

Хөрсний бохирдлын *in situ* нөхөн сэргээх технологи, тэдгээрийн хэрэглээ
(цуврал №5)

Б.Мөнхжин¹, И.Туяажаргал^{2*}, Д.Батсүрэн³, Б.Дөлгөөн¹, С.Өнөрсайхан¹

¹Нийгмийн эрүүл мэндийн үндэсний төв, Улаанбаатар, Монгол улс

²Анагаахын шинжлэх ухааны үндэсний их сургуулийн Төгсөлтийн сургалтын бодлого зохицуулалтын газар, Улаанбаатар, Монгол улс

³Монгол улсын их сургуулийн Инженер, технологийн сургууль, Улаанбаатар, Монгол улс

*iimaatuyajargal@gmail.com

Түлхүүр үгс: хөрсний шинж чанар, байгаль орчин, химийн бодис, шинэ технологи, фито нөхөн сэргээлт

ОРШИЛ

Хөрсний бохирдол нь байгаль орчин, хүний сайн сайхан байдалд ихээхэн аюул учруулж байна. Хүнд металл, нүүрсустөрөгч, пестицид зэрэг бохирдуулагчид хөрсний чанарыг доройтуулж, экосистемийн хэвийн үйл ажиллагааг алдагдуулж, улмаар биологийн олон янз байдалд сөргөөр нөлөөлдөг. Удаан үргэлжлэх хөрсний бохирдол нь газрын доройтолд хүргэж, хөрсийг ашиглах боломжгүй болгодог [1, 2]. Хөрсний бохирдол байгалийн жамаар арилж экосистем аажмаар сэргээх тохиолдол бүртгэгдсэн хэдий ч энэ нь хэдэн арваас хэдэн зуун жил шаардах бөгөөд биогеохимийн олон янз байдал, үйл ажиллагаа анхных шигээ бүрэн сэргэж буй нь ажиглагдаагүй байна. Нөхөн сэргээх уламжлалт аргууд нь ихэвчлэн малтлага хийх, тухайн хөрсийг зайлуулах зэрэг өртөг өндөртэй, байгаль орчинд сөрөг нөлөө үзүүлдэг дутагдалтай талтай [3]. Иймээс сүүлийн жилүүдэд хөрсний бохирдлыг бууруулах, арилгах химийн инженерийн шинэ арга, технологийг ашиглах нь түгээмэл болж байна [4].

Бохирдсон хөрсөнд зориулсан *in situ* технологийг био (бохирдуулагч бодисыг задалдаг бичил биетнийг ашиглах), фито (бохирдуулагчийг тогтворжуулах,

задлах, шингээх зорилгоор ургамал ашиглах), хими (бохирдуулагчийг аюулгүй хэлбэрт шилжүүлдэг бодис ашиглах)-ийн нөхөн сэргээлт гэж ангилдаг.

Бохирдуулагчийг боловсруулах технологийн загвар дизайныг шинэчлэх, химийн урвалын кинетик, гарцыг сайжруулах, хяналт, шинжилгээг ухаалгаар гүйцэтгэх зэрэг химийн инженерчлэлийн дэвшилтэт техник, технологийн процессууд нь нөхөн сэргээх үр дүнтэй стратегийг боловсруулахад чухал үүрэг гүйцэтгэж байна [5, 6]. Нөхөн сэргээлтийг амжилттай гүйцэтгэсэн олон тохиолдлыг нэгтгэн дүгнэвэл, хөрсний бохирдлын асуудалд химийн инженерчлэлийг ашигласнаар нөхөн сэргээх үр дүнтэй, ашигтай, тогтвортой шийдлүүдийг гаргаж чадах нь тодорхой байна [7, 8].

Химийн инженерчлэлд суурилсан хөрсийг хуулалгүй нөхөн сэргээх *in situ* технологийг дэлхийн олон оронд туршиж, амжилттай хэрэгжүүлсэн хэдий ч нөхөн сэргээх процессыг бүхэлд нь хянах, бодит үр дүнд хүрэхэд хугацаа шаарддаг тул технологи хөгжүүлэлт, биологи, химийн нэгдлийн сонголтыг нарийвчлан судлах шаардлагатай байна. Энэхүү тойм өгүүллээр бид хөрсний бохирдлын нөхөн сэргээх *in situ*

технологийн дэвшил, шинээр нэвтрүүлж буй арга, тэдгээрийн хэрэглээ, бодит үр дүнг нэгтгэхийг зорилоо.

1. БОХИРДСОН ХӨРСИЙГ НӨХӨН СЭРГЭЭХ ТЕХНОЛОГИЙН АНГИЛАЛ

Хөрсийг нөхөн сэргээх технологийг 2 ангилдаг:

- 1) Байгаль (биологи, физик, химийн процесс)-д суурилсан технологи,
- 2) Боловсруулалт (*in situ/on-site*) болон *ex situ/off-site*-ад суурилсан технологи [9, 10].

In situ технологи нь боловсруулалтын явцад хөрсийг хөндөлгүйгээр бохирдуулагчийг ялгаж, баяжуулж, бохирдсон хэсгийг гаргаж цэвэрлэх эсвэл өөр газарт шилжүүлдэг. Газар дээр нь нөхөн сэргээхийн гол давуу тал нь хөрсийг ухаж, тээвэрлэдэггүй тул эдийн засгийн зардал, байгаль орчны өөрчлөлт бага байдаг. Энэ технологи дараа нь нөхөн сэргээхэд маш хэцүү байдаг

хөрсний бүтэц, органик бодис, биологийн олон янз байдлыг хадгалж чаддаг давуу талтай ч урт хугацаа шаарддаг, нөхөн сэргээлтийг хянах, баталгаажуулахад төвөгтэй талтай [4, 10, 11].

Харин *ex situ* технологи нь хөрсийг ухаж аваад боловсруулах, цэвэрлэсэн хөрсийг солих, өөр газар тээвэрлэх байдлаар хянахад хялбар, нөхөн сэргээх процесс хурдан, хугацаа бага шаарддаг боловч малтлага, тээвэрлэлтийн зардал өндөр, хөрсний бүтэц, органик бодисыг доройтуулах хандлагатай, амьдрах орчны өөрчлөлт үүсгэдэг, нөхөн сэргээлт илүү төвөгтэй, цаг хугацаа их шаарддаг сул талтай байна (1-р хүснэгт) [12-14].

1-р хүснэгт. *In situ, ex situ технологийн ялгаатай байдал*

	Давуу тал	Дутагдалтай тал
<i>In situ</i>	Малтлагын зардал орохгүй. Хөрсний бүтэц, биологийн янз байдлын сэргэлт хурдан.	Хугацаа шаардагдана. Процессыг хянахад хэцүү.
<i>Ex situ</i>	Нөхөн сэргээх процесс хурдан. Хянахад хялбар.	Малтлага, тээвэрлэлт, буцаан шилжүүлэх зардал өндөр. Амьдрах орчны томоохон өөрчлөлт үүсгэдэг. Хөрсний бүтэц, биологийн олон янз байдлыг эргэн сэргээхэд хэцүү.

Хөрсний нөхөн сэргээх аргыг сонгохдоо экологийн нөлөө, эдийн засгийн хүчин зүйлсийг сайтар анхаарч үзэх шаардлагатай.

Хөрсийг нөхөн сэргээх байгальд суурилсан технологид хөрсний организмуудыг ашиглан бохирдуулагчийг био задралд оруулах,

2. *IN SITU* БАЙГАЛЬД СУУРИЛСАН ТЕХНОЛОГИ

тогтворжуулах, ялгах зэрэг аргууд орно. Газрын тосны нүүрсустөрөгч, хлорт уусгагч, полицагаригт ароматик нүүрсустөрөгч, пестицид,

микроэлементээр бохирдсон хөрсийг цэвэрлэхэд энэхүү технологийг амжилттай ашиглаж байна. Хөрсний үндсэн шинж чанар, бохирдолтын байдал, бохирдуулагчийн концентрац

2.1. Био нөхөн сэргээлт: Биологийн нөхөн сэргээлт гэдэг нь аэробик эсвэл агааргүй орчинд органик бохирдуулагчдыг задлах, тэдгээрийн хүртээмжийг бууруулах зорилгоор хөрсний бичил биетнийг ашиглах юм. Нөхөн сэргээхэд бохирдуулагч, бохирдлын шалтгаан, нөхцөлөөс хамаарч өөр өөр аргыг хэрэглэнэ [8]. Био аэробик нөхөн сэргээлт нь O_2 ашигладаг бөгөөд заримдаа аэробик бичил биетнийг өдөөх зорилгоор хөрсөөр соруулдаг бол O_2 агуулдаггүй агааргүй орчинд ихэвчлэн нэмэлт бодис хэрэглэдэг. Эдгээр аргын үр дүнтэй байдалд био дасан зохицох чадвар хамгийн гол нөлөөтэй [16, 17].

Бохирдуулагч органик бодисыг задалдаг бичил биетний популяцын чадавхыг бичил биетнийг өдөөх (биостимуляц), хөрсөнд тодорхой бичил биетнийг нэвтрүүлэх (био өсгөвөрлөх) замаар нэмэгдүүлж болно. Үүнийг мөн сайжруулсан био нөхөн сэргээлт гэж нэрлэдэг. Агааржуулалтыг сайжруулах, шим тэжээл нэмэх, pH, температурыг өөрчлөх зэргээр бичил биетний үржих нөхцөлийг оновчтой болгох замаар органик бохирдуулагчийн задралыг сайжруулдаг [18, 19]. Судлаачид тэсрэх бодис, өндөр концентрацтай хлорт органик нэгдэл, Cr(VI) зэрэг аэробик нөхцөлд биологийн задралд бүрэн орохгүй зарим бохирдуулагчийг агааргүй аргаар үр дүнтэй саармагжуулах боломжтой гэж үзсэн. Судалгаагаар хөрсийг O_2 -өөс чөлөөлөхийн тулд сайтар чийгшүүлж, агааргүй бичил биетнийг идэвхжүүлэх органик, органик бус

зэргээс хамаарч нөхөн сэргээлт ялгаатай явагддаг ба биологийн процессыг идэвхжүүлэн, нөхөн сэргээлтийг хурдасгаж болно [5, 15].

нэмэлт, электрон доноруудыг нэмэх нь өндөр үр дүнтэй байна [20-23].

Микроэлементээр бохирдсон хөрсийг микробиологийн аргаар нөхөн сэргээх үндсэн механизм нь тэдгээрийг хөдөлгөөнгүй болгож, биологийн хүртээмжийг бууруулах явдал юм. Микроэлемент нь бичил биетний нөлөөгөөр задрахгүй ч сөрөг нөлөө багатай өөр хэлбэрт шилжиж болно. Жишээлбэл, аэробик, агааргүй бичил биет нь Cr(VI)-ыг хоргүй, хөдөлгөөн багатай Cr(III) төлөвт хувиргаж чаддаг [24]. Биологийн задралыг фито болон био нөхөн сэргээх аргуудыг хослуулан сайжруулж болно [25].

2.2. Био агааржуулалт, био тархалт:

Эдгээр нь агаарыг хөрсөнд шууд оруулах замаар аэробикийн задралд ордог аливаа нэгдлийн био задралыг өдөөдөг ижил төстэй аргууд юм. Био агааржуулалт хөрсний ханаагүй бүсэд (усны ёроолоос дээш ханаагүй давхарга), био тархалт усны ёроолын ханасан бүсэд тус тус явагддаг. Органик бохирдуулагчийг задлахын тулд хөрсний бичил биетнийг өдөөж, тогтвортой байдлыг хангахын тулд бага хурдаар агаарыг хангалттай шахдаг. Агаарын урсгалын бага хурд нь ууршилттай бодисыг агаар мандалд ууршуулж, дэгдэлтийг багасгадаг тул энэ аргыг ихэвчлэн дэгдэмхий нүүрсустөрөгчөөр бохирдсон хөрсийг цэвэрлэхэд ашигладаг [20, 21, 24, 25].

Нөхөн сэргээлтийн жишээ 1. Мексикийн de Marzo Refinery нефть боловсруулах үйлдвэр нь 1933 онд ашиглалтад орж

1991 онд хаагдсан ба ашиглалтын явцад үйлдвэрийн 55 га талбай нүүрсустөрөгчөөр бохирдсон. Талбайн бохирдлыг тодорхойлох, хүний эрүүл мэнд, байгаль орчинд учруулах эрсдэлийг үнэлэх, нөхөн сэргээх стратеги боловсруулах зорилгоор үндэсний болон олон улсын шинжээчдийн баг ажиллаж бохирдуулагчийн шинж чанар, бохирдсон орчны төлөв байдалд

- Ханаагүй бүс дэх бохирдуулагчид (хөнгөн нүүрсустөрөгч, C_6H_6 , $C_6H_5CH_2CH_3$, $C_6H_5CH_3$, $(CH_3)_2C_6H_4$) ад био агааржуулалт явуулсан. Үүний тулд соронзон хавхалгатай олборлох/био агааржуулалтын худгуудыг хөрсөнд байрлуулан хөрсийг агааржуулж, катализаторын исэлдэлтээр дэгдэмхий нүүрсустөрөгчийг гаргаж авсан.
- Ханасан бүс дэх бохирдсон хөрсийг цэвэрлэхийн тулд хөрс, гүний уснаас дэгдэмхий бохирдуулагчдын ууршилт, задралыг хурдасган, улмаар бүрэн зайлуулах арга хэрэглэсэн.
- Мөн гүний усыг урт шуудуугаар гаргаж, ууссан хүчилтөрөгчийг нэмэгдүүлэх, бохирдуулагч бодисыг ялгах, дэгдэмхий бодисыг идэвхтэй нүүрсустөрөгчийн шүүлтүүрээр шүүх зэргээр цэвэрлэсэн.
- Органик хар тугалгатай нэгдлээр бохирдсон хөрсийг ухаж гарган хогийн цэгт устгасан.

Ийнхүү ангилсан бүсчлэлийн дагуу тохирох аргыг ашиглан нөхөн сэргээлтийг амжилттай гүйцэтгэсэн [26].

Нөхөн сэргээлтийн жишээ 2. Италийн Турин хотод ойролцоогоор 20,000 м² хэмжээтэй аж үйлдвэрийн талбайг ашигт малтмал хадгалах, үйлдвэрийн хог хаягдал боловсруулах зорилгоор 1960-1990 оны хооронд ашиглаж байжээ (1-р зураг). Ашиглалтын явцад газрын тосны

үндэслэн бохирдсон талбайг 7 бүсэд хуваасан. Эдгээр бүсийг дараах ялгаатай аргаар нөхөн сэргээсэн:

- Дунд болон хүнд фракцын нүүрсустөрөгчөөр бохирдсон хөрсний том хэмжээний чулуулаг, хайргыг зайлуулахын тулд шүүж, дараа нь бичил биетнийг шим тэжээл, агааржуулалтаар өдөөн гадаргын био овоолго хийсэн.

нүүрсустөрөгч, C_6H_6 , $C_6H_5CH_3$, $C_6H_5CH_2CH_3$, $(CH_3)_2C_6H_4$, үнэрт нүүрсустөрөгч, Fe, Mn зэрэг микроэлементүүд, олон төрлийн органик бохирдуулагчид хөрсөнд шингэсэн байв. Талбайн шинжилгээгээр 7 м гүнд хүрсэн 4000 м² талбай бохирдсон, бохирдуулагч бодисууд хөрсний ханасан бүс рүү тархсаныг тогтоосон. Лабораторийн шинжилгээгээр бохирдуулагчийн агууламж хэдэн мг/л хүртэл хэлбэлзэж байсан. Ингээд нөхөн сэргээлтийг дараах 3 үе шаттайгаар гүйцэтгэсэн:

- I. Үйлдвэрийн газар доорх агуулах савыг буулгаж цэвэрлэсэн.
- II. Бохирдсон хөрсийг ханаагүй бүсээс зайлуулж, био овоолгын аргаар био нөхөн сэргээлтийг гүйцэтгэн дараа нь талбайг дүүргэсэн.
- III. Ханасан бүсийг агааржуулах, био агааржуулалт гүйцэтгэх, хөрсний уурыг олборлох замаар био нөхөн сэргээлт хийсэн. Талбайд агаар шахах 50 худаг, олборлох 97 цооног байгуулсан. Биологийн задралд ороогүй уурыг агаар мандалд нийлүүлэхийн өмнө идэвхжүүлсэн нүүрсустөрөгчийн шүүлтүүрээр шүүсэн.

Нөхөн сэргээлтийн ажил 7 жил үргэлжилж 1.4 сая ам.доллар буюу 50 \$ /м³ орчим зардал гарсан. Нөхөн сэргээлтийн ажил дууссанаас хойш 3 жилийн хугацаанд бохирдуулагчийн

агууламжийг лабораторийн
шинжилгээгээр тогтмол шинжилж,
үргэлжлүүлэн хянасан [27].



1-р зураг. Бохирдсон талбай, нөхөн сэргээх үйлдвэр

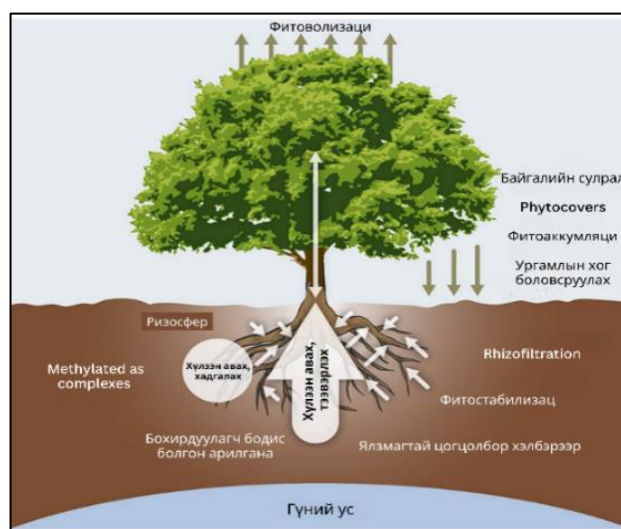
2.3. Фито нөхөн сэргээлт: Фито нөхөн сэргээлт гэдэг нь бохирдсон хөрсийг цэвэрлэхэд ургамал ашигладаг *in situ* технологийг хэлдэг. Энэ технологиор бохирдсон хөрсийг нөхөн сэргээхэд (1) бохирдуулагчийг тогтворжуулах (бохирдуулагчид хөдөлгөөн багатай, хор хөнөөлгүй төлөвт шилждэг); (2) бохирдлыг шилжүүлэн арилгах гэсэн 2 арга багтана [28].

Фито нөхөн сэргээлтийн үр дүн бохирдуулагч бодис, хөрсний үндсэн шинж чанар, сонгосон ургамлын төрөл зүйлээс шууд хамаардаг (2-р зураг). Ургамлын үндэс бохирдсон хөрсөн дэх бичил биетнүүдтэй идэвхтэй харилцан үйлчлэлцэх нь маш чухал бөгөөд тухайн газрын хөрсөнд тохирох нэмэлт бодисыг шингээн үр нөлөөг нэмэгдүүлэх боломжтой [29, 30].

Хөрсний pH, үржил шимийг сайжруулах нь ургамлын микроэлементийн

хөдөлгөөн, шимэгдэлтийг эрчимжүүлж, фито нөхөн сэргээлтийг үр дүнтэй болгодог. Мөн бохирдлын түвшин, бохирдуулагчийн төрөл, цаг уурын нөхцөл зэрэг тухайн газрын байгаль орчинд тэсвэртэй, уугуул ургамлын бүлгэмдэл ашиглан фито нөхөн сэргээлтийг үр дүнтэй болгоно. Ерөнхийдөө ургамлын бүрхэвч бий болсноор хөрсний бохирдол, элэгдэл, урсац багасаж хөрсний үндсэн үйл ажиллагаа сэргэдэг.

Энэ төрлийн нөхөн сэргээлтийг ул мөр элементээр бохирдсон хөрсөнд өргөнөөр ашигладаг боловч органик бохирдуулагчийг зайлуулах, био задралд оруулахад мөн үр дүнтэй. Нөхөн сэргээх үйл явц дахь ургамал, бохирдуулагчийн төрлөөс хамааран фито нөхөн сэргээлтийг фито тогтворжуулагч, фитоэкстракц, фито дэгдэлт, фито задрал гэсэн 4 дэд аргад хувааж болно [28-31].



2-р зураг. Хүнцэл (As)-аар бохирдсон хөрсийг нөхөн сэргээх фито механизм

- *Фито тогтворжуулагч*

Бохирдуулагчид тэсвэртэй ургамлыг ашиглан бохирдсон хөрсийг бэхжүүлж, хөдөлгөөнгүй болгон салхи, усны элэгдлээр бохирдуулагчийг тархахаас сэргийлдэг. Энэхүү фитотехнологийн гол зорилго нь хөрсөн дэх бохирдуулагчийн био хүртээмж, шилжилтийг багасгах юм.

Хөрсөн дэх ул мөр элементийн хөдөлгөөнгүй байдал нь ургамлын төрөл зүйл, талбайн шинж чанараас хамаарна. Уусах чанар багатай нэгдэл үүсгэх, хелат нэмэх, ургамлын үндэс рүү шингээх зэргээр нэмэлт арга хэмжээ авч болно [32, 33].



3-р зураг. *Miscanthus x giganteus* ургамал

Нөхөн сэргээлтийн жишээ 3. Украины Ивано-Франковск мужийн Долина цэргийн бэлтгэлийн бүсэд 1992 онд хаагдсан 5 га цэргийн зориулалттай талбайн хөрсний хүн амын эрүүл мэндэд үзүүлэх сөрөг нөлөө, эрсдэлийг тодорхойлсон. Уг хэсгийн хөрс, гүний ус

нь ул мөр элемент, тодорхойгүй органик нэгдлүүдээр бохирдсон байсан. 2010 оны эхэн үед нийгмийн эрүүл мэнд, байгаль орчинд учирч болзошгүй эрсдэлийг бууруулах хөтөлбөрийг боловсруулах хүртэл энэ газар орхигдсон хэвээр байв. Орон нутгийн эрх баригчид НАТО-той

хамтран аюулгүй био түлш бий болгохын зэрэгцээ микроэлементийг тогтворжуулах арга хэмжээг хэрэгжүүлэхээр зорьсон. *Miscanthus x giganteus* нь үндэс, иш нь ул мөр элементийг хамгийн бага хэмжээгээр навчиндаа шилжүүлдэг ургамал бөгөөд энэ шинж чанарт нь түшиглэн сонгосон. 0.6 га талбай бүхий туршилтын талбайд *Miscanthus x giganteus* тарьж, 3 жилийн турш хөрсийг туршиж судалсан. Туршилтаар хөрсөнд шохой, органик

• Фитоэкстракц

Фитоэкстракцын процесс нь хөрсний бохирдуулагчийг ургамалд шууд шингээх байдалд үндэслэдэг. Ургамлын үндэснээс найлзуурт шилжих бохирдуулагчийн хэмжээ бохирдуулагч болон ургамлын төрлөөс хамаарна. Хөрсний микроэлементүүд нь биологийн хувьд задрахгүй, химийн аргаар устгах боломжгүй байдгаараа бусад бохирдуулагчаас ялгаатай. Эдгээр нь амьд биетийн эд эсэд нэвтэрч, хүнсний сүлжээнд хуримтлагдан био хуримтлал үүсгэх чадвартай [35]. Fe, Mn, Zn, Cu, Mg, Mo, Ni зэрэг микроэлементүүд ургамлын өсөлт, бодисын солилцоонд чухал үүрэг гүйцэтгэдэг бол Cd, Cr, Co, Pb, Hg нь тодорхой үүрэг гүйцэтгэдэггүй. Ургамлын зарим төрөл нь эдгээр элементүүдийг үндсээрээ шингээж, найлзууртаа хуримтлан бохирдсон хөрсийг нөхөн сэргээхэд эерэг хувь нэмэр оруулдаг боловч энэ ургамлыг мал, зэрлэг амьтан, хүн хэрэглэж микроэлементүүд хүнсний сүлжээнд ороход хүргэдэг [32, 33]. Шингээлтээр ургамлын хоруу чанар нэмэгдэх тул

бордоо нэмэх нь биотүлшний өсөлтийг идэвхжүүлэхийн зэрэгцээ навчны ул мөр элементийн шимэгдэлтийг багасгах хамгийн сайн тариалалтын арга болохыг баталжээ. 3 жилийн хугацаанд хөрсөн дэх C, N, P-ын агууламж нэмэгдэж, хөрс тогтворжиж, хөрсний элэгдэл багассан. Энэ төсөлд 8000 ам.доллар буюу 1.3 \$/м² зарцуулсан бөгөөд зардлын 70% ургамлын тариалалтад зарцуулагдсан байна [34].

хүнсний сүлжээнд ордоггүй ургамлын зүйлийг сонгох нь чухал юм. Өөрөөр хэлбэл нөхөн сэргээлтийн энэ аргыг сонгохдоо хуримтлагдсан бохирдуулагчдын эцсийн шатыг анхаарах шаардлагатай [32, 36].

Нөхөн сэргээлтийн жишээ 4. Италийн Тоскана хотын Ритонто уулын горхи нь Фонтасинальдо пиритийн уурхайгаар дамжин 2 км урсдаг тул уурхайн ус зайлуулах шугамын хүчиллэг усаар хөрс бохирдсон (4-р зураг). Энэ горхи урссаар Италийн баруун эрэгт Газар дундын тэнгист цутгадаг байна.

Голын шүүгдээгүй усны шинжилгээгээр pH 4.1, Fe 56 мг/л, Mn 11.9 мг/л агууламжтай байв. Голын хөрс, усны нөөцийг хамгаалах зорилгоор намгархаг газарт идэвхгүй био шүүлт, саармагжуулалт, ургамлын нөхөн сэргээлтийг гүйцэтгэхээр голыг тойрог зам болгон тусгаарласан бөгөөд 60 л/мин тохируулсан усны шахуургыг байнгын ажиллагаатай байлгасан. Шахуургын хурдыг голын жилийн урсцад үндэслэн тогтоожээ.



4-р зураг. Нөхөн сэргээлтийн өмнөх, нөхөн сэргээлтийн үеийн болон дараах байдал

Голын намгархаг газрын хойд эрэгт хэд хэдэн цэг ухаж, өндөр нягтралтай полиэтилен нэвчилтгүй мембранаар бүтээсэн. Шохойн чулууны дэвсгэр дээр байрлуулсан органик материалыг нимгэн, нэвчилттэй давхарга бүхий органик бодисоор дүүргэсэн (4-р зураг). Органик болон шохойн чулууны энэ холимог нь металлыг зайлуулж, усны шүлтлэг байдлыг хангаж, хүчиллэгийг бууруулдаг. 15-30 см шохойн чулуу нь 100 см орчим гүнтэй бөгөөд дотор нь ус 5 см налуу байдлаар урсдаг. Дараа нь *Typha sp.*, *Juncus sp.* зэрэг бичил биетний үйл ажиллагааг идэвхжүүлдэг ургамал тариалсан. Органик субстратыг 15 жилийн дараа солих шаардлагатай гэж тооцоолсон. Уг инженерийн систем зорилтоо амжилттай биелүүлж, үндсэн ургамлууд голын эрэгт дахин ургаж эхэлсэн (4-р зураг) ба нөхөн сэргээлт

- *Фито задрал*

Фито задрал нь хөрсний органик бохирдуулагчийг мөөгөнцөр, бичил биетнээр задлах арга юм. Ургамлын тусламжтайгаар биологийн задрал нь бичил биетний идэвхжил, биологийн олон янз байдлыг сайжруулж, бодисын солилцооны идэвхжилээр органик бохирдуулагчийн био шилжилтийг дэмждэг байна [31, 41].

2.4. Шавж ашиглан нөхөн сэргээх:

Хөрсний бичил биетнийг бохирдсон хөрсний био-индикатор болгон

2004-2015 оны хооронд үргэлжилж 5 сая ам.доллар зарцуулсан [37, 38].

- *Фито дэгдэлт*

Фито дэгдэлт нь ургамал-бичил биетэн-хөрсний системд бохирдуулагчийг хувиргаж, ууршуулдаг ургамлын тусгай фермент ашигладаг арга юм. Үндсэндээ бохирдуулагч нь хөрснөөс ургамал руу шилжиж, улмаар агаар мандалд ялгардаг. Энэ техникийг органик бус болон органик Hg-аар бохирдсон хөрсөнд ашиглахад ургамал нь Hg(II)-ийг хоруу чанар багатай Hg болгон хувиргаад эцсийн дүндээ энэ нэгдэл ургамлаас ууршиж арилдаг байна [39, 40]. Энд бохирдуулагч бодис нэг орчноос нөгөөд шилжиж байгаа тул зохистой эсэхийг баталгаажуулахын тулд эрсдэлийн үнэлгээ хийх шаардлагатай.

ашигладаг боловч тохиромжтой нөхцөлд тэдгээрийг хөрсийг нөхөн сэргээх зорилгоор ашиглаж болно. Өт, хорхой нь хөрсний химийн бохирдлыг тэсвэрлэн эд эсдээ био хуримтлал үүсгэдэг. Эдгээр нь хөрснөөс ул мөр элемент, пестицид, липофилийн органик бохирдуулагч, полицагаригт ароматик нүүрсустөрөгчийг задалж, зайлуулдаг болохыг тогтоожээ. Олон төрлийн бичил амьтдаар дамжин хөрсний бохирдол нь био өөрчлөлт, био задралд орж хоргүй болдог. Үүний зэрэгцээ олон төрлийн шавж нь хөрсийг сайтар сийрэгжүүлж, их

хэмжээний хөрсийг шингээж, шим тэжээлт бодис, микроэлемент хэлбэрээр ялгаруулдаг тул хөрсний физик, хими, биологийн шинж чанар мэдэгдэхүйц сайжирдаг [42].

3. *IN SITU* ФИЗИК, ХИМИЙН ТЕХНОЛОГИ

Физик, химийн аргаар цэвэрлэх энэ арга нь байгалийн процессыг илүү хурдасгах тул удаан үргэлжилсэн, их бохирдуулагч агуулсан хөрсийг нөхөн сэргээхэд тун тохиромжтой. Энэ арга нь өртөг өндөр, боловсруулах ажиллагаа ихтэй бөгөөд боловсруулалтын дараа биологийн олон янз байдал, хөрсний үндсэн шинж чанарыг дахин сэргээхэд хэцүү байдаг сул талтай [8, 43].

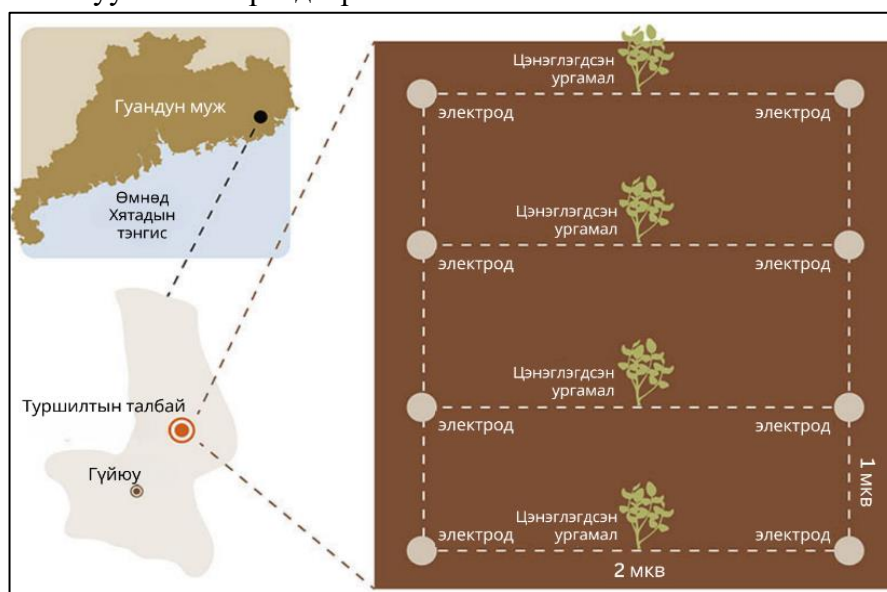
3.1. *In situ* физик нөхөн сэргээлт

• Электрокинетик тусгаарлалт

Электрокинетик нөхөн сэргээлтэд хөрсний молекулын шилжилтийг сайжруулахын тулд цахилгаан химийн процессыг ашигладаг. Энэ аргыг бохирдсон хөрсөөс ул мөр элементийг арилгахад түлхүү хэрэглэнэ. БНСУ-ын Жанхан хайлуулах үйлдвэрийн

бохирдсон хөрснөөс ул мөр элементийг арилгахад энэ аргыг ашигласан бөгөөд ижил төстэй олон судалгааны үр дүнд ерөнхийдөө бүх системд дунд зэргийн тогтмол гүйдэл хамгийн үр дүнтэй гэж дүгнэсэн [44-47].

Нөхөн сэргээлтийн жишээ 5. Хятадын Гуанду мужийн цахим хог хаягдлыг дахин боловсруулах үйлдвэрийн талбайд нөхөн сэргээлтийг *in situ* фитоэкстракцын туршилттай хослуулан гүйцэтгэсэн. Үйлдвэрлэлийн явцад хөрс, гүний ус Cd, Cu, Cr, Pb, Hg, Zn зэрэг ул мөр элементээр бохирдож байгааг илрүүлж, бохирдсон талбайг 8 хэсэгт хувааж металлын хордлогыг тэсвэрлэх чадвартай *Eucalyptus globulus* ургамал тарьж ургуулсан. Нөхөн сэргээлтээр хөрсний шинж чанар бага зэрэг сайжирч ургамал газрын гадаргаас доош 1 м хүртэл чийгийг барьж, улмаар шүүрлийн ус нэвчилтийг бууруулж байгааг тогтоосон.

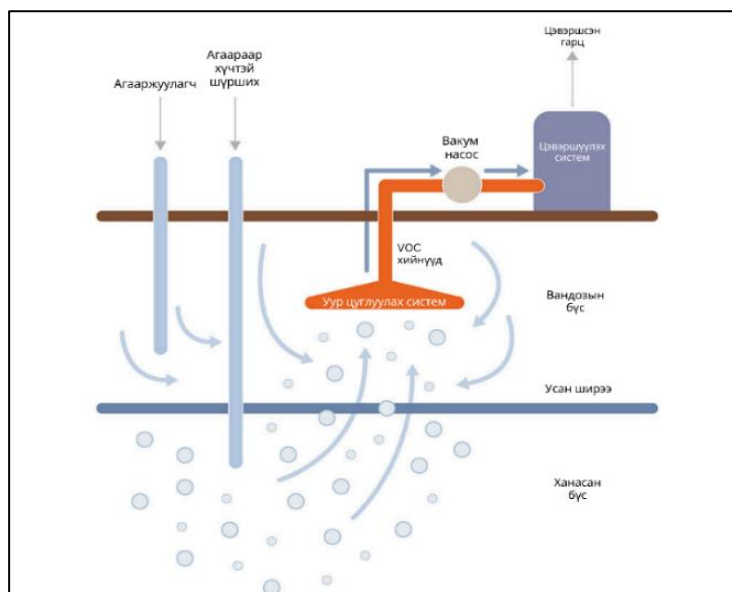


5-р зураг. Электрокинетик ашигласан фитоэкстракцын загвар

• Хөрсний уур цуглуулах

Хөрсний уур цуглуулах нь био агааржуулалт, био цацралтай ижил төстэй үйл явцтай. Энэ нь бохирдсон хөрснөөс дэгдэмхий, хагас дэгдэмхий бохирдуулагчийг гаргаж авдаг, сүвэрхэг чанар өндөртэй хөрсөнд хамгийн үр дүнтэй, харин шаварлаг хөрсөнд үр [48].

дүнгүй арга юм. Био агааржуулалтаас ялгаатай нь энэ аргад хөрсөөр дамжуулан агаарыг сорох вакумыг хангахын тулд олборлох насос ашиглаж, мөн бохирдсон хөрсөнд агаар оруулахын тулд идэвхгүй агааржуулалтын нүхийг бүс бүрд үүсгэдэг байна (6-р зураг) [3,



6-р зураг. Хөрсний уур цуглуулах үйл явц

Нөхөн сэргээлтийн жишээ 6. Италийн Таранто дахь үйлдвэрлэлийн бүс нь хүнд хөнгөн нефтийн бүтээгдэхүүнээр бохирдсон. Энэ нь тус улсын сайдын 2000 оны 01 сарын 10-ны өдрийн тогтоолоор Италийн болон Европын хамгийн их бохирдсон газруудын жагсаалтад орсон байв. Газрын тосны нүүрсустөрөгчөөр бохирдсон уг талбайг хөрсний уурын олборлолт (SVE)-ын аргаар нөхөн сэргээсэн. 4 жилийн нөхөн сэргээлтийн дүнд хөрсөн дэх дэгдэмхий органик нэгдлүүд (VOCs)-ийн концентрац буурч, 73% үр дүнд хүрсэн. Нөхөн сэргээлтийн үр ашиг 4.5-99.9% байсан бөгөөд энэ нь ижил бохирдуулагчид нэг арга хэрэглэсэн ч бусад нөхцөлөөс шалтгаалж үр дүн өөр өөр байж болохыг харуулж байна. Судалгаагаар хөрсний бүтэц, чийгшил, нэвчилт, бохирдуулагчийн

ангилал зэрэг нь нөхөн сэргээлтийн хэмжээнд нөлөөлдөг болохыг тогтоожээ. Хөрсний бүтэц нь газрын гадаргуугаар дамжих агаарын хурд, хийн хөдөлгөөнд оролцож, улмаар VOC-ийн ууршилтад шууд нөлөөлдөг. Хөрсний нэвчилт өндөр, бохирдуулагчийн молекулын жин бага байх тусам ууршилт илүү үр дүнтэй байна. Туршилт дуусахад 6 хэсэгт хүнд нүүрсустөрөгчийн агууламж өндөр хэвээр байсан тул нөхөн сэргээлтийг дахин 2 жилээр сунгахаар төлөвлөжээ. Нөхөн сэргээлтийн эхний жилд 420 кг гаруй VOC гаргаж авсан нь 4 жилд олборлосон нийт массын (540 кг) 80%-тай тэнцэж байна [49]. Нөхөн сэргээлтийн зардал өмнө нь хэрэглэсэн шахах, боловсруулах, ухах, овоолго хийх аргуудаас хамаагүй бага байжээ.

3.2. In situ химийн нөхөн сэргээлт:
Химийн боловсруулалтын энэ аргаар хөрс болон гүний уснаас бохирдуулагч бодисыг зайлуулахын тулд зорилтот нэгдлүүдийн исэлдэлтийн төлөвийг өөрчилж, байгаль орчинд хор хөнөөл багатай илүү тогтвортой хэлбэрт шилжүүлдэг. Хэрэглэх химийн урвалжаас хамаарч хэд хэдэн ялгаатай арга техникийг хэрэглэнэ. Энэ нь бохирдуулагчийн төрөл, талбайн шинж чанар, хөрс эсвэл гүний усны чанарын зорилтот үр дүн зэрэг олон хүчин зүйлээс хамаарна. Хамгийн түгээмэл хэрэглэдэг урвалжууд нь MnO_4^- , H_2O_2 , Fe(0) зэрэг болно. *In situ* химийн нөхөн сэргээлт нь үр дүн өндөртэй хэдий ч эмчилгээний үр нөлөө болон хүрээлэн буй орчинд үзүүлэх болзошгүй нөлөөллийг үнэлэхийн тулд тогтмол хяналт тавих шаардлагатай байдаг [50, 51].

- *Тогтворжуулагч*

Бохирдуулагч нэгдлийн тогтворжилтыг химийн урвалаар өөрчилж болно.

- *Исэлдүүлэгч*

Исэлдүүлэгч бодисын уусмалыг бохирдсон хөрсөнд шууд хэрэглэдэг. Химийн исэлдүүлэгчээр H_2O_2 , O_3 , MnO_4^- , персульфат зэргийг хамгийн түгээмэл хэрэглэдэг. Эдгээр исэлдүүлэгч бодисууд нь олон тооны органик бохирдуулагч (C_2HCl_3 зэрэг ханаагүй алифатик, C_6H_6 зэрэг үнэрт нэгдэл)-ийг хурдан хугацаанд өндөр үр ашигтайгаар (1 минутын дотор 90% дээш) бүрэн задалдаг. Технологийн үр ашиг нь исэлдүүлэгч бодисын шинж чанар, бохирдсон хөрсөнд нэвтрүүлэх механизм зэрэг олон хүчин зүйлээс шалтгаалах ч хамгийн чухал анхаарах асуудал бол тухайн хөрсний морфологи, геологийн онцлог байдал юм [55, 56].

Түгээмэл хэрэглэгддэг органик бус тогтворжуулагчид уусдаг силикат, цеолит, шохой, цемент, фосфат, хүхэрт нэгдлүүд орно. Идэвхжүүлсэн болон био нүүрс нь микроэлемент, органик бохирдуулагчийн био хүртээмжийг бууруулан бохирдсон хөрсийг хөдөө аж ахуйн хэрэгцээнд ашиглахад саадгүй болгодог [4, 11, 52]. Судалгаагаар био нүүрс хэрэглэхэд цагаан будаа, үр тарианы Cd шингээх чадвар эрс багасгаж, бохирдсон хөрсөөс авах ургацын хэмжээ нэмэгдэж байсан. Био нүүрсний металлыг хөдөлгөөнгүй болгох механизм нь хөрсөн дэх хүчлийг саармагжуулах, хөрсний катион солилцооны чадавхыг нэмэгдүүлэх чадвар дээр үндэслэдэг [53]. Нэгдсэн үндэсний байгууллагын Хүнс, хөдөө аж ахуйн байгууллагаас хөрсийг хагалах замаар нүүрстөрөгчийг хөрсөнд шууд шингээн бохирдуулагчийг тогтворжуулахын зэрэгцээ хөрсний үржил шимийг сайжруулах боломжтой гэжээ [54].

- *Өдөөгч*

Энэ нь хлорорганик нэгдлийг хлоргүйжүүлэх, микроэлементийг бага хортой өөр нэгдэлд шилжүүлэх зэрэг олон төрлийн урвал дээр үндэслэдэг арга юм. Исэлдүүлэгчийн нэгэн адил өдөөгч бодисыг бохирдсон хөрсөнд шууд шахаж ус нэвчдэг реактив хаалт ашиглан хэрэглэдэг. Өдөөгч бодисуудад төмрийн эрдэс, полисульфид, дитионит, биметалл материалууд орно. Энэ процессыг ашиглан органик нэгдлүүдийг (хлорорганик пестицид), полицагаригт ароматик бодис, хлорт уусгагчийг (трихлорэтилен) хлоргүйжүүлж, Cr(VI) -ыг бага хортой, хөдөлгөөн багатай Cr(III) төлөвт хувиргах боломжтой [57, 58].

3.3. *In situ* дулааны нөхөн сэргээлт: Байгууламжид суурилсан дулааны боловсруулалтад дараах 5 технологи багтана:

5. шилэнжүүлэлт.

Шилэнжүүлэхээс бусад технологийн зорилго нь хөрсийг халаах замаар дэгдэмхий, хагас дэгдэмхий бохирдуулагчийг зайлуулах үр ашгийг нэмэгдүүлэх явдал юм. Температурын өсөлт нь зарим бохирдуулагчийн хими, биологийн задралыг өдөөдөг. Уур олборлох замаар бохирдуулагч, тэдгээрийн задралын бүтээгдэхүүнийг устгах нь эдгээр технологийн үндсэн хэсэг юм. *In situ* болон *ex situ* дулааны боловсруулалтад ашигладаг өндөр температураас шалтгаалан хөрсний бүтэц, химийн найрлага өөрчлөгдөж, биологийн нэгдэл доройтож, ихэнх тохиолдолд хөрсийг дахин ашиглах боломжгүй болдог сул талтайг анхааран үзэх шаардлагатай [59-61].

- *Цахилгаан эсэргүүцлийн халаалт*

Цахилгаан эсэргүүцлийн халаалт нь бохирдсон хөрсөөр гүйдэл дамжуулах электродын сүлжээг бий болгох явдал юм. Гүйдэл хөрсний нүхний чийгээр дамжин урсах үед хөрсний эсэргүүцэх байдал дулаан үүсгэнэ. Электрод нь хөрсний сонгосон гүнд цахилгаан дамжуулах зориулалттай. Дэгдэмхий уураар хөрс цэвэрлэх нь ихэнх бохирдуулагчийг зайлуулах нийтлэг механизм бөгөөд ялгарсан хийг олборлох, боловсруулах шаардлагатай.

- *Уураар сайжруулсан олборлолт*

1. цахилгаан эсэргүүцлийн халаалт,
2. уураар сайжруулсан олборлолт,
3. дамжуулагч халаалт,
4. радио давтамжит халаалт,

Энэ олборлолтоор бохирдсон хөрсөнд уур шахах, олборлох цооногийн сүлжээг суурилуулж, ханасан бүс рүү уур шахдаг. Уур нь бохирдуулагчийг гүний ус руу нэвчүүлж хий болгон хувиргадаг. Газрын доорх усыг бохирдуулагчтай хамт олборлох цооногоос зайлуулж, цаашид *ex situ* технологиор ялгаж, цэвэршүүлдэг.

Нөхөн сэргээлтийн жишээ 7. Өнөөдрийн байдлаар АНУ-ын Beede Waste Oil сангийн 17 га талбайн дийлэнх хэсэг суурьшлын бүс байна. Харин 1920-1994 онд энэ хэсэгт хаягдал тосыг боловсруулах, борлуулах, түлшний тос худалдаалах, бохирдсон хөрсийг хүйтэн хольцтой асфальт болгон боловсруулах зэрэг газрын тостой холбоотой үйл ажиллагаа эрхэлдэг олон үйлдвэрүүд байрладаг байв. Үүний дүнд шаварлаг, хайргатай элснээс бүрдсэн хөрс нь газрын тос, бусад химийн бодисоор маш ихээр бохирдсон.

2010 онд 2000-2005 оны хооронд 340,000 л хөнгөн усгүй фазын шингэн тосоор бохирдсон газрын бохирдлыг арилгаж талбайг нөхөн сэргээхээр шийдвэрлэсэн. Бохирдол $10,150 \text{ м}^3$ эзлэхүүнтэй $10,650 \text{ м}^2$ талбай эзэлж 5-8 м гүн газарт бүрэн тархсаныг тогтоосон (7-р зураг). Уур олборлох систем нь 88 уурын шахах худаг, 31 олон фазын олборлох худаг, 38 олон гүнийн температурын хяналтын шугамаас бүрдэнэ.



7-р зураг. Beede Waste Oil сангийн талбайн бохирдсон хэсэг

Анхаарал татсан бохирдуулагчид нь C_2HCl_3 , $C_2H_2Cl_2$, C_6H_6 , C_8H_{10} , C_2Cl_4 , $C_2H_3Cl_3$, C_6H_5R , $C_{10}H_8$ байв. 2015 оны 5 сараас 2016 оны 2 сарын хооронд ойролцоогоор 65,400 л тос, 68,000 кг массыг талбайгаас зайлуулж нөхөн сэргээлтийн дараах хөрсний шинж чанар үндэсний стандартыг хангасан болохыг тогтоосон [62].

- Дамжуулагч халаалт

Дамжуулагч халаалт нь босоо халаагуур, цахилгааны сүлжээг ашиглах эсвэл бохирдсон талбай нь газрын гадаргатай ойр байх үед халаагч бүтээлгийг гадаргуу дээр бүрхэж явуулдаг арга юм. Босоо цацрагийн халаагуурыг хөрс, гүний уснаас хамгаалахын тулд битүүмжилсэн ган материал хэрэглэдэг.



8-р зураг. In situ дулааны десорбц, цэвэрлэх төхөөрөмж

Нөхөн сэргээлтийн жишээ 8. АНУ-ын Нью Жерси мужийн Teterboro Landing Brownfield Redevelopment-ийн талбайн *in situ* дулааны десорбцын үйл ажиллагааны сайн жишээ юм. Нью Жерси дэх 25 га онгоц буух талбайг 70 жилийн турш Бендикс нисэх корпорац ажиллуулж сансрын технологи үйлдвэрлэх үйл ажиллагаа явуулж байжээ. Газрын тос,

хлоржуулсан органик нэгдлээр маш их бохирдсон тус талбайд цахилгаанаар халаадаг дулааны 907 худаг, температур хянах 80 цэг, даралт хянах 25 цэг, олон фазын олборлолтын 35 цэгийг тус тус байгуулсан (8-р зураг). Талбайн хамгийн гүн хэсэг нь 12 м байв. Нөхөн сэргээлтэд $4.25 \text{ Нм}^3/\text{цаг}$ хүчин чадалтай, ялгарах хийг боловсруулах дулааны исэлдүүлэгч хэрэглэсэн. Халаалтад зарцуулсан нийт

эрчим хүч нь 23 сая кВт.ц буюу цэвэршүүлсэн хөрсний 290 кВт.ц/м³ хэмжээтэй тэнцэж байна. Тооцоолсон 15,000 кг бохирдуулагчийг дулааны исэлдүүлэгч цэвэрлэх системээр газар дээр нь устгасан. Тетерборо буух талбайн нөхөн сэргээлтийн ажлыг 2013 онд хийж дуусгасан. Тухайн үед энэ нь АНУ-д 1.3 га талбайг хамарсан хамгийн том *in situ* дулааны десорбцын төсөл байсан учраас дэлхий нийтийн анхаарлыг их татсан [63].

Энэ технологи нь бохирдсон хөрсийг тогтвортой шилэн, талст хатуу бодис болгон хувиргах дулааны боловсруулалтын процесс юм. Бохирдсон хөрсийг хайлуулан дулаан үйлдвэрлэх (1) электрод ба цахилгаан эсэргүүцэл, (2) плазмын нуман технологи ашиглах гэсэн 2 арга бий. Эрчим хүчний зардал өндөр тул зөвхөн цацраг идэвхт нэгдэл, хог хаягдлыг

- *Радио давтамжит халаалт*

Радио давтамжит халаалт нь хөрсийг газар дээр нь халаах өндөр давтамжит хувьсах цахилгаан гүйдлийг ашигладаг. Цахилгаан талбайн хэрэглээ нь туйлт молекулуудын хөдөлгөөн/чичиргээг үүсгэдэг бөгөөд энэ нь дулааныг механикаар үүсгэдэг. Технологийн үр дүн хөрсөнд ус байгаа эсэхээс шууд хамаардаг ба хөрс хатах тусам халаалтын нөлөө буурч, чийгийг тогтвортой байлгахын тулд ус нэмэх шаардлагатай болдог.

- *In situ шилэнжүүлэлт*

зайлуулахад эдгээр аргуудыг ашиглагддаг.

Нөхөн сэргээлтийн жишээ 9. Энэ технологийг 2000 онд Лос Аламосын үндэсний лабораторид (9-р зураг) бохирдсон хөрс болон доод давхарга нь 7 м гүнд хайлж байсан цацраг идэвхт хаягдал зайлуулах суваг шуудууг ашиглан гүйцэтгэсэн нь өндөр үр дүнтэй байсан.



9-р зураг. *In situ* шилэнжүүлэх үйл ажиллагаа

Цацраг идэвхт хог хаягдлыг, түүний дотор бохирдсон хөрсийг удаан хугацаагаар хадгалахад тохиромжтой шилэн блок болгон тогтворжуулах зорилгоор 1600°C хүртэл халаан хөрс, цацраг идэвхт хаягдлыг хайлуулж, шилэн

блокоор хөргөнө. Уг технологи нь байнгын байгууламж эсвэл хөдөлгөөнт үйлдвэртэй газарт хэрэгжих боломжтой. Шилэнжилтийг газарт ухаж эсвэл газрын дээр хийж болно. Бүх системүүдэд

цахилгаан халаалтыг хангахын тулд электрод ашигладаг онцлогтой [64, 65].

ДҮГНЭЛТ

Хөрсний бохирдлын нэн тулгамдсан асуудал нь экологийн тэнцвэрийг сэргээж, хүрээлэн буй орчны эрүүл мэндийг хамгаалах шинэлэг, үр дүнтэй нөхөн сэргээх стратегийг боловсруулах юм. Уламжлалт аргууд нь зардал өндөр, хүрээлэн буй орчныг сүйтгэдэг зэрэг томоохон сул талуудтай бол *in situ* аргууд нь бохирдуулагчийг үр дүнтэй бууруулах, арилгахын тулд байгалийн үйл явц, химийн инженерчлэлийг хослуулан ашигладаг давуу талтай. Био болон фито нөхөн сэргээлт, химийн исэлдэлтийн аргууд нь хортой бодисыг хоргүйжүүлэх, тогтворжуулахад бичил биетэн, ургамлын чадавх, химийн нэгдлийн шинж чанарыг ашигладаг. Эдгээр аргууд нь хөрсний бүтэц, биологийн олон янз байдлыг хадгалахаас гадна бохирдуулагчийг зайлуулах өндөр үр ашигтай байна. Исэлдүүлэх аргатай харьцуулахад био/фито нөхөн сэргээлт нь биологийн процессыг ашиглан хөрсийг нөхөн сэргээдэг, байгаль орчинд ээлтэй сонголтууд юм.

Химийн инженерчлэлийн дэвшилтэт аргууд, түүний дотор дулааны нөхөн сэргээлт, газар дээр нь химийн

боловсруулалт хийх зэрэг нь бохирдол ихтэй хөрсийг богино хугацаанд найдвартай нөхөн сэргээх боломж буйг харуулж байна. Харин хөрсний бүтэц, биологийн бүлгүүдийн өөрчлөлтийг сайтар анхаарч бохирдол бүрд тохирсон арга технологийг хэрэгжүүлэх нь чухал юм. Цаашилбал, нөхөн сэргээлтийн үр дүнгийн байнгын мониторинг, хяналт нь эдгээр технологийн хөрсний эрүүл мэнд, биологийн төрөл зүйлд үзүүлэх урт хугацааны нөлөөг нэмэгдүүлэхэд тусална.

Химийн инженерчлэлийн ололт, амжилтыг хөрсний нөхөн сэргээлтэд ашиглах нь хөрсний бохирдлын тулгамдсан асуудлыг шийдвэрлэх шинэ боломжийг бидэнд олгож байна. Эдгээр технологийг шинэчилж, боловсронгуй болгосноор бохирдсон хөрсийг сэргээж, байгаль орчноо хамгаалах тогтвортой шийдлийг бий болгох боломжтой. Эрдэмтэн судлаачид, бодлого боловсруулагчид, олон нийтийн хамтын ажиллагаа нь энэ зорилгыг хэрэгжүүлэх, эрүүл гарагийг бий болгох гол түлхүүр юм.

АШИГЛАСАН ХЭВЛЭЛ

1. Steffan, J. J., et al. "The effect of soil on human health: an overview." *European journal of soil science* 69.1 (2018): 159-171.
2. Lu, Yonglong, et al. "Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China." *Environment international* 77 (2015): 5-15.
3. Ugrina, Marin, and Antonija Jurić. "Current trends and future perspectives in the remediation of polluted water, soil and air—A review." *Processes* 11.12 (2023): 3270.
4. Zhang, Tong, et al. "In situ remediation of subsurface contamination: opportunities and challenges for nanotechnology and advanced materials." *Environmental Science: Nano* 6.5 (2019): 1283-1302.

5. Liu, Lianwen, et al. "Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability." *Science of the total environment* 633 (2018): 206-219.
6. Dermont, Gérald, et al. "Metal-contaminated soils: remediation practices and treatment technologies." *Practice periodical of hazardous, toxic, and radioactive waste management* 12.3 (2008): 188-209.
7. Sales da Silva, Israel Gonçalves, et al. "Soil bioremediation: Overview of technologies and trends." *Energies* 13.18 (2020): 4664.
8. Aparicio, Juan Daniel, et al. "The current approach to soil remediation: A review of physicochemical and biological technologies, and the potential of their strategic combination." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 10.2 (2022): 107141.
9. Gruiz, K. "Contaminated site remediation: Role and classification of technologies." *Engineering Tools for Environmental Risk Management—4: Risk Reduction Technologies and Case Studies*. CRC Press, 2019. 1-37.
10. Williams, Jera. "Bioremediation of contaminated soils: a comparison of in situ and ex situ techniques." *Engineering Biology* (2006).
11. Kuppusamy, Saranya, et al. "In-situ remediation approaches for the management of contaminated sites: a comprehensive overview." *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 236* (2016): 1-115.
12. Kuppusamy, Saranya, et al. "Ex-situ remediation technologies for environmental pollutants: a critical perspective." *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 236* (2016): 117-192.
13. Tomei, M. Concetta, and Andrew J. Daugulis. "Ex situ bioremediation of contaminated soils: an overview of conventional and innovative technologies." *Critical reviews in environmental science and technology* 43.20 (2013): 2107-2139.
14. Azubuiké, Christopher Chibueze, Chioma Blaise Chikere, and Gideon Chijioke Okpokwasili. "Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects." *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 32 (2016): 1-18.
15. Khan, Shamshad, et al. "Global soil pollution by toxic elements: Current status and future perspectives on the risk assessment and remediation strategies—A review." *Journal of Hazardous Materials* 417 (2021): 126039.
16. Kaszycki, Paweł, et al. "Aerobic process for in situ bioremediation of petroleum-derived contamination of soil: a field study based on laboratory microcosm tests." *Ecological Chemistry and Engineering. A* 17.4-5 (2010): 405-414.
17. Sharma, Jot. "Advantages and limitations of in situ methods of bioremediation." *Recent Adv Biol Med* 5.2019 (2019): 10941.
18. Koshlaf, Eman, and Andrew S. Ball. "Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments." *AIMS microbiology* 3.1 (2017): 25.
19. Konur, Ozcan. "Bioremediation of petroleum hydrocarbons in contaminated soils: A review of the research." *Petrodiesel Fuels* (2021): 995-1013.
20. Mystrioti, Christiana, and Nymphodora Papassiopi. "A comprehensive review of remediation strategies for soil and groundwater contaminated with explosives." *Sustainability* 16.3 (2024): 961.

21. Maszenan, A. M., Yu Liu, and Wun Jern Ng. "Bioremediation of wastewaters with recalcitrant organic compounds and metals by aerobic granules." *Biotechnology Advances* 29.1 (2011): 111-123.
22. Xia, Shaopan, et al. "A critical review on bioremediation technologies for Cr (VI)-contaminated soils and wastewater." *Critical reviews in environmental science and technology* 49.12 (2019): 1027-1078.
23. Jin, Yuyao, et al. "Effects and mechanisms of microbial remediation of heavy metals in soil: a critical review." *Applied Sciences* 8.8 (2018): 1336.
24. Prasad, Majeti Narasimha Vara, Kenneth S. Sajwan, and Ravi Naidu, eds. *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation*. CRC Press, 2005.
25. Xu, Yang, et al. "Successful bioremediation of an aged and heavily contaminated soil using a microbial/plant combination strategy." *Journal of Hazardous Materials* 264 (2014): 430-438.
26. Antonio, García-Villanueva Luis, and Fernández-Villagómez Georgina. "Health risk assessment of zone 7 contaminated with benzene in the environmental liability generated by the "March 18th Ex-Refinery" in Mexico City." *Ingeniería, investigación y tecnología* 15.3 (2014): 419-428.
27. Siracusa, Giovanna. "Recalcitrant compounds in soils and dredged sediments: new biotechnological approaches for the recover to the public use." (2018).
28. Malik, Zakir Hussain, K. Chellappan Ravindran, and G. A. N. E. S. A. N. Sathiyaraj. "Phytoremediation: a novel strategy and eco-friendly green technology for removal of toxic metals." *Int J Agric Environ Res* 3.1 (2017): 1-18.
29. Fischerová, Zuzana, et al. "A comparison of phytoremediation capability of selected plant species for given trace elements." *Environmental pollution* 144.1 (2006): 93-100.
30. Liu, Jianv, Xin Xin, and Qixing Zhou. "Phytoremediation of contaminated soils using ornamental plants." *Environmental Reviews* 26.1 (2018): 43-54.
31. Shrirangasami, S. R., et al. "Phytoremediation of contaminated soils-a review." *Int J Curr Microbiol Appl Sci* 9.11 (2020): 3269-3283.
32. Muthusaravanan, S., et al. "Phytoremediation of heavy metals: mechanisms, methods and enhancements." *Environmental chemistry letters* 16 (2018): 1339-1359.
33. Sumiahadi, A., and R. Acar. "A review of phytoremediation technology: heavy metals uptake by plants." *IOP conference series: earth and environmental science*. Vol. 142. IOP Publishing, 2018.
34. Humnilovych, R., et al. "Monitoring of soils contaminated by military activities during phytoremediation using *Miscanthus x giganteus*." *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2023»*. Vol. 2023. No. 1. European Association of Geoscientists & Engineers, 2023.
35. Smolińska, B. E. A. T. A., and K. A. T. A. R. Z. Y. N. A. Król. "Phytoextraction of heavy metal contaminated soils." *Zeszyty Naukowe. Chemia Spożywcza i Biotechnologia/Politechnika Łódzka* (2010): 89-98.
36. Jabeen, Ruqaya, Altaf Ahmad, and Muhammad Iqbal. "Phytoremediation of heavy metals: physiological and molecular mechanisms." *The botanical review* 75 (2009): 339-364.

37. Perotti, Martina, et al. "Thallium and other potentially toxic elements in the Baccatoio stream catchment (Northern Tuscany, Italy) receiving drainages from abandoned mines." *Mine Water and the Environment* 37.3 (2018): 431-441.
38. D'Orazio, Massimo, et al. "Thallium pollution in water, soils and plants from a past-mining site of Tuscany: sources, transfer processes and toxicity." *Journal of Geochemical Exploration* 209 (2020): 106434.
39. Pedron, Francesca, et al. "Mercury mobilization in a contaminated industrial soil for phytoremediation." *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 42.22 (2011): 2767-2777.
40. Liu, Zhongchuang, et al. "A review on phytoremediation of mercury contaminated soils." *Journal of Hazardous Materials* 400 (2020): 123138.
41. Etim, E. E. "Phytoremediation and its mechanisms: a review." *Int J Environ Bioenergy* 2.3 (2012): 120-136.
42. Vermelho, Alane Beatriz, et al. "Agricultural Pest Management: The Role of Microorganisms in Biopesticides and Soil Bioremediation." *Plants* 13.19 (2024): 2762.
43. Lv, Yuanfei, Jianfeng Bao, and Liandong Zhu. "A comprehensive review of recent and perspective technologies and challenges for the remediation of oil-contaminated sites." *Energy Reports* 8 (2022): 7976-7988.
44. Cameselle, C. "Electrokinetic remediation and other physico-chemical remediation techniques for in situ treatment of soil from contaminated nuclear and NORM sites." *Environmental remediation and restoration of contaminated nuclear and NORM sites*. Woodhead Publishing, 2015. 161-184.
45. Lin, Siyi, et al. "Remediation of emerging contaminated sites due to uncontrolled e-waste recycling." *Chemical engineering journal* 430 (2022): 133169.
46. Wang, Shuang, et al. "The influence of anaerobic dechlorination on the aerobic degradation of PCBs in e-waste-contaminated soils in an anaerobic-aerobic two-stage treatment." *Science of the Total Environment* 844 (2022): 157195.
47. Lim, Seul-Ye, Seo-Hyeon Min, and Seung-Hoon Yoo. "The public value of contaminated soil remediation in Janghang copper smelter of Korea." *Resources Policy* 50 (2016): 66-74.
48. Hoag, George E., et al. "Soil vapor extraction research developments." *Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater*. Routledge, 2023. 187-202.
49. Labianca, Claudia, et al. "Remediation of a petroleum hydrocarbon-contaminated site by soil vapor extraction: A full-scale case study." *Applied Sciences* 10.12 (2020): 4261.
50. Siegrist, Robert L., Michael A. Urynowicz, and Olivia R. West. "In situ chemical oxidation for remediation of contaminated soil and ground water." *Ground Water Currents* 37 (2000): 1-3.
51. Yin, Yujun, and Herbert E. Allen. "In situ chemical treatment." *Technology evaluation report, GWRTAC E-series report* (1999).
52. Grotenhuis, Tim JTC, and Huub HHM Rijnaarts. "In situ remediation technologies." *Dealing with Contaminated Sites: From Theory towards Practical Application*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. 949-977.
53. Siegrist, Robert L., Michelle Crimi, and Thomas J. Simpkin, eds. *In situ chemical oxidation for groundwater remediation*. Vol. 3. Springer Science & Business Media, 2011.

54. Food and Agriculture Organization. (2019). Soil pollution: A global threat to sustainable development.
55. Zhou, Zhou, et al. "Persulfate-based advanced oxidation processes (AOPs) for organic-contaminated soil remediation: A review." *Chemical Engineering Journal* 372 (2019): 836-851.
56. Alazaiza, M. Y. D., et al. "An overview of chemical oxidation-based remediation technologies for non-aqueous phase liquids removal from soil." (2022).
57. Ghule, Mahesh R., and Purushottam K. Ramteke. "Soil chemical pollution and remediation." *Hazardous and Trace Materials in Soil and Plants*. Academic Press, 2022. 57-71.
58. Nadporozhskaya, Marina, et al. "Recent advances in chemical sensors for soil analysis: a review." *Chemosensors* 10.1 (2022): 35.
59. Baker, RALPH S., John C. Lachance, and G. O. R. M. Heron. "Application of thermal remediation techniques for in-situ treatment of contaminated soil and water." *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Athens*. 2006.
60. Colombano, Stéfan, et al. "In situ thermal treatments and enhancements: theory and case study." *Environmental Soil Remediation and Rehabilitation: Existing and Innovative Solutions* (2020): 149-209.
61. Kristanti, Risky Ayu, et al. "A review on thermal desorption treatment for soil contamination." *Tropical Aquatic and Soil Pollution* 2.1 (2022): 45-58.
62. Escobar, Jeffrey R. "Holding Corporate Officers Criminally Responsible for Environmental Crimes: Collapsing the Doctrines of Piercing the Corporate Veil and the Responsible Corporate Officer." *New Eng. J. on Crim. & Civ. Confinement* 30 (2004): 305.
63. Heron, G., et al. "World's largest in situ thermal desorption project: Challenges and solutions." *Groundwater Monitoring & Remediation* 35.3 (2015): 89-100.
64. Garcia, Mr Benito. "Jul A. Canepa, P~ anager." (1998).
65. Adeola, Adeola O., et al. "Advances in the management of radioactive wastes and radionuclide contamination in environmental compartments: a review." *Environmental geochemistry and health* 45.6 (2023): 2663-2689.

In situ technologies and their applications for soil pollution

B.Munkhjin¹, I.Tuyajargal^{2*}, D.Batsuren³, B.Dulguun¹, S.Unursaikhan¹

¹National Center for Public Health, Ulaanbaatar, Mongolia

²Department for Graduate Education Policy and Management, Mongolian National university of Medical Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

³School of Engineering and Technology, National university of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

*iimaatuyajargal@gmail.com

Abstract. Since 2018, the use of new chemical engineering methods and technologies to reduce and eliminate soil pollution has become very popular. *In situ* technology separates and concentrates pollutants without disturbing the soil during all treatments and removes and cleans the contaminated site or transfers it to another area. The main advantage of *in site* processing is that it processes the soil without digging or transporting it, resulting in saving costs and less environmental change. This technology has the advantage of preserving soil structure, organic matter, and biodiversity, which are otherwise very difficult to restore again.

In situ technologies for contaminated soils are variously classified as bioremediation (using microorganisms to break down pollutants) phytoremediation (using plants to stabilize, break down, and absorb pollutants), and chemical oxidation (using oxidizing agents to convert chemical pollutants into safe forms). Chemical engineering is one of these technologies. process, model design, chemical reaction kinetics, model improvement, quality control, chemical analysis, and required development. It is clear that the application of chemical engineering to the problem of soil contamination will provide effective, profitable, and sustainable remediation solutions. We reviewed new *in situ* chemical engineering methods and technologies for soil pollution reduction, their applications, and actual results.

Keywords: soil proterties, remediation, ecosystem, chemicals, new technologies, phytoremediation

© Author (s), 2024



Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>