

Ово дело је заштићено лиценцом Креативне заједнице Ауторство – некомерцијално – без прерада¹.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.



¹ Опис лиценци Креативне заједнице доступан је на адреси creativecommons.org.rs/?page_id=74.

"Сва права задржава издавач. Забрањена је свака употреба или трансформација електронског документа осим оних који су експлицитно дозвољени Creative Commons лиценцом која је наведена на почетку публикације."

"Sva prava zadržava izdavač. Zabranjena je svaka upotreba ili transformacija elektronskog dokumenta osim onih koji su eksplicitno dozvoljeni Creative Commons licencom koja je navedena na početku publikacije."



Природно-математички факултет
Универзитет у Новом Саду

Трг Доситеја Обрадовића 3, 21000 Нови Сад, Србија

тел 021.455.630 факс 021.455.662 e-mail dekan@pmf.uns.ac.rs web www.pmf.uns.ac.rs

ПИБ 101635863 МБ 08104620

ДЕГРАДАЦИЈА И ЗАШТИТА ЗЕМЉИШТА

-уџбеник-

АУТОРИ

др Јелена Белџин

др Маријана Крагуљ Исаковски

др Срђан Рончевић

др Снежана Малетић

Нови Сад, 2024.

Деградација и заштита земљишта

Деградација и заштита земљишта

- уџбеник -

ИСБН:

Аутори

др Јелена Бељин, ванредни професор Природно-математичког факултета у Новом Саду
др Маријана Крагуљ Исаковски, редовни професор Природно-математичког факултета у
Новом Саду
др Срђан Рончевић, редовни професор Природно-математичког факултета у Новом Саду
др Снежана Малетић, редовни професор Природно-математичког факултета у Новом Саду

Рецензенти

др Божо Далмација, редовни професор Природно-математичког факултета у Новом Саду
Др Тијана Зеремски, научни саветник Института за ратарство и повртарство Нови Сад и
ванредни професор Едуконс Универзитета у Новом Саду

Издавач

Универзитет у Новом Саду,
Природно-математички факултет,
Департман за хемију, биохемију и заштиту животне средине,
21000 Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 3

Главни и одговорни уредник
Професор др Срђан Рончевић, декан
Природно-математичког факултета у Новом Саду

CIP - Каталогизација у публикацији
Библиотеке Матице српске, Нови Сад

631.458/.459(075.8)

ДЕГРАДАЦИЈА и заштита земљишта [Електронски извор] :
уџбеник / аутори Јелена Бељин ... [и др.]. - Нови Сад : Природно-
математички факултет, Департман за хемију, биохемију и заштиту
животне средине, 2025

Начин приступа (URL): <https://www.dh.uns.ac.rs/e-publikacije/>. - Опис
заснован на стању на дан 9.01.2025. - Насл. с насловног екрана. -
Библиографија.

ISBN 978-86-7031-709-3

1. Бељин, Јелена, 1987- [аутор]
а) Земљиште - Деградација - Заштита

COBISS.SR-ID 160676617

© Сва права задржана. Није дозвољено да уџбеник или његови делови буду репродуковани на било који начин без дозволе издавача или аутора. Слог: др Јелена Бељин, др Маријана Крагуљ Исаковски, др Срђан Рончевић, др Снежана Малетић.

Драги читаоче,

Добродошли у свет изучавања земљишта и његове виталне улоге у одржавању здравог животног окружења. Ова књига, под називом *Деградација и заштита земљишта*, осмишљена је као свеобухватан водич за студенте Природно-математичког факултета Универзитета у Новом Саду који похађају наставу из предмета "Деградација земљишта" и "Заштита земљишта".

Циљ ове књиге је да пружи студентима детаљно разумевање процеса деградације земљишта и њихових последица, као и метода и стратегија заштите и обнове земљишта. Земљиште представља један од најважнијих природних ресурса који обезбеђује основне потребе за животом, укључујући храну, воду, влакна и гориво. Међутим, због различитих антропогених и природних фактора, земљиште је подложно деградацији, што може довести до смањења његове продуктивности и губитка биолошке разноврсности.

У првом делу књиге, бавићемо се узроцима и врстама деградације земљишта, укључујући ерозију, салинизацију, губитак органске материје, загађење и друге. Други део књиге фокусиран је на методе и технике заштите земљишта. Упознаћемо се са различитим приступима одрживе употребе земљишта као и политикама и законодавством које имају за циљ заштиту овог драгоценог ресурса.

У припреми ове књиге, аутори су се ослањали на најновија истраживања и препоруке водећих стручњака из области науке о земљишту и заштите животне средине. Наша је намера да студентима пружимо не само теоријска знања, већ и практичне вештине које ће моћи да примене у својој будућој професионалној каријери.

Надамо се да ће ова књига подстаћи студенте на даље истраживање и дубље разумевање комплексности земљишта као екосистема, те да ће их инспирисати да својим радом допринесу очувању и заштити нашег природног наслеђа.

Аутори

Садржај:

1. Дефиниција, основне карактеристике и својства земљишта	1
1.1. Земљиште као трофазни систем	2
1.2. Земљиште као ресурс	4
1.3. Морфолошка својства земљишта	6
1.3.1. Дубина земљишта	9
1.3.2. Боја земљишта	9
1.3.3. Текстура земљишта	10
1.3.4. Структура земљишта	10
1.3.5. Порозност земљишта	11
1.3.6. Присуство креча и реакција средине	11
1.4. Физичка својства земљишта	12
1.4.1. Физичка својства чврсте фазе	12
1.4.1.1. Земљиште као дисперзион систем	13
1.4.1.2. Механички састав земљишта	13
1.4.1.3. Специфична маса – густина земљишта	15
1.4.1.4. Порозност земљишта	15
1.4.1.5. Електрична и магнетна својства земљишта	16
1.4.1.6. Вода у земљишту	16
1.4.1.7. Ваздушна својства земљишта	19
1.4.1.8. Температура и топлотна својства земљишта	21
1.5. Хемијска својства земљишта	21
1.5.1. Порекло и састав минералне компоненте земљишта	22
1.5.1.1. Елементарни хемијски састав земљишта и подела елемената у педосфери	27
1.5.2. Хемијска својства органске компоненте земљишта	29
1.5.2.1. Динамички процеси у земљишту	36
1.5.3. Хемијска својства течне фазе земљишта	49

1.6. Биолошка својства земљишта	51
1.7. Биогеохемијски циклуси – кружење угљеника, азота, фосфора и сумпора	54
2. Класификација земљишта	60
2.1. Принципи светске референтне основе за земљишта	63
2.2. Национална класификација земљишта заснована на принципима светске класификације земљишта	68
3. Деградација земљишта	70
3.1 Узроци деградације земљишта.....	71
3.2 Врсте деградације земљишта	77
3.3 Физички процеси деградације земљишта	79
3.3.1. Процеси и врсте физичке деградације земљишта	79
3.3.1.1. Заптивање пора и формирање површинске покорице	80
3.3.1.2 Збијање/сабијање земљишта	86
3.3.1.3 Забаривање земљишта	89
3.3.1.4 Слегање органских земљишта	93
3.3.1.5 Дезертификација.....	94
3.4 Ерозија земљишта водом.....	96
3.4.1 Ерозија кишом (плувијална ерозија)	98
3.4.2 Ерозија плоча.....	99
3.4.3 Ерозија бразда.....	101
3.4.4 Каналска ерозија.....	102
3.4.5 Остали типови водне ерозије	103
3.4.6 Ефекти водне ерозије	106
3.4.6.1 Једначине за израчунавање губитка земљишта.....	106
3.4.7 Контрола водне ерозије	109
3.5 Ерозија ветром (Еолска ерозија)	111
3.5.1. Транспорт честица	113

