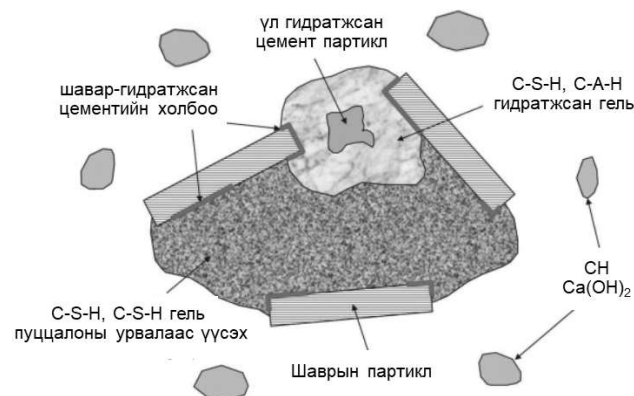
Пуццоланы урвал нь хөрсийг бэхжүүлэх хоёрдогч процесс юм. Хөрсийг цементээр бэхжүүлэх явцад хөрсний pH их үед силикат болон алюминат нь шаврын партиклтай нэгдэх чадвар нэмэгддэг. Эрдсийн талсжилтын зэрэг болон ширхэглэлийн бүрэлдэхүүний тархалт зэрэг нь уусах чанарт нөлөөлдөг гол хүчин зүйлүүд болдог.

Хөрсөн дэх шаврын мөхлөгүүд хоорондоо C-S-H болон C-A-H гэсэн гидратжсан гелийг үүсгэхийн тулд хөрсөн дотор ууссан Ca^{2+} ионууд микро-хэмжээст партикл дээр орших ууссан SiO_2 болон Al_2O_3 -той харилцан үйлчлэлд орж пуццоланы урвалын бүтээгдэхүүнийг үүсгэнэ.



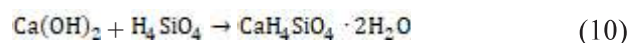
Пуццолан нэгдлүүд нь анхдагч цахиур эсвэл хөнгөнцагааны эрдсүүдээр баялаг байх ба

эдгээр нь цементэд бага агуулагддаг эсвэл огт агуулагдаагүй байдаг боловч устай урвалд орж завсрын нэгдлийг үүсгэн, ердийн температурт кальцийн гидроксидтой урвалд орж цементийн шинж чанартай цахиурын силикат болгон хувиргадаг (Зураг 4).



Зураг 4. Гидратжих болон удаан явагддаг пуццоланы урвалын эцэст үүссэн C-S-H гель холбоост шинэ бүтцүүдийг харуулсан бүдүүвч

Химийн урвалын механизмын хувьд, пуццоланы урвал нь портландит гэгддэг кальцийн гидроксид ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ба цахиурын хүчлийн (геохимийн тэмдэглэгээнд H_4SiO_4 эсвэл $\text{Si}(\text{OH})_4$) хооронд явагддаг.



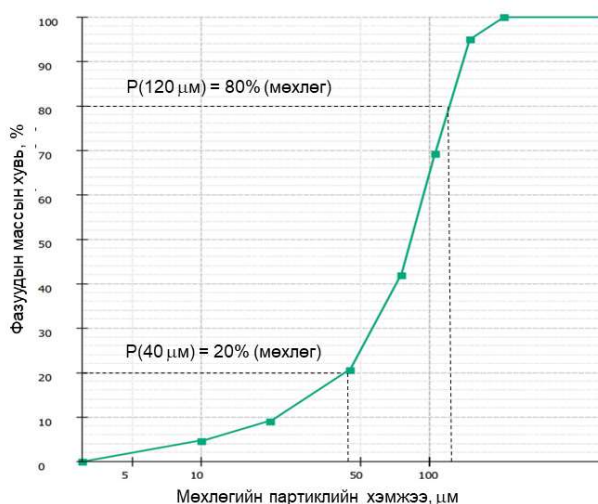
Хөрсийг цементээр бэхжүүлэхэд алит (C_3S), белитийн (C_2S) хоёр фаз нь чухал үүрэг гүйцэтгэдэг. Цементийн гидратжих урвалын дараа энэхүү хоёр фаз нь кальцийн гидроксидыг үүсгэдэг бөгөөд кальцийг катион солилцоогоор хангаж, шаварлаг хөрсийг бэхжүүлдэг.

Цементэн материал нь хөрсийг бэхжүүлэх үед катион солилцоо, флокуляци ба агломерац, пуццоланы урвалаар хөрсний шинж чанарыг нь өөрчилдөг. Цемент нь гидратжих бүтээгдэхүүнийг үүсгэдэг ба үндсэн материалын бат бэхийг сайжруулж, зам засварын чанарыг сайжруулдаг давуу талтай юм.

3. Үр дүн ба хэлэлцүүлэг

3.1 Хуучин суурийн материалын химийн шинж чанарын судалгаа

Нунтаг бодисын хувьд анализын үр дүн нунтаглалтаас үүссэн жижиг талстын геометр чиглэлээс ихээхэн хамааралтай байдаг. Эрдсийн мөхлөгийн хэмжээсийн тархалтыг Зураг 5-т харуулав.



Зураг 5. Нунтагласан дээжийн мөхлөг болон ширхэглэлийн бүрэлдэхүүний тархалтын муруй

Бэлтгэсэн дээжийн материалын ширхэглэлийн бүрэлдэхүүний тархалтын дүнгээс харахад $45 < 150 \mu\text{m}$ хэмжээтэй бүрэлдэхүүн дээжийн 74.4% эзэлж байсан ба агуулагдаж буй партиклийн дундаж хэмжээ $83.9 \mu\text{m}$ байгааг тодорхойлсон.

(А) ба (В) дээжүүдийг 4 хүчлийн задаргаа хийн уусмал хэлбэрт шилжүүлж, химийн 39 элементийг ICP-OES аргаар тодорхойлсон. Дээжийн ихэнх хэсгийг бүрдүүлэх хөнгөнцагаан болон цахиурын агуулга багажны тодорхойлох хязгаараас хэтэрсэн мөн натри нь химийн хувьд идэвхтэй учир энэ аргаар тодорхойлох боломжгүй элементүүдийн тоонд орсон. Нийт тодорхойлсон элементүүдээс нэгээс их хувийн агуулгатай зарим элементийн анализын харьцуулсан дүнг Хүснэгт 1-т харуулав.

Улаанбаатар-Арвайхээрийн чиглэлийн 384-386 км-т байрших 3 цэгээс хуучин суурийн материалын (А) дээжид ICP-OES анализын дүнгийн дундаж утга нь дунджаас хазайсан алдааны хязгаарт багтаж байсан. Харин Таван толгой-Гашуунсухайт чиглэлийн 239 км-т байрлах зам засварын ажлын ПК46+900 байршлаас (В) дээжийг стандартын дагуу сонгон хэмжилтийг хийсэн.

Хүснэгт 1. Хуучин суурийн ICP-OES анализын үр дүн

Дээж	K, (%)	Mg, (%)	Ca, (%)	Fe*, (%)
A	2.58±0.13	0.77±0.25	1.53±0.24	2.93±0.03
B**	1.44	2.13	4.46	4.80

*Нийт агуулга, **Нэг дээжийг сонгосон болно.

(А) болон (В) дээжийг харьцуулахад кальци 2.9, магни 2.7, төмөр 1.6 дахин их хэмжээтэй агуулагдаж байгаа нь говийн бүсийн

замын суурийн дүүргэгч материалыг дахин боловсруулахад байгалийн болон цементэн бэхжүүлэгч материалын орцыг оновчлох, мөн загварчлах шаардлагатай гэж үзэж байна. Эндээс тухайн нутгийн минералогийн бүтэц, найрлагын судалгааг нарийвчлан хийх асуудал тавигдаж байна.

3.2 Хуучин суурийн болон ДБАХ эрдсийн химийн найрлага

Шаварлаг хөрс нь салхи ба усны элэгдэл, өгөршлийг эсэргүүцэх чадвараар лагархаг ба элсэрхэг хөрснүүдтэй харьцуулахад өндөр байдаг. Шалтгаан нь шаврын эрдсийн талстын нэгж бүтцүүд болон эрдсийн мөхлөгт партикулудийн хооронд микро- ба нано-хэмжээст орон зайд нийлмэл бүтэц бүхий нягт харилцан үйлчлэлээр холбогддогт оршино.

Эрдэс дэх талстын атомууд, нэгж талст хоорондох завсрын үед ион солилцох процесс, эрдсийн мөхлөгт усны (гравитацийн чөлөөт, гадаргуугийн, капиллярын, эсвэл холбоост) молекулууд адсорбцлогдох зэрэг физик-химийн процессууд явагдах ба химийн холбоогоор, эрдсийн фаз доторх болон мөхлөг хоорондын харилцан үйлчлэл нь устөрөгчийн болон Ван-дер Ваальсын, зарим тохиолдолд маш сул харилцан үйлчлэл болох Лондон дисперсийн физик хүчээр холбогддог. Эрдэс гэдэг нь талст бүтэцтэй геологийн процесс, үйл явцаар үүссэн химийн нэгдэл эсвэл элемент байх ба өөр хоорондоо физик хүчний харилцан үйлчлэлээр холбогдсон төлөвийг ойлгож болно.

3.2.1 ICP, XRF, EDS анализын аргаар тодорхойлсон эрдсийн элементийн үр дүн

ICP-OES болон EDS аналитик аргуудын хэмжилтийн үр дүн хоорондоо сайн тохирохоос гадна багажит анализын арга хоорондын сул талаа сайтар нөхөн ажиллуулах боломжтой. Дээжүүдэд химийн найрлагын чанарын болон тоон шинжилгээг ICP-OES, XRF, EDS аргуудыг хослуулан хэрэглэж үр дүнг нэгтгэсэн байдлаар гаргасан. (A) ба (B) дээжүүдэд ICP-OES, XRF болон EDS аргуудаар нийт 42 элементийг илрүүлсэн.

Элементийн найрлагын тоон шинжилгээгээр ICP-OES дүнд 39 элементийг илрүүлсэн хэдий ч дээжийн найрлагыг ихэнх хэсгийг бүрдүүлэх Si, Al, Na зэргийг тодорхойлоогүй. Харин EDS

шинжилгээгээр илэрсэн 7 элементийг 100% хэмээн нормчлон тодорхойлсон үр дүн гарсан учир эрдсийн химийн найрлагын нэгтгэсэн дундаж дүнг тооцоолон гаргах шаардлагатай болсон. ICP, EDS аргуудаар тодорхойлсон нийт 42 элементийн агуулгыг оксидын жингийн хувь [wt, %]-д шилжүүлж тооцон, оксид тус бүрд хамгийн их (max.) болон хамгийн бага (min.) агуулгын дундаж утгыг тооцон суурийн хөрсөнд байх нийт оксидуудын агуулгыг тодорхойлсон. (Хүснэгт 2) Замын суурийн дүүргэгч материалын эрдэс чулуулагт агуулагдах нийт элементүүд болон оксидуудын химийн найрлагыг чанарын болон тоон шинжилгээгээр гаргасан нь хөрсний эрдсийн ерөнхий зураглал болж байна. Кальци болон төмрийн оксидоос бусад оксидуудын хувьд ICP-OES, EDS хоёр аргын хувьд химийн найрлагын зөрөө бага гарч байсан.

Бид судалгааны ажилдаа дээжийг бэлтгэхдээ замын материал судлалын мэргэжлийн инженерүүдтэй зөвлөлдөж тухайн цэгээс дээжийн материалыг түүвэрлэн авч алдааг аль болох бага байлгах үүднээс сайтар дундчилж авсан.

Цемент (6%)-ээр бэхжүүлсэн ДБАХ хольцын материалд кальцийн оксидын агуулга хуучин суурийн материалтай харьцуулахад ойролцоогоор 2.5-3 дахин их агуулгатай байгааг үзүүлэв. Элементийн анализын үр дүнгээс харахад (B) дээжид 58.4% SiO₂, 13.2% Al₂O₃, 3.3% CaO, 15.7% Fe₂O₃, 1.9 % Na₂O, 6.2% K₂O болон 1.3% MgO агуулагдаж байна (Хүснэгт 2).

Хүснэгт 2. Хуучин суурийн болон ДБАХ дээжүүдэд хийсэн эрдсийн химийн найрлагын ICP-OES, EDS тоон анализын харьцуулсан дүн

Оксид%	ICP-OES		EDS (normalized)				Нэгтгэсэн дундаж дүн
	A	B	A	B	B	Г	
SiO ₂	n.a.*	n.a.	47.90	45.76	58.43	52.69	52.10
Al ₂ O ₃	n.a.	n.a.	10.42	12.75	13.19	12.22	11.81
Fe ₂ O ₃	4.19	6.86	21.51	21.52	15.71	17.20	12.86
CaO	2.14	6.24	12.63	13.65	3.31	9.92	8.48
MgO	1.28	5.66	2.49	1.44	1.28	1.59	3.73
K ₂ O	3.11	1.74	3.18	3.55	6.23	5.15	3.99
Na ₂ O	n.a.	n.a.	1.85	1.32	1.85	1.21	1.53
TiO ₂	0.50	0.81	-	-	-	-	0.65
P ₂ O ₅	0.18	0.40	-	-	-	-	0.22
MnO	0.08	0.10	-	-	-	-	0.09
BaO	0.09	0.05	-	-	-	-	0.07
SrO	0.04	0.09	-	-	-	-	0.06
ZrO ₂	0.01	0.02	-	-	-	-	0.02
Бусад	<0.5	<0.5	-	-	-	-	<0.50
Нийт, %	n.a.	n.a.	100	100	100	100	96.11±5.31**

*n.a. анализ хийгдээгүй болно.

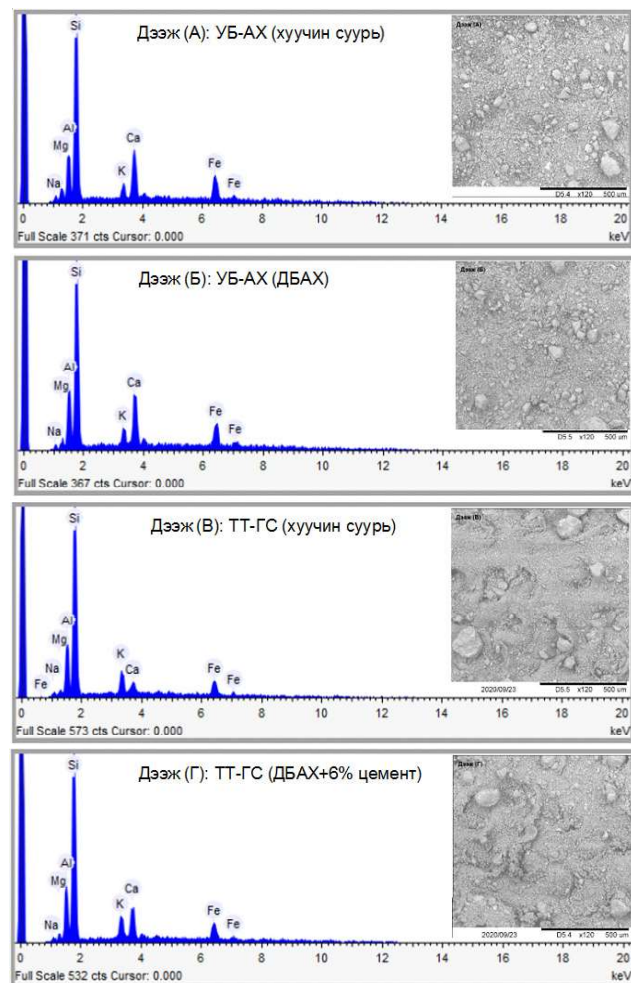
**Хэмжилтийн хамгийн их ба бага утгаас тооцсон дундаж утга

Хуучин суурийн материалыг хүйтнээр дахин

боловсруулж цементээр бэхжүүлсний дараа кальцийн оксидын (CaO) агуулга нэмэгдсэн. Кальцийн агуулга нь цементийн гидратжих урвалын дүнд үүсдэг CH нэгдэл буюу $\text{Ca}(\text{OH})_2$ үүссэн болохыг илтгэж байна. Мөн хөнгөнцагаан болон цахиурын агуулга буурсан үзүүлэлт нь цементийн оролцоотойгоор хөрсний эрдсийн мөхлөг болон фаз хооронд пуццоланы урвал явагдсантай холбоотой гэж үзэж байна.

EDS нь SEM анализтай хосолсон систем бүхий арга юм. EDS хэмжилтийн үр дүн нь хэмжилт хийж бүртгэх микро-хэмжээст талбай болон талбайн сектороос хүчтэй хамааралтай байдаг.

Энэ туршилтад SEM аргаар сонгосон талбай нь $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ байсан. EDS анализын үр дүн нь талбайн сонголтоос хамаарах ба дээжийг сайтар бэлтгэсэн тохиолдолд бусад нунтаг дээжид хэмждэг XRF аргатай үр дүн сайн тохирдог. (А-Г) дээжүүдийн EDS элементийн анализын дүнг Зураг 6-т үзүүлэв.



Зураг 6. Хуучин суурийн болон ДБАХ материалын дээжүүдэд хийгдсэн эрдсийн элементийн EDS үр дүн: (А) УБ-АХ-ийн хуучин суурь; (Б) УБ-АХ-ийн ДБАХ; (В) ТТ-ГС-ийн хуучин суурь; (Г) ТТ-ГС-ийн ДБАХ+6% цемент

Энэ хэсэгт дүгнэхэд цементээр бэхжүүлсний дараа альци агуулга ихсэж байгаа хэдий ч говийн бүсийн хөрсөнд филлосиликат, алюиносиликатыг үүсгэдэг оксидууд болон шүлтийн, газрын шүлтийн металлын оксидын агуулга өндөр байгаа нь шаварлаг хөрс болон шаврын эрдсүүд их байгаатай холбоотой гэж үзэв.

3.3 Эрдсийн бүтэц, шинж чанарын XRD анализын судалгааны үр дүн

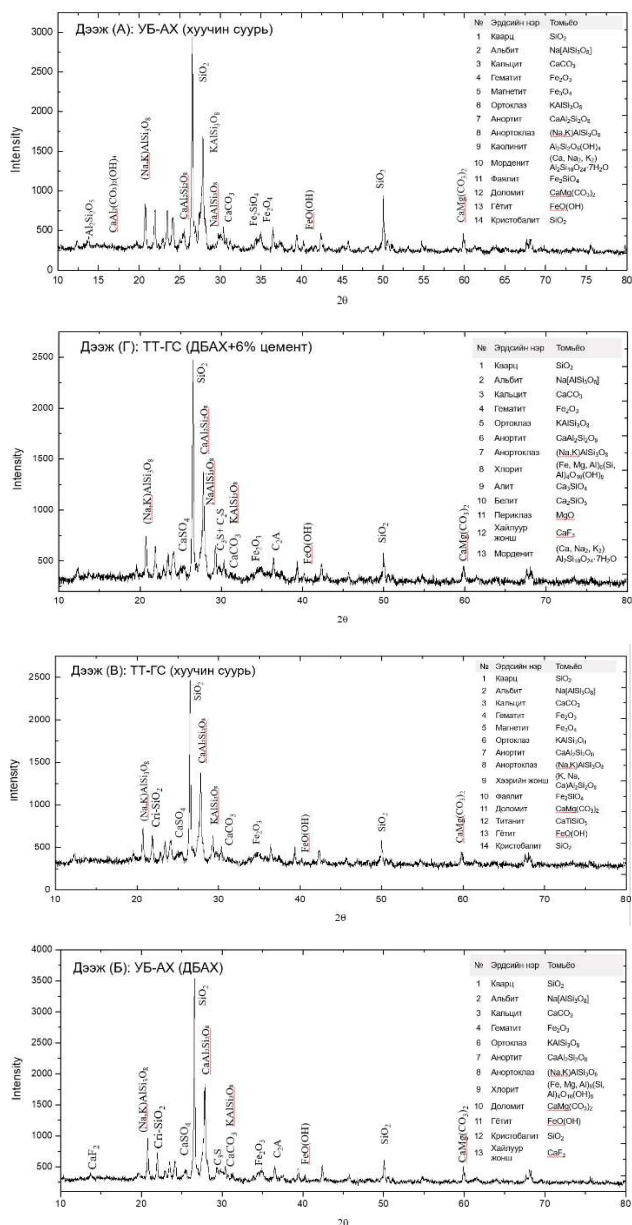
ДБАХ хольц дахь цементийн агуулга (~2-6%) суурийн шинж чанарт хүчтэй нөлөөлдөг (Paso, 2010). Хольц дахь давамгайлсан эрдэс бодисыг судлах, мөн химийн тогтворжилтын явцад пуццоланы нэгдэл (pozzalonic compounds) үүссэн эсэхийг судлах зорилгоор минералогийн анализыг XRD аргаар хийж гүйцэтгэсэн (Зураг 7). Хэмжилтийн үр дүнд (А-Г) дээжүүдэд нийт нь 21 эрдсийг тодорхойлж, эрдсийн нэр, химийн томъёо, эрдсийн найрлагын тоон утгыг хувиар тооцож гаргасан ба үр дүнг Хүснэгт 3-т үзүүлэв.

6%-ийн цементээр бэхжүүлсэн ДБАХ хольц бүхий (Г) дээжид илэрсэн нэгдлүүд болох алит (Ca_3SiO_5) буюу C_3S (8.1%), белит (Ca_2SiO_4) буюу C_2S (2.2%), морденит [$(\text{Ca}, \text{Na}_2, \text{K}_2)\text{Al}_2\text{Si}_{10}\text{O}_{24} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$] (2.5%), хлорит [$(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{OH})_6$] (2.5%)-тай шинээр илэрч, харин кварц (SiO_2) 11%, кальцит (CaCO_3) 2 дахин, гөлтгөнө нэлээд хувиар ихсэж гарсан нь эдгээр эрдсүүд цементэн төст хагас-байгалийн шинж төрхтэй болсныг илэрхийлж байна.

Дээж (Б)-д хийсэн XRD анализын дүнгээс харахад (3-р хүснэгт) кварц, альбит, анортит болон хлорит (3.5% шинээр илэрсэн) эрдсүүдийн эзлэх хувь мэдэгдэхүйц их хэмжээгээр нэмэгдсэн. Мөн (Б) ба (Г) дээжүүдэд гематит (Fe_2O_3) болон магнетит (Fe_3O_4) эрдсүүдийн агуулга эрс багасаж гарсан байна.

Эндээс дүгнэхэд нунтаг эрдсийн мөхлөг болон дүүргэгч бодисын хооронд гидратжих болон пуццоланы урвалууд дараалан явагдаж хөрсөнд цементэн болон пуццоланы нэгдлүүд үүсэх бүрэн боломжтой. Найрлага дахь шаварлаг эрдсийг химийн идэвхгүй бүрэлдэхүүн хэсэг гэж үзэх нь буруу юм (Wang, 2002). Тэдгээр нь гидратжих урвалын дүнд үүссэн кальцийн гидроксидтой урвалд орж, нэмэлт цементэн материал үүсгэж хөрсний мөхлөг хоорондын холбоог бэхжүүлэхэд хүргэдэг байна. XRD аргаар (Б) ба (Г) дээжүүдэд цементэн болон пуццолан нэгдлүүд бүртгэгдсэн

ба кальцийн силикатын гидрат гель (C-S-H) болон кальцийн гидроксид буюу портландит (CH) талстууд үүсэх нь цементээр бэхжүүлсэнтэй холбоотой. Эдгээр нэгдлүүд материалын уян хатан, бат бэх шинж чанарыг нэмэгдүүлдэг.



Зураг 7. Хуучин суурийн болон ДБАХ хольцын материалын (А-Г) дээжүүдэд эрдсийн минералогийн XRD анализын хэмжилтийн үр дүн

Хүснэгт 3. Хуучин суурийн болон ДБАХ материалын (А-Г) дээжүүдэд хийгдсэн эрдсийн бүтэц, найрлагын XRD анализын дүн

Эрдсийн нэр	XRD, [wt.%]			
	А	Б	В	Г
Кварц	39.8	44.8	33.8	44.8
Альбит	12.1	24.3	16.5	19.6
Кальцит	8.7	6.9	3.4	6.6
Гематит	2.9	4.6	10.6	3.2
Магнетит	9.8	-	1.6	-
Ортоклаз	1.8	2.2	1.8	2.0
Анортит	2.3	4.2	7.0	2.2
Анортит	3.4	2.3	5.9	2.0
Каолинит	6.7	-	-	-
Морденит	1.8	-	-	2.5
Фаялит	1.8	-	3.3	-
Хлорит	-	3.5	-	2.5
Доломит	1.4	1.5	3.1	-
Гётит	1.3	1.6	1.5	-
Кристобалит	3.1	1.9	4.6	-
Хайлуур жонш	-	1.6	-	2.0
Алит	-	-	-	8.1
Белит	-	-	-	2.2
Периклаз	-	-	-	1.8
Титанит	-	-	1.5	-
Хээрийн жонш	-	-	1.5	-

4. Дүгнэлт

(А-Г) дээжүүдэд ICP-OES, EDS аргуудаар нийт 42 элементийн химийн найрлагыг тогтоосон. Цемент (6%)-ээр бэхжүүлсэн ДБАХ материалд кальцийн оксидын агуулга хуучин суурийн материалтай харьцуулахад 2.5-3 дахин их байв. Кальци агуулга их байгаа хэдий ч говийн бүсийн хөрсөнд филлосиликат, алюиносиликатыг үүсгэдэг оксидууд, шүлтийн болон газрын шүлтийн металлын оксидын агуулга өндөр байгаа нь шаврын эрдсүүд ихтэй шаварлаг хөрс гэж тодорхойлов.

XRD анализ аргаар (А-Г) дээжүүдэд нийт 21 эрдсийг тодорхойлов. Анализын үр дүнд 6% цементээр бэхжүүлсэн ДБАХ дээжид алит (8.1%), белит (2.2%), морденит (2.5%), хлорит (2.5%)-тай шинээр илэрч, харин кварц (11%), кальцит 2 дахин, гөлтгөнө ($\text{CaSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) нэлээд хувиар ихсэж гарсан нь дүүргэгчийн гадаргууг цемент бүрхэн цементэн төст хагас-байгалийн шинж төрхтэй болсон гэж тодорхойлов.

Дээж (Б)-д хийсэн XRD анализын дүнгээс кварц, альбит, анортит болон хлорит (3.5% шинээр илэрсэн) эрдсүүдийн эзлэх хувь мэдэгдэхүйц их хэмжээгээр нэмэгдсэн. Мөн (Б) ба (Г) дээжүүдэд гематит болон магнетит эрдсүүдийн агуулга эрс багасаж гарсан. Эндээс дүгнэхэд нунтаг

эрдсийн мөхлөг болон дүүргэгч бодисын хооронд гидратжих болон пуццоланы урвал дараалан явагдаж хөрсөнд цементэн болон пуццолан нэгдлүүд үүсэх бүрэн боломжтой гэж дүгнэв.

Цементээр бэхжүүлсэн хөрсний шинж чанар сайжирсан нь цементийг хатууруулж байгаа цементийн гидратжих урвалтай холбоотой юм. Шаварлаг эрдсийг идэвхгүй бүрэлдэхүүн гэж үзэж болохгүй тул шаврын эрдсийн мөхлөгүүд хоорондоо C-S-H болон C-A-H гэсэн гидратжсан гелийг үүсгэхийн тулд хөрсөн дотор ууссан Ca^{2+} ионууд микро-хэмжээст партикл дээр ууссан SiO_2 (Al_2O_3) хоорондох харилцан үйлчлэлийн дүнд пуццоланы урвалын бүтээгдэхүүн үүснэ. Нэмэлт цементэн шинж чанартай пуццоланы материал үүсгэж хөрсний мөхлөгүүд хооронд бат бэх холбоо үүснэ гэсэн дүгнэлтэд хүрэв.

Талархал

Химийн болон минералогийн анализын дээж бэлтгэх (Кэй Эйч Ти Эс ХХК-ийн лаборатор), эрдсийн найрлагыг тодорхойлох, эрдсийн бүтцийн шинжилгээг ICP-OES (Ханлаб ХХК-ийн Эрдэс судлал, орчны лаборатор), XRD (ШУА-ийн харьяа Физик технологийн хүрээлэн), SEM-EDS (ШУТИС-ийн Хээрийн судалгааны болон чулуулаг боловсруулах лаборатор), XRF, XRD, TMA (Эрдэнэт үйлдвэр ТӨҮГ-ын дэргэдэх Туршилт, судалгааны төв) болон AFM, оптик нэвтрүүлэлтийн болон PL микроскоп (МУИС-ийн Нано шинжлэх ухаан, нанотехнологийн төв)-ийн хэмжилтийг хийж гүйцэтгэхэд оролцсон эрдэм шинжилгээний байгууллага, их сургууль, компани, хувь судлаач, инженер техникийн ажилтан нарт талархал илэрхийлье.

Зохиогчийн оролцоо

Д.Энхбаатар дахин боловсруулах туршилтыг хийж гүйцэтгэх, судалгааны арга зүй боловсруулах, М.Цэцгээ физик-механик шинж чанарын судалгааг хийж гүйцэтгэх, Э.Эгшиглэн болон Д.Ганбилэг нар минералогийн судалгааны туршилтыг хийж гүйцэтгэх, үр дүн боловсруулах, Б.Болд ба Ч.Ганзориг нар судалгааг хянах, удирдах, чиглүүлэх, Д.Энхбаатар болон Э.Эгшиглэн нар өгүүлэл бичих ажлуудыг тус тус хариуцан гүйцэтгэсэн.

Санхүүжилт

Энэхүү судалгааны ажил нь Үйлсийн зам ХХК,

Роуд Эс Ти (iROAD) Институт ХХК болон Ай Ти Ти Өү (iTTO) ХХК-ийн төслийн санхүүжилт, судалгаа хөгжүүлэлтийн дэмжлэгээр хэрэгжсэн болно.

Ашиг сонирхлын зөрчилгүйн баталгаа

Зохиогчид ашиг сонирхлын зөрчилгүй гэдгээ баталж байна.

Ном зүй

- Abraham, S. M., & Ransinchung, G. D. R. N. (2018). Influence of RAP aggregates on strength, durability and porosity of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 189, 1105–1112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.069>
- Adlinge, S. S., & Gupta, P. K. (2009). Pavement Deterioration and its Causes. *Mechanical & Civil Engineering*, 9–15. www.iosrjournals.org
- Barton, C. D., & Karathanasis, A. D. (2002). Clay Minerals in Rattan Lal. *Encyclopedia of Soil Science*, 187–192.
- Desconhecido. (2012). Soils and Soil Physical Properties. *Soil Properties*, 24.
- Loo, B. P. Y., Hung, W. T., Lo, H. K., & Wong, S. C. (2005). Road safety strategies: A comparative framework and case studies. *Transport Reviews*, 25(5), 613–639. <https://doi.org/10.1080/01441640500115892>
- Matsumoto, S., Shimada, H., & Sasaoka, T. (2017). Interaction between physical and chemical weathering of argillaceous rocks and the effects on the occurrence of acid mine drainage (AMD). *Geosciences Journal*, 21(3), 397–406. <https://doi.org/10.1007/s12303-016-0064-3>
- Mohamed Sutan, N., Akma Ideris, N. I., Linda Taib, S. N., Lee, D. T. C., Hassan, A., Sahari, S. K., Mohamad Said, K. A., & Sobuz, H. R. (2018). Microstructural characterization of catalysis product of nanocement based materials: A review. *E3S Web of Conferences*, 34, 1–7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183401039>
- Ochieng, O. (2016). Characterization and classification of clay minerals for potential applications in Rugi Ward, Kenya. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 10(11), 415–431. <https://doi.org/10.5897/ajest2016.2184>
- Of, C. (1983). *1 Composition and Physical Properties of Soils*. 1–36. [https://doi.org/10.1016/s0166-2481\(08\)70048-5](https://doi.org/10.1016/s0166-2481(08)70048-5)
- Paso, E. (2010). *Cement Treated RAP Mixes for Roadway Bases*. 79968(0).

- Taha, R., Al-Harthi, A., Al-Shamsi, K., & Al-Zubeidi, M. (2002). Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(3), 239–245. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2002\)14:3\(239\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2002)14:3(239))
- Thakur, J. K., & Han, J. (2015). Recent Development of Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases Treated for Roadway Applications. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2(2), 68–86. <https://doi.org/10.1007/s40515-015-0018-7>
- Thives, L. P., & Ghisi, E. (2017). Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72(June 2015), 473–484. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.087>
- Verma, A., Sharma, R., Shrivastava, M., & Ab, R. (2017). Evaluation of reclaimed asphalt pavement (rap) in flexible pavement layers World Journal of Engineering Research and Technology WJERT www.wjert.org ISSN 2454-695X Original Article SJIF Impact Factor: 4.326 *Corresponding Author. *World Journal of Engineering Research and Technology*, 3(September), 91–104.
- VicRoads. (2011). *Use of recycled materials for road construction*. September, 1–4.
- Wang, L. (2002). Cementitious Stabilization of Soils in the Presence of Sulfate. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 160.
- Wilding, M. C. (2008). Aluminates. *Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing*, 49–70. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73362-3_4
- Wirtgen. (2012a). *Wirtgen Cold Recycling Technology*. 367.
- Wirtgen, G. (2012b). *Wirtgen Cold Recycling Technology* (p. 18).
- Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., & Amirkhanian, S. (2018). A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 180, 579–604. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.006>
- Zhang, J., Apeagyei, A. K., Airey, G. D., & Grenfell, J. R. A. (2015). Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 62, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.06.012>
- Эвдэрсэн газрыг нөхөн сэргээх болон аж ахуйн эргэлтэд оруулах чиглэл, (2015).