Деградација и заштита земљишта

3.5.2 Абразија.....	114
3.5.3 Сортирање.....	115
3.5.4 Фактори који утичу на ерозију ветром.....	115
3.5.5 Контрола ерозије ветром	118
3.6 Хемијска деградација земљишта	120
3.6.1. Губитак нутријената и органских материја	120
3.6.2. Ацидификација (закишељавање) земљишта.....	127
3.7 Загађење земљишта.....	140
3.7.1. Судбина и понашање метала у земљишту	141
3.7.2. Кретање органских полутаната у земљишту са водом	148
3.7.3. Судбина и понашање органских загађујућих супстанци у земљишту.....	151
3.7.5 Утицај киселих киша на процесе у земљишту	159
3.7.6 Загађење земљишта радуионуклидима	160
4. Мониторинг квалитета земљишта	163
4.1. Прикупљање података	163
4.2. Узорковање - планирање и реализација	164
4.2.1. Методологија узорковања земљишта.....	167
4.2.2. Процедуре узорковања	172
4.2.2.1. Узимање узорака чврсте материје тла.....	172
4.2.2. Фазе теренског испитивања земљишта.....	176
4.2.3. Узорковање раствора земљишта.....	177
4.2.4. Узорковање ваздуха из тла	180
4.2.5. Испитивање земљишног раствора	182
4.2.6. Мониторинг токова подземних вода	185
4.3. Биолошки мониторинг	189
4.3.1. Планирање и спровођење биолошког мониторинга	191
4.3.2. Узорковање и испитивање лишћа.....	191

4.3.3. Узорковање и испитивање биљног отпада	192
5 Ремедијација земљишта.....	193
5.1. Планирање и реализација ремедијације земљишта	194
5.2. Врста и хемијска природа загађујућих материја	195
5.2.2. Ниво ризика	197
5.2.2.1. Процена опција.....	198
5.3. Ремедијационе технологије	199
5.3.1. Имплементација и стратегије санације	202
5.3.2. Хемијске и физичке технике ремедијације	203
5.3.3. Термичка ремедијација места са опасним отпадом	206
5.3.4. Биоремедијација	207
5.4. Цена и дужина трајања ремедијације	208
Литература:.....	210

1. Дефиниција, основне карактеристике и својства земљишта

Земљиште је природни неконсолидован материјал који се налази на површини земље и састоји се од чврсте, течне и гасовите фазе. Садржи органске и неорганске материје, које заједно и сумултано учествују у природним процесима, чијим мешањем и трансформацијама настаје порозно тело. Поре овог порозног материјала испуњене су ваздухом и водом. Дакле, постоје четири главне компоненте земљишта, а то су: минералне материје, органске материје, вода и ваздух. Земљиште је еволуирало кроз процесе педогенезе у динамичко и тродимензионално тело и носилац је различитих екосистема на земљи. Биљкама пружа станиште, хранљиве материје, воду, ваздух и топлоту, при чему их у исто време штити од штетних материја. Постоје различите дефиниције земљишта, при чему се неке од њих дате у наставку.

Земљишта су само оне површине или хоризонти стена које су мање или више природно модификоване кроз интеракцију са водом, ваздухом или различитим врстама живих или неживих организама, што ће даље утицати на састав земљишта, структуру и боју таквих хоризоната. Тамо где не постоје ови услови, нема природних земљишта, већ постоји само мешавина различитих стена (Dokuchaev, 1879).

Друга дефиниција каже земљиште је површински слој земљине коре формиран током времена, који се састоји од стена које су разбијене у мале фрагменте који су у мањој или већој мери хемијски промењени заједно са биљкама и животињама који живе на или у земљишту (Ramann, 1905).

Даље, земљиште је дефинисано као мање или више, растресит материјал који представља станиште биљака које су причвршћене

својим кореновим системом при чему имају доступну храну као и све остале неопходне материје за раст и развој (Hilgard, 1914).

Земљиште је природно тело настало под утицајем живих организама, а састоји се од чврсте (минерали и органска материја), течне и гасовите фазе. На површини се граничи са ваздухом, водом и биљним материјалом (који није започео разградњу). Уколико је нека површина стално прекривена водом више од 2,5 cm може се сматрати да то није земљиште (Joffe, 1949).

Земљиште је природан ресурс који се састоји од минералних и органских материја распоређених у хоризонте различите дубине, при чему се сваки слој разликује у морфологији, физичким, хемијским и биолошким особинама (Kellogg, 1960).

Земљиште је природно тело које се састоји од чврсте фазе (минерала и органских материја), течне и гасовите фазе, а који покрива површински слој земљине коре при чему га карактеришу хоризонти или слојеви који се разликују од матичне стене, а настали су као резултат додатка, губитака, трансфера и трансформације енергије и материје, а у исто време представљају природно станиште биљака (USDA, NRCS, 2003).

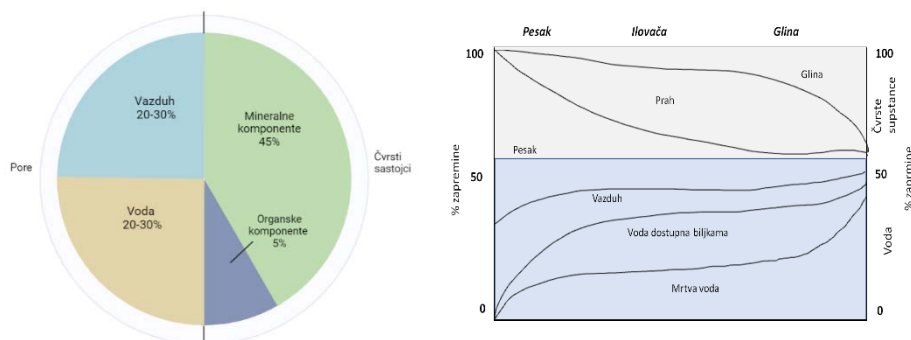
Земљиште настаје распадањем стена при чему настаје растресита маса литосфере. Ова маса добија многе нове особине: постаје пропустљива за воду и ваздух, повећава се укупна површина честица, које зато постају активније, тако да се и хемијски процеси који се одвијају у њој убрзавају. Битно је напоменути да се стенски материјал може претворити у земљиште тек учешћем организама, пре свега биљака.

Све ове дефиниције имају за циљ да се на доследан начин прикаже и опише еволуција земљишта у један модеран концепт земљишта какав је данас.

1.1. Земљиште као трофазни систем

Земљиште је трофазни дисперзни систем, састављен из чврсте, течне и гасовите фазе. Структура земљишта директно одређује количину воде, ваздуха и топлоте (слика 1.1). Гасовита фаза у свим деловима запремине пора неког земљишта назива се атмосфером земљишта. Пошто је она под великим утицајем биолошких процеса, њен састав обично варира у зависности од састава атмосфере. Она је одређена респирацијом

земљишта, ослобађањем угљеник(IV)-оксида (CO_2) и усвајањем кисеоника путем респирације организама земљишта и корена биљака. Под анаеробним условима, при великом садржају влаге у земљишту, могу се нагомилавати гасови као што су метан (CH_4) и водоник-сулфид (H_2S). Органске компоненте као део биогеног сегмента обухватају све неживе материје биљног и животињског порекла које се могу наћи у земљишту. Литогене и биогене компоненте се комбинују у чврсту фазу, тако да се земљиште може приказати као једна трофазна смеша. Основни корак у квантитативној анализи земљишта сматра се одређивање тежине и запремине сваке од ове три фазе. Сува материја се састоји од литогенског дела, организама који су угинули и претворили се у чврсто стање и постмортални органски материјал. Ако органски материјал чини више од 30% у том се случају земљиште означава као “органско земљиште”. У централној Европи ове бројке се крећу од 3 до 10%. Садржај воде представља разлику између масе оригиналног узорка земљишта и масе сувог материјала. Диференцијација између минералног и органског дела се постиже преко губитка жарењем (на 500°C уз довођење кисеоника) или спаљивањем уз одређивање ослобођеног CO_2 . Запремина ваздуха се израчунава из запремине ваљка стуба земљишта (узимање узорка земљишта помоћу одговарајућег цилиндра) умањено за запремину чврстог и течног материјала. Организми земљишта су такође стандардна компонента земљишта. Органске компоненте се састоје од изумрлих и делимично распаднутих органских материјала. Према простору који заузимају поједине фазе земљишта (слика 1.1a) највише је заступљена чврста фаза (око 45% минералне материје, 5% органске материје); затим течна и гасовита које заузимају осталих 50% (у зависности од влаге земљишта). “Мртва вода” која је присутна у земљишту представља део воде која није приступачна биљкама (слика 1.1b).



Слика 1.1 Компоненте земљишта (а) и запремина воде, ваздуха и супстанци као фактори типа земљишта (б)

Биоматеријал садржи масу бактерија, гљива, алги, протозоа, нематода, црвића, инсеката, буба, паукова, глиста и биљног материјала (слама, корење и слично), од чега бактерије, гљиве, глисте и биљни материјал чине више од 90% биомасе. Чврста органска фракција се састоји од 93% хумуса и 7% биоматеријала. Хумус се генерално дефинише као материјал настао изумирањем који подлеже сталном биолошком и педохемијском распадању, разградњи, трансформацији и нагомилавању. Међутим, методолошки није заиста могуће раздвојити биолошку фракцију, тј. живе организме од хумусног дела. Када се одређује губитак жарењем, биолошка фракција је укључена у органску чврсту фракцију.

1.2. Земљиште као ресурс

Земљиште је највреднији природни ресурс света. Неопходан је за све облике живота на овој планети. Обезбеђује физичку матрицу, хемијско окружење и биолошко окружење за размену воде, хранљивих материја, ваздуха и топлоте за организме. Обезбеђује храну, сточну храну, дрво и влакна. Скоро 96% људске хране добија се из земље. Земљиште утиче на хидролошке процесе, укључујући инфилтрацију, перколацију, дренажу, површинске и подземне токове. Регулише размену материјала, енергије, воде и гаса унутар система литосфера – хидросфера – биосфера – атмосфера. Главни је извор и повор загађујућих материја. Секвестрација угљеника у земљишту може утицати на климатске промене. Према литератури између 11 и 12% земљине површине је углавном погодно за производњу хране и влакана, 24% се користи за

испашу, шуме заузимају око 31%, а преосталих 33% има превише ограничења за употребу. Нису сва пољопривредна земљишта плодна и продуктивна. Нека тла су природно непродуктивна; нека су сушна и слана; нека су веома песковита и сува; а нека су влажна и натопљена. Напредне технике управљања, укључујући наводњавање и дренажу, омогућиле су извесну употребу суве земље, мочвара и тресетишта. Има нагнутих земљишта, песковитих земљишта и земљишта са ниским капацитетом задржавања хранљивих материја. Многа тла у пустињским регионима се наводњавају, али се оне сматрају неодрживим. Лоше управљање и злоупотреба деградирала су многа продуктивна земљишта широм света. Последице деградације земљишта не само да утичу на перформансе земљишта за производњу хране и влакана већ имају тешке последице по животну средину. Нека земљишта су деградирана као последица људске активности. Процене су да деградација земљишта погађа око 3.500 милиона хектара или 23,5% површине Земље и утиче на 1,5 милијарду људи. Многа земљишта су засољена због лошег управљања земљиштем, као и због модификације хидрологије наводњавања и одводњавања. Деградираним земљиштима је потребно одрживо управљање. На основу података GLASOD (енг. *Global Assessment of Human-induced Soil Degradation*) препознато је пет типова деградације земљишта која су изазвана: водном или еолском ерозијом, хемијским и физичким поступцима деградације земљишта, као и деградацијом биолошке активности. Ерозија земљишта, заједно са сабијањем и забаривањем, сматра се физичким поступком деградације. Постоје директни и индиректни ефекти ерозије земљишта изазване водом и ветром. Ови процеси могу такође довести до дезертификације у аридним (сушним) и семиаридним регионима. Значај земљишта као ресурса огледа се у свим производима и функцијама екосистема из којих људи остварују директну или индиректну корист. Оне обухватају чисту воду, храну, дрвну масу, али и услуге као што су опрашивање, природна контрола штеточина и плодност земљишта.

Европски савет је 1972. године донео Европску повељу о земљишту која истиче потребу за адекватним управљањем и заштитом земљишних ресурса. Наводи се следећи:

- i. Земљиште је једно од највреднијих човекових ресурса. Омогућава живот биљака, животиња и људи на Земљи.
- ii. Земљиште је ограничени ресурс који се лако уништава.

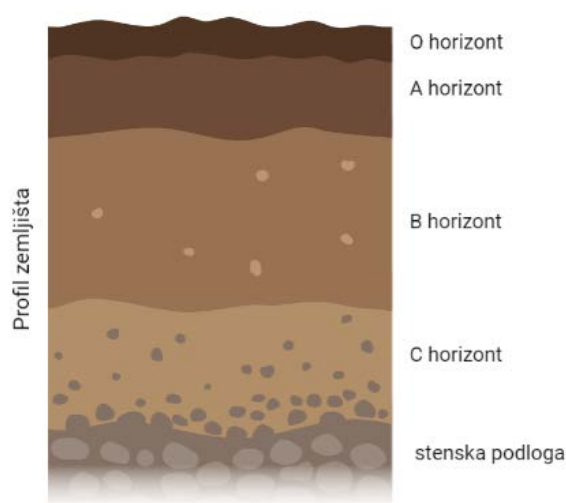
- iii. Индустијско друштво користи земљиште за пољопривреду, у индустријске и друге сврхе. Политика регионалног планирања мора комбиновати разматрања која су везана за карактеристике/својства земљишта и садашње и будуће потребе друштва.
- iv. Пољопривредници и корисници шума морају применити методе које штите квалитет земљишта.
- v. Земљиште мора бити заштићено од ерозије.
- vi. Земљиште мора бити заштићено од загађења.
- vii. Развој урбанизације мора бити планиран тако да су суседна подручја изложена најмањем могућем утицају.
- viii. Током планирања инжењерских пројеката, ефекти на земљиште морају бити процењени и цена мора укључивати и адекватне заштитне мере.
- ix. Инвентар земљишта је предуслов за било које планирање.
- x. Да би се обезбедила што већа употреба и заштита земљишта, потребна су даља истраживања и интердисциплинарна сарадња.
- xi. Уопште пажња на професионалном нивоу, као и све већа пажња шире јавности, треба да буде усмерена на заштиту земљишта.
- xii. Владе и државни органи морају пажљиво планирати и неговати квалитет и план управљања земљиштем при чему је потребна пре свега интердисциплинарна сарадња.

1.3. Морфолошка својства земљишта

Земљиште је дефинисано низом морфолошких, физичких, хемијских и биолошких својстава. Морфологија је метод проучавања земљишта који захтева моћ запажања и способност за дескрипцију. Разликују се два типа морфологије: (1) екоморфолошка морфологија (спољашња морфологија) и (2) ендоморфолошка морфологија (унутрашња морфологија).

Код *ектоморфолошке морфологије (спољашње морфологије)* се при описивању спољашње морфологије обраћа пажња на рељеф и биљни покривач (живи и мртви), док се у случају *ендоморфолошке морфологије (унутрашње морфологије)* грађа земљишног профила, као и низ особина тих хоризонта: (i) склоп профила; (ii) боју; (iii) механички састав (текстуру); (iv) структуру; (v) порозност; (vi) конзистенцију; (vii) присуство креча (реакцију средине) и (viii) специфичне педолошке творевине.

Хоризонт земљишта се дефинише као слој неког земљишта настао процесима формирања земљишта при чему се слојеви визуелно опажају и разликују од суседних по прекидима или степенастим површинама (слика 1.2). Изнад стеновите подлоге се налази каменити слој, непромењен или једва промењен процесима формирања земљишта (задржавајући карактеристике литосфере) и то се зове **хоризонт "С"**.



Слика 1.2. Хоризонт земљишта

Као минерални подземљински хоризонт, **хоризонт "В"** је само индиректно под утицајем литосфере или атмосфере преко старења раствора. Овде се органске супстанце и оксиди гвожђа, мангана, алуминијума и других минерала глине обогаћују услед старења. Влага од падавина која ту доспева и која доноси биогене и атмосферске компоненте доводи до прилива материјала и хемијских и структурних промена. Горњи минерални хоризонт земљишта, **хоризонт "В"**, садржи велике количине корења и настањен је животињама чија је то природна средина. Он представља тамни хумусни материјал са светлијим сегментима насталим од коренских излучевина, који је подложен знатним променама њених литогених компоненти због губитка супстанци услед отицања (елувијације). Најзад, **хоризонт "О"** је органски хоризонт земљишта који се састоји од изумрлих остатака

вегетације. Седиментација се дешава на површини литосфере и биогене компоненте литосфере се формирају као хумус на површини литосфере. Поред великих слова врло често се у литератури могу срести и додатна слова у ознакама која се користе за означавање хоризоната (табела 1.1), као нпр. "A/Aa" за минерални горњи хоризонт земљишта са 15-30% органске супстанце, или "A/Ar" као минерални горњи слој земљишта који се меша орањем. **Хоризонт "G"** представља минерални хоризонт у појасу подземних вода, док **хоризонт "R"** означава стенску подлогу (енг. „bedrock“, *матична стена*), а **хоризонт "H"** органски хоризонт земљишта састављен од остатака тресета.

Поред основних ознака које се користе за означавање хоризоната земљишта, постоје и додатне ознаке, горе поменуте, које ближе одређују степен разложености, карактер хумуса, али и акумулацију појединих једињења у одређеним слојевима хоризонта. Комплетан преглед ознака дат је у табели 1.1.

Табела 1.1. Хоризонт земљишта-ознаке у употреби

Хоризонт	Подхоризонт	Додатне ознаке
"O" органски површински хоризонт	"O _l " – неразложене органске материје "O _f " – полуразложене органске материје "O _h " – хумифицирани органски подхоризонт	ca – акумулација калцијум карбоната
"A" горњи минерални хоризонт земљишта	"A _{mo} " – молични хумусни хоризонт "A _{um} " – умбрични хумусни хоризонт "A _{oh} " – охрични хумусни хоризонт "A _a " – посебан облик A хоризонта настао у хироморфним условима	cs – акумулација гипса ca – акумулација водорастворних соли
"R" хоризонт	-измењен под дејством и утицајем човека	
"T" тресетни хоризонт		
"E" елувијални хоризонт		na – акумулација адсорбованог натријума
"B" илувијални хоризонт	"B _t " – глином обогаћен хоризонт "B _h " – хумусом обогаћен хоризонт "B _{fe} " – гвожђем обогаћен седимент	cn – акумулација конкреција сесквиоксида и мангана
"C" растресити матични супстрат		
"R" чврста матична стена		
"G" глејни хоризонт	"G _r " – подхоризонт у коме вода перманентно стагнира "G _{so} " – секундарно оксидисани подхоризонт "G _g " – псеудоглејни хоризонт	

1.3.1. Дубина земљишта

Дубина земљишта је један од значајнијих *физичко-морфолошких* карактеристика земљишта. Лакше се одређује на чврстим него на растреситим земљиштима, а дефинише се као дубина од површине до матичне стене (апсолутна дубина). Најбитнији фактор који дефинише овај параметар јесу биоклиматски услови: најдубља су земљишта тропска и субтропска (интензитет распадања минералних и органских компоненти је висок), средње дубока земљишта су земљишта у умереном климатском појасу и плитка земљишта се углавном налазе у северним областима. Поред апсолутне дубине за истраживање земљишта потребно је знати и његову физиолошку дубину или ефективну дубину. Под физиолошком дубином подразумева се дубина до које коренов систем биљака налази повољне услове за свој развој. Сматра се да су дубља земљишта плоднија од пливних, међутим може се десити да је физиолошка дубина лимитирана положајем неког неповољног (нпр. збијеног) слоја у пресеку, што се негативно одражава на раст и развој кореновог система, који уједно представља најбољи показатељ појаве штетних и лимитирајућих услова у земљишту. Постоји више класификација земљишта према дубини, али свим класификацијама је заједничко то да садрже пет класа земљишта према дубини. Најчешћа класификација подразумева следећу поделу: (i) веома плитка (до 10 cm), (ii) плитка (10 до 30 cm), (iii) средње дубока (30 до 60 cm), (iv) дубока (60 до 120 cm) и (v) веома дубока (више од 120 cm).

1.3.2. Боја земљишта

Боја је најупадљивија *физичко-морфолошка* карактеристика земљишта, према којој се међусобно разликују разни генетски хоризонти у земљишном профилу, а зависна је од садржаја у земљишту разних бојених састојака, у знатном степену такође од механичког састава и од степена влажности земљишта. Сваки хоризонт и подхоризонт се карактеришу одређеном бојом. Преовлађују три основне боје: црна, црвена и бела, са многобројним нијансама. Боју дају углавном следеће бојене материје:

- i. Хумусне материје дају разне нијансе, од тамно-сиве и сиво-смеђе до црне боје;

- ii. Оксиди и хидроксиди гвожђа дају земљиштима црвену, смеђу до жуту боју;
- iii. Силицијум даје сиву нијансу;
- iv. Креч, гипс и водорастворне соли одржавају беличасту или жућкасто белу нијансу

У пракси се ретко јављају јасне и чисте боје, те је њихова категоризација подложна субјективном оку посматрача. Да би се омогућио што униформисанији приступ детекцији боје земљишта уведен је у употребу каталог боја према којем се упоређују природне боје и нијансе земљишта. Овај приручник садржи два система: дескриптивни назив боје и квантитативну ознаку боје. Каталог има своје ознаке за врсту боје (hue), јачину боје (енг. *value*) и израженост боје (енг. *chroma*). У обзир треба узети и то да је у каталогу приказан само део основних боја и нијанси и да је помоћу њега могуће одредити само приближну боју и нијансу земљишта што је свакако значајно са аспекта једноставније комуникације између различитих врста експерата.

1.3.3. Текстура земљишта

Текстура земљишта подразумева њен механички састав и припада и *физичким и морфолошким својствима*. На терену, текстура земљишта се може одредити само приближно, те је стога потребно у лабораторији применом стандардних метода одредити механички састав испитиваних узорака. Према текстури, земљишта се деле на скелетна (удео фракције камена и шљунка преко 50%), скелетоидна (удео фракције камена и шљунка до 50%) и нескелетна (састоје се од „ситне земље“, фракције песка, праха и глине). Нескелетна су карактеристична за равничарске пределе и таква земљишта се разврставају на песковита, иловаста и глиновита, док су скелетна и скелетодина заступљена у брдско-планинским пределима.

1.3.4. Структура земљишта

Структура земљишта припада *физичко-морфолошким* особинама. У погледу хемијских карактеристика типова земљишта, њихова структура је од велике важности. Под структуром земљишта се подразумева просторни распоред и узајамни однос примарних и секундарних честица у земљишту. Примарне честице (песак, прах, глина, колоиди) не налазе се у земљишту као самосталне индивидуалне честице, већ се оне

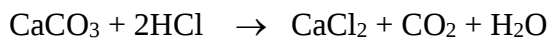
најчешће повезују градећи сложене секундарне честице - структурне агрегате. Структура земљишта директно утиче на ниво воде, ваздуха и топлоте, а индиректно утиче и на биолошку активност, развој земљишта, принос и подложност ерозији. У структури на нивоу појединачног зрна, минерали и органске честице (примарне честице) нису међусобно повезани. Ово се јавља код песковитих и шљунковитих земљишта са ниским садржајем глине и код свеже депонованих седимената. У кохерентној структури примарне честице се држе заједно помоћу кохезионих сила. Оне се јављају у прашкастим земљиштима, глиновитим земљиштима, и код иловачастих земљишта у доњем слоју; у горњем слоју они се после сушења разбијају у агрегате. Агрегатне структуре укључују призматичне структуре (од призми са обично 3-6 грубих бочних површина и 10-300 mm у пречнику), плочасте структуре (састављене од хоризонтално распоређених плоча као резултат сабијања, чија је дебљина 1-50 mm) и мрвичаста структура (као фрагментисана структура која се развија у току обраде земљишта са просечним садржајем глине и оптималним садржајем влаге). Оваква структура онда настаје као последица биолошке активности и интензивног раста корена.

1.3.5. Порозност земљишта

Порозност земљишта, по дефиницији, представља запремину свих шупљина у јединици запремине земљишта и припада *физичко-морфолошким* особинама. Разликују се два типа порозности: (i) порозност унутар структурних агрегата и (ii) порозност између структурних агрегата. По правилу, услед збијености дубљих слојева земљишта, порозност са дубином опада.

1.3.6. Присуство креча и реакција средине

Присуство или одсуство креча у профилу указује на генезу и динамику земљишта. Изведба овог теста на терену има дијагностичко и прогностичко значење и непосредно може да укаже на реакцију средине. Присуство калцијум карбоната у земљишту се утврђује прикапљавањем 10% HCl (хлороводонична киселина) на грудвице земљишта дуж профила. Интензитет пенушања дефинише да ли у земљишту има или нема калцијум-карбоната по реакцији:



Уколико земљиште не садржи креч до дубине од 40 cm, сматра се да је такво земљиште безкарбонатно.

Реакција средине се одређује применом колориметријских и електрометријских метода. Најчешће се користе хемијски реагенси (као индикатори) који променом боје приближно указују на одређену реакцију. За тачније одређивање служи преносиви рН метар, где се за мерење рН користи суспензија земљиште: дестилована вода у односу 1:1.

1.4. Физичка својства земљишта

Земљиште представља важан део укупног циклуса у природи; оно обезбеђује подлогу за вегетацију и укупно станиште за микроорганизме, биљке и животиње, представља место залиха хранљивих састојака, као и подлогу за микроорганизме. Снабдевеност хранљивим састојцима се мења под утицајем процеса старења и минерализације, атмосферског талога, елувијације и отицањем, ерозијом и екстракцијом преко биљака. Други физичко-хемијски процеси који играју важну улогу у овом станишту укључују аерацију, садржај воде, температурно стање у земљишту, филтрацију и ретенцију (физичко или хемијско везивање) честица које дотичу, било из атмосфере или хидросфере. Додатне функције земљишта изведене из ове активности су: земљиште као акумулатор и конвертор биогенских супстанци (хумуса), улога у кружењу биогених елемената у природи, као пуферски и колоидни систем, као порозно тело и сунђер за задржавање воде, као медијатор између атмосфере и хидросфере (водени биланс), као систем који је у стању да се мења и развија (развој земљишта). Процеси старења (распадања) и седиментације су од посебне важности у хемији земљишта. Стареење укључује процесе распадања и трансформације који настају као резултат интеракција са атмосфером, хидросфером и биосфером.

1.4.1. Физичка својства чврсте фазе

Од физичких својстава чврсте фазе земљишта зависиће њихов ваздушни, водни и топлотни режим и еколошко-производна вредност.

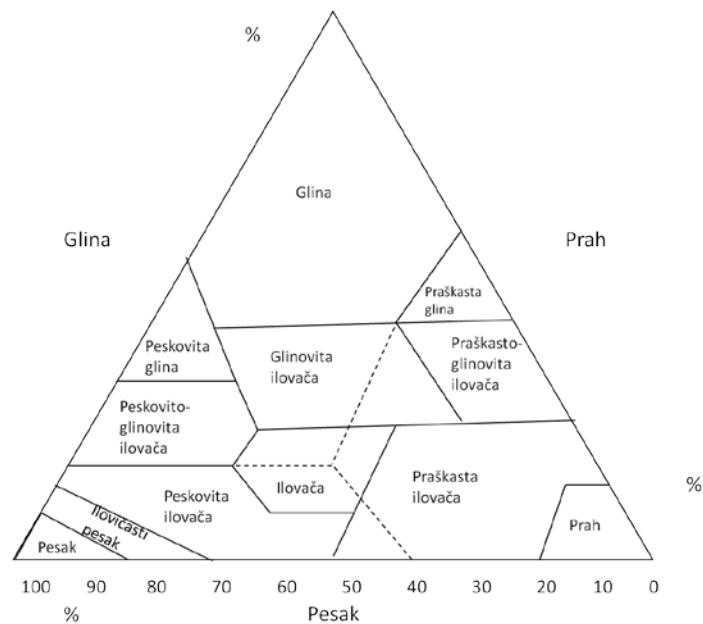
1.4.1.1. Земљиште као дисперзни систем

Чврста фаза земљишта се састоји из честица које се налазе у различитом ступњу дисперзности. Постоје примарне честице (које се благим силама не могу делити) и секундарне честице (које се могу здробити међу прстима). Приликом процене дисперзности чврсте фазе земљишта потребно је узети у обзир два фактора:

- (i) однос величине честице и површине (обим површине дисперзног система под називом специфична површина изражава се у cm^2 по 1 g или у m^2 по 1 cm^3 дисперзне фазе) и
- (ii) однос облика честице и површине (где величина специфичне површине по јединици масе или запремине, као и количина додира по јединици масе, варира и са обликом честице).

1.4.1.2. Механички састав земљишта

Тип неког земљишта се одређује на основу његове гранулације, користећи опис састава према величини честица. Од типа земљишта зависе фактори као што су расподела честица у порама земљишта и према томе садржај воде и гасова у земљишту. Гранулација, која се још зове и текстура земљишта, се изводи на основу садржаја глине, праха и песка. Главне фракције финог земљишта су песак (од финог до крупног, међународно прихваћено 0,2-2 mm; DIN 4022 0,063-2 mm; US систем 0,05-2 mm), прах (0,002-0,02 mm, DIN 0,002-0,063 mm; US 0,002-0,05 mm) и глина (<0,002 mm). Ако нека од ових фракција преовлађује, земљиште се именује према њој (слика 1.3). Главној фракцији се додаје атрибут на основу веће од друге две фракције, нпр. песковита глина, прашкаста глинуша. Процентуални удели фракција појединих честица се морају одредити да би се описала гранулација. Песковите компоненте се одређују путем просејавања, док се финије фракције могу одредити на основу брзине седиментације честица под утицајем гравитације, као и другим методама (нефелометрија, седиментација под дејством центрифугалне силе, ултра-центрифугирање). Тип гранулације неког земљишта у великој мери одређује понашање полутаната, њихову адсорпцију или покретљивост, а такође и трансформације органских или везивање неорганских полутаната. Међутим, способност неког земљишта за адсорпцију је одређена како процентуалним садржајем глине тако и минералним саставом ове фракције.



Слика 1.3. Гранулационе класе земљишта

Након квантитативног одређивања честица механичке фракције земље може се приступити разврставању испитиваног земљишта у одговарајуће текстурне класе. Постоје бројне класификације које се користе у те сврхе, а једна од њих је приказана у *табели 1.2*.

Табела 1.2. Класификација земљишта по механичком саставу

Текстурна ознака	Глина на <2 μ	Прах 2- 20 μ	Глина и прах <20 μ	Песак укупно 20- 2000 μ	Ситни песак 20- 200 μ	Крупн и песак 200- 2000 μ
садржај појединих категорија честица (%)						
Иловаста крупни песак			< 15	> 85		> 45
Иловаста ситни песак			< 15	> 85	> 40	
Крупно песковита иловача			15-35	65-85		> 45
Ситно песковита иловача	< 15		15-35	65-85	> 40	
Иловача		< 45	> 35	< 65		
Прашаста иловача		> 45				
Песковито глиновита иловача		< 20	< 45	> 55		
Глиновита иловача	15- 25	< 45	> 35	< 65		
Прашаста глиновита иловача		> 45	> 60	< 40		
Песковита глина		< 20	< 45	> 55		
Иловаста глина	25- 45	< 45	> 45	< 55		
Прашаста глина		> 45	> 70	< 30		
Тешка глина	> 45					

1.4.1.3. Специфична маса – густина земљишта

Специфична маса се генерално дефинише као однос запремине сувог земљишта према маси исте запремине воде. Постоје два начина изражавања и израчунавања специфичне маса земљишта:

(i) Волумна густина – специфична маса земљишта у природном склопу са порама испуњеним водом и ваздухом, и

(ii) Густина чврсте фазе – односи се на специфичну масу земљишта без пора.

Ове вредности зависе од минералошког и механичког састава, садржаја хумуса и збијености односно структуре земљишта. Познавање података о густини земљишта значајни су због великог броја прорачуна (нпр. Укупне порозности, тежине ораничног и подораничног слоја, садржаја хумуса и осталих састојака, дозе минералних ђубрива, као и водног капацитета и других водних константи). Вредност обе густине минералних зелишта су променљиве не само у различитим типовима земљишта, већ и у слојевима истог земљишта. Вредности зависе од великог број морфолошких, хемијских и физичких особина, као што су минерални и механички састав, садржај хумуса, струтура земљишта, итд. Познавање овог податка даље омогућава прорачуне као што су: укупна порозност, тежине ораничног и подораничног слоја, садржаја хумуса и осталих састојака, водног капацитета, итд.

1.4.1.4. Порозност земљишта

Порозност земљишта се дефинише процентом његове запремине која није испуњена чврстим честицама.

Према укупној запремини пора (P) земљишта се деле на:

- (i) Врло порозна ($P > 60\%$);
- (ii) Порозна ($P = 45-60\%$);
- (iii) Слабо порозна ($P = 30-45\%$) I
- (iv) Врло слабо порозна ($P < 30\%$).

Формула која се користи за израчунавање ове вредности је:

$$P_{vol.\%} = \frac{G - V_g}{G} \times 100$$

где је:

- P – укупна порозност у Vol. %
- G – густина чврсте фазе земљишта
- V_g – волумна густина земљишта

Са физичког аспекта, од значаја су углавном два типа пора у земљишту: макропоре које су у функцији кретања воде и ваздуха и микропоре у којима се задржава земљишна влага.

1.4.1.5. Електрична и магнетна својства земљишта

Електрична својства земљишта још увек нису у пуној мери позната. Утврђено је да у земљишту постоје електропотенцијалне разлике, са просечном вредности од 0,2 V на 1 km. Електропроводљивост зависи од низа својстава земљишта, док магнетне особине испољавају готово сва земљишта, захваљујући углавном присуству једињења Fe у њима (нпр. Магнетит Fe₃O₄; лимонит Fe₂O₃·3H₂O, хематит Fe₂O₃, итд).

1.4.1.6. Вода у земљишту

Вода је један од најважнијих састојака земљишта. Поред тога што је основна компонента његове течне фазе (земљишног раствора), она такође улази у састав гасовите (водена пара), као и тврде (хемијски везана вода) фазе земљишта. Када се говори о води у земљишту мисли се углавном на воду у течном стању, која има многобројне, углавном корисне, али некад и штетне улоге (забаривање, засољавање, испирање хранљивих састојака, ерозија, итд). Водни режим земљишта обухвата количину, стање, облик и кретање воде, као и факторе који утичу на његову промену. Хидросферна функција земљишта подразумева: (i) физички аспект – распоређује и прераспорјеђује воду у различитим хидролошким токовима: површинско отицање, инфилтрација, филтрација (перколација) и флукуација подземне воде и (ii) хемијски аспект – као кохидни филтер доприноси сорпцији молекула гасова и јона макро- и микро- елемената, те утиче на промену хидрогеохемијског система. Заједно с топлотом, вода је, пре свега, један од најважнијих фактора образовања и измена земљишта, јер значајно утиче на ток све три групе елементарних педогенских процеса:

- (i) синтезу у трансформацију органских материјала
- (ii) распадање стена и минерала, и
- (iii) миграцију и акумулацију састојака земљишта.

Поред утицаја на ток многих процеса, земљишна вода такође утиче на физичке (структуру, запреминску густину, збијеност), хемијске (реакција земљишног раствора и редокс потенцијал) и биолошке особине земљишта. Са еколошког становишта од највећег значаја је чињеница да је вода један од најважнијих фактора плодности земљишта. Поред тога што је неопходна за процесе мобилизације елемената у земљишту, вода и сама спада у најважније састојке биљне исхране.

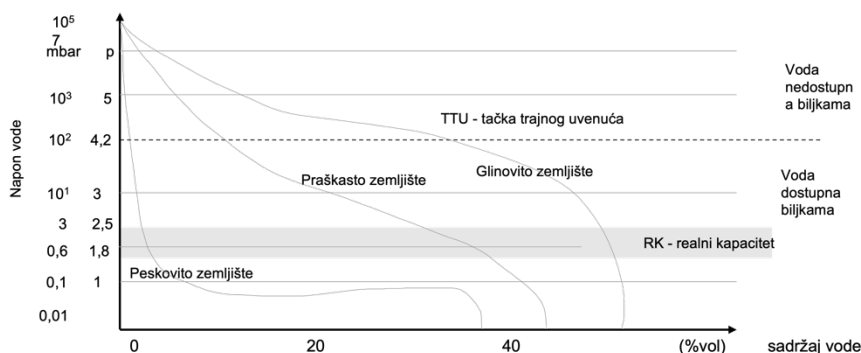
Разликује се више категорија и облика воде у земљишту, а према томе и **водних константи**, које представљају највећи садржај влаге датог облика или категорије воде у земљишту. За прорачуне у одржавању и уређењу водног режима у пракси се користи пољски водни капацитет (енг. "*field capacity*") који представља највећу количину влаге коју може земљиште да задржи при датим условима навлаживања. Одређивање се врши након обилне кише или наводњавања када вишак воде отече дејством гравитације (код песка након 1 дана, код иловаче након 3 дана, код глине након 5-7 дана) и зависи од карактера пора (микропоре повећавају) и садржаја хумуса (повећава).

Доступност воде у земљишту и њено кретање. Вода се у земљишту може наћи као сувишна, приступачна и неприступачна вода. *Сувишна вода* је прекомерна вода која се јавља изнад стања влажности пољског водног капацитета. Негативни ефекти који се јављају уколико је степен ове воде висок јесу слаба аерација и губитак биогених хранљивих елемената (нарочито у пропустљивим песковитим земљиштима). *Приступачна вода* представља ону количина воде која произилази из разлике пољског водног капацитета и тачке перманентног врења. *Неприступачна вода* састоји се из неколико категорија и облика воде која се налази у микропорама земљишта: неприступачна, врло тешко приступачна, тешко приступачна, средње приступачна, лако приступачна.

Вода у земљишту је практично у сталном кретању и то у правцу од вишег ка нижем нивоу потенцијалне енергије. Равнотежно стање се тешко успоставља, јер се стално ремети, било због новог протицања воде, због континуалног губитка перкулацијом, испаравањем или усисавањем од стране биљног корена. Вода се у земљишту креће у гасовитом и течном стању под утицајем различитих сила и у три различита правца: (i) силазно (засићен) под дејством гравитације; (ii)

узлазно (незасићен) под дејством капиларних сила и (iii) бочно – под комбинованим утицајем капиларних и осмотских сила, а делом и гравитације. При кретању воде у течном стању битно се разликује кретање воде у засићеном и незасићеном земљишту.

Однос између напона воде и садржаја воде. Интензитет везивања воде у неком земљишту се израчунава користећи концепт потенцијала (слика 1.4). Под потенцијалом се подразумева рад потребан да се пренесе јединица воде са дате тачке до референтне тачке. Земљиште које је засићено водом има висок негативан потенцијал. Ако се оно доведе у контакт са слободним телом воде (потенцијал = 0), вода ће се у земљишту кретати навише (капиларно дејство) све док се не достигне равнотежа са свим активним силама (силе адсорпције, капиларно дејство, кохезија и гравитација). Вода у земљишту се креће од места вишег потенцијала ка месту са нижим потенцијалом. Разликујемо адсорпциону и капиларну воду. Капиларни притисак се наводи као бројчана вредност (без стављања негативног знака испред) као напон воде.



Слика 1.4. Однос између напона воде и садржаја воде: pF дијаграм

Закон капиларности, који је важан у педологији због функције земљишта да служи као сунђер, резултира из изједначавања ваздушног притиска и капиларног притиска (уз убрзање које потиче од гравитације и површинског напона као детерминишућих фактора), тј. $h = 2970/d$ (h = пораст нивоа воде у капиларама земљишта, у cm, d = пречник капиларе у μm). На тај начин је могуће израчунати пречник капиларе на основу повишења нивоа воде. У основи овога је физички закон да се вода у капилари пење због диференцијалног притиска до висине на којој је атмосферски притисак у равнотежи са капиларним напоном на месту менискуса. $\text{Log}_{10} pF$ се користи да би се окарактерисао водени напон.

Однос између напона воде (или потенцијала матрикса) и садржаја воде зависи од величине пора и расподеле запремине пора у земљишту. Могуће је извући закључке о карактеристикама акумулирања, брзини отицања и расположивости за биљке ($pF < 4,2$ као константа земљишта) упоређивањем песковитог, прашкастог и глиновитог земљишта (хоризонт А). Природни (теренски) капацитет (РК) представља садржај воде природно засићеног земљишта који се успоставља на некој локацији насупрот гравитацији после два или три дана падавина (сатурација). Разлика између количине воде која одговара тачки трајног увенућа (ТТУ) и природног капацитета представља воду расположиву за биљке.

1.4.1.7. Ваздушна својства земљишта

Ваздух се налази и у шупљинама, каналима и порама у земљишту, у којима се налази и вода. Оптимални услови за развој биљака се успостављају када је однос воде и ваздуха 50:50% у зони ризосфере. Земљиште које је стално натопљено водом садржи мању количину ваздуха при чему се стварају анаеробни услови (мочваре, плаве површине, забарене ливаде, тресаве). Уколико је аерација земљишта лоша, раст и развој кореновог система ће бити лимитирани, што ће довести до поремећаја у процесима адсорпције воде и хранљивих састојака, али ће утицати негативно и на микроорганизме присутне у земљишту. Ваздушни капацитет у земљишту је променљива величина услед динамичног односа воде и ваздуха у простору пора и дефинише се као разлика укупне порозности и пољског водног капацитета.

Састав земљишног ваздуха. Просечан састав (запремински %) атмосфере земљишта у поређењу са онима у ваздушној атмосфери је представљен је у *табели 1.3.*

Табела 1.3. Састав ваздуха

	O ₂	N ₂	CO ₂
Ваздух у земљишту	20,6	0,30	79,1
Атмосферски ваздух	21,0	0,03	78,9

Како би се могао објаснити процес аерације земљишта потребно је познавање фактора који на њу утичу. Познато је да ће се молекули гаса кретати у свим правцима кроз порозну средину, али примарно иду из више у нижу концентрацију. Код земљишта ће доминантни процеси

бити процес дифузије CO_2 из земљишта у атмосферу и O_2 из атмосфере у земљиште, док се не успостави равнотежа (у идеалном случају). Међутим, успостављање равнотеже у овом систему је тешко из разлога што су процеси дисања и оксидације увек присутни, а самим тим присутна је и потрошња кисеоника, односно производња CO_2 . Интензитет дифузије оба гаса дефинисан је парцијалним притиском и слободним простором пора. Фактори који имају утицаја на процес аерације земљишта су:

- (i) метеоролошки чиниоци – њихов утицај је повремен;
- (ii) температура – је фактор који двојачко делује на земљиште: (i) услед температурних разлика између појединих слојева земљишта могућа је компресија и експанзија ваздуха унутар простора пора и тенденција да се топлији ваздух креће узлазно услед чега долази до размене гасова и унутар и изван земљишта; (ii) температурне разлике између земљишта и атмосфере условљавају диференцијалну размену гасова између ова два медијума животне средине;
- (iii) барометарски притисак – при повећању притиска долази до смањења запремине земљишног ваздуха што допушта да једна еквивалентна количина атмосферског ваздуха продре у земљиште, док са друге стране смањење притиска условљава експанзију земљишног ваздуха што доводи до преласка једног његовог дела у атмосферу;
- (iv) ветар – утицај ветра је изузетно мали. Само 1/1000 део од нормалне аерације на површини земљишта се приписује ветру;
- (v) киша - је фактор који двојачко делује на земљиште: (i) киша са собом доноси растворени кисеоник у земљиште и (ii) вода истискује устајали ваздух из простора пора, и на овај начин ослобађа простор за свеж ваздух.

Старење и измена гасова. Измена гасова са атмосфером се одвија у три главна хоризонта, од "А" до "С". У хоризонту "А" се одвија интензивно старење (распадање), обогаћивање и таложње неорганских соли и обогаћивање и инфилтрација органских материјала. Материјали и производи трансформације из хоризонта "А" улазе у хоризонт "В" као резултат таложње. Овде се одвија оксидација органског материјала, уз таложње Fe(III) и Mn(IV) хидратисаних оксида. У хоризонту "С" одвија се у малој мери старење стенске подлоге. Овде се успостављају равнотеже у раствору као равнотежном земљишном раствору у овом

хоризонту. Растворни органски угљеник је овде минималан: парцијални притисак кисеоника је константан.

1.4.1.8. Температура и топлотна својства земљишта

Степен загревања земљишта зависи, поред географског положаја и од: физичких особина земљишта, врсте покривача (биљни или снежни), експозиције, облика терена и др. Од физичких особина земљишта најважнији фактори су топлотни капацитет и топлотна проводљивост. *Топлотни капацитет* земљишта се дефинише као способност земљишта да прими одређену количину топлоте, док *специфични топлотни капацитет* представља количину топлоте која је потребна да се загреје 1 грам земље за 1°C. Поред познавања ова два термина, значајан термин који се користи када су топлотна својства земљишта у питању јесте и *запремински топлотни капацитет* који се дефинише као количина топлоте која је потребна да се загреје 1 cm³ земље за 1°C. Топлотни капацитет земљишта зависи од његове влажности, порозности и минералног састава, као и од експозиције терена. Нпр. тамна земљишта апсорбују више Сунчеве енергије и брже се загревају од светлијих које имају већи алbedo. Зависно од физичких особина различита земљишта имају различит топлотни режим. Топлотна проводљивост земљишта се дефинише као особина земљишта да проводи топлоту од јаче загрејаних ка мање загрејаним слојевима. Вегетација у знатној мери утиче на температуру површинског слоја земљишта, што зависи од врсте биљака, фазе развића и густине биљног покривача. Истовремено, биљни покривач утиче како на дневни тако и на годишњи ток температуре површинских слојева земљишта. Вегетација дању штити земљиште од Сунца, а ноћу има термоизолационо дејство, тј. смањује излучивање топлоте.

1.5. Хемијска својства земљишта

Земљиште се састоји из чврсте, течне и гасовите фазе, из растворних и нерастворних једињења, органских и неорганских компоненти. Садржи јоне и једињења, соли, киселине, базе, минерале и фрагменте стена. Такође, у састав земљишта улазе и колоиди, fine честице земљишта, укључујући хумус, глину, оксиде и хидроксиде гвожђа и алуминијума. Изучавањем међудејства свих набројаних компоненти се бави хемија

земљишта. Колоиди присутни у земљишту носе електрохемијско наелектрисање, позитивно и/или негативно, што дефинише јоноизмењивачки капацитет земљишта. Поред ове особине, значајна хемијска карактеристика земљишта јесте и његова рН вредност, као и редокс потенцијал (E_h). рН вредност земљишта представља вредност негативног логаритма садржаја водоникових јона у земљишту. Означава степен киселости и алкалности и утиче на растворљивост компоненти присутних у земљишту, на њихову доступност и усвајање од стране организма, као и на раст и развој микроорганизама у земљишту. Нпр. неки нутријенти су недоступни уколико је рН вредност висока или ниска. Редокс потенцијал представља тенденцију земљишта да се редукује или оксидује. Генерално, земљиште се састоји из две основне групе материја: минералне и органске компоненте и са тог аспекта ће и бити обрађен у наставку текста.

1.5.1. Порекло и састав минералне компоненте земљишта

Земљишта се састоје из две основне групе материја: минералне и органске компоненте. Око 80% целокупне минералне компоненте је стабилан, хемијски и биолошки инертан, док органска компонента представља углавном нестабилан и променљив део земљишта.

Минералну компоненту земљишта углавном сачињавају три групе минерала, који се разликују према карактеру и функцији у земљишту: (i) магматски (примарни) минерали, (ii) глинени (секундарни) минерали и (iii) коначни продукти распадања, слободни оксиди и хидроксиди Si, Al, Fe и Mn.

Примарни минерали су они који након хлађења и кристализације ужарене магме нису хемијски измењени, стога сваки од њих поседује фиксни облик, састав и особине. Представљају главни извор свих хемијских елемената у земљишту и чине основну грађу минералне компоненте. Фракције песка и праха се састоје скоро у потпуности од примарних минерала. Њихов састав је најчешће улазе алумосиликати и алумо-феросиликати са променљивом количином алкалних (K^+ и Na^+ јона) и земноалкалних (Ca^{2+} и Mg^{2+} јона) база.

Настајање, трансформација и разградња глинених минерала. Минерали глине (величина честица $< 2 \mu m$) настају хемијским старењем стена и минерала следећи два пута: (i) из примарних филосиликата као што је лискун углавном механичким процесирањем или физичким

старењем; (ii) као нове формације из производа распадања ослобођених у току хемијског старења фелдспата. Минерали глине су филосиликати, чија се трансформација може пратити уназад до инкорпорирања или преноса јона елемената Al, K, Na, Ca и Mg и промена у силикатној групи. У првом путу, после распада лискунских минерала до колоидне величине, одвијају се реакције катјонске и анјонске измене које су веома значајне за обезбеђивање нутријената биљкама. Нове формације од производа распадања фелдспата захтевају врло дуго време. Разликују се следећи типови минерала: (i) двослојни (1:1) – каолинит, (ii) трослојни (2:1) - илити и (iii) четворослојни (2:2) - вермикулити, смектити (монтморилонити).

Четворослојни минерали имају октаедарски средишњи слој од Mg-хидроксида или Al-хидроксида. Алофани су паракристални и аморфни алуминијумски силикати чије се јединичне структуре комбинују по тешко препознатљивом редоследу. Поред слојевите структуре и мале величине честица са одговарајућом великом површином, једна од карактеристика минерала глине јесте њихова способност бубрења.

Мешани слојеви глине. У већини земљишта се може наћи више од једног типа глине. Различити типови минерала глине имају сличне структуре (тетраедарске и октаедарске слојеве) тако да интерстратификација (раслојавање) различитих минерала глине се може уочити. Генерално, мешани слојеви глине се састоје од интерстратификације експандираног водоносног слоја и неводоносног слоја. Монтморилонит-илит је најпознатији, а хлорит-вермикулит и хлорит-монтморилонит се такође често могу наћи у природи.

Некристални глинени материјали су такође присутни у земљишту и ту се у првом реду мисли на алофан. Алофан је аморфни до слабо кристални минералоид алуминијум-силикатне глине и нема дефинисан састав и облик. Његова хемијска формула је $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{SiO}_2)_{1,3-2} \cdot (2,5-3)\text{H}_2\text{O}$. Алофан је производ атмосферских или хидротермалних промена вулканског стакла и фелдспата и понекад има састав сличан каолиниту, али генерално има моларни однос $\text{Al}:\text{Si}=2$. Типично се формира при благо киселим до неутралним рН вредностима (5–7). Његова структура је слична минералима глине и састоји се од закривљених октаедарских слојева алуминијума и тетраедарских слојева силицијум диоксида.

Трансмисионе електронске микрографије показују да се генерално састоји од агрегата шупљих сферула у пречнику 3–5 nm.

Минерали глине као полифункционални измењивачи. Изоморфна супституција катјона у тетраедским и октаедарским слојевима доводе до вишка негативног наелектрисања у минералима глине који се описују као трајна промена. “Променљиво наелектрисање” зависно од pH и концентрације материјала у земљишном раствору заснива се на амфотерним особинама хидроксида алуминијума и донекле гвожђа, у мери у којој су они локализовани на бочним површинама минерала глине. Ове особине минерала глине представљају важну функцију у погледу везивања јона метала, као и њиховог ослобађања. Вода из земљишног раствора је та која утиче на место смештања (јонских) измењивача, тј. састава катјона и анјона, који бивају сорбовани да би се избалансирано наелектрисање. Мућкањем дестиловане воде (*DIN елуација S4*) изнад земљишта доводи до равнотеже активности између сорбованих јона и H^+ и OH^- јона који настају из воде. Овај процес се може понављати све док се не постигне потпуна измена. У просеку, 66% (од укупне количине) Ca^{2+} , 26% Mg^{2+} , 5% K^+ и 3% Na^+ (али 0% Al^{3+}) може бити измењено у пољопривредном земљишту. Ако земљишта имају $pH < 5$ (као што је случај у Шведској), изменљива количина Ca^{2+} се смањује на 48%, али се може изменити 33% Al. У претежно киселим шумским земљиштима или земљиштима богатим тешким металима, ослобађају се такође јони тешких метала који имају токсично дејство.

Значај глине у животној средини. Глине играју важну улогу у животној средини јер представљају природни „сунђер“ полутаната, везујући њихове анјоне или катјоне путем јонске измене или адсорпцијом. Ово се дешава због тога што глине садрже катјоне и анјоне на својој површини, а ти јони могу бити: Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , K^+ , NH_4^+ , Na^+ али и SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} , NO_3^- . Ови јони могу бити замењени релативно лако без утицаја на минералну структуру глине. Велика специфична површина, хемијска и механичка стабилност, слојевита структура, висок капацитет катјонске измене и друге особине чине глине одличним адсорбентом.

Каолинит. Адсорпција тешких метала би могла да утиче на структуру каолинита, замена водоникових јона и адсорпција Pb(II), Zn(II) или Cd(II) може изазвати отицање, унутрашњи стрес, флокулацију или смањење снаге смицања и повећање хидрауличке проводљивости и

стишљивости. Даље, супституција H^+ јона металним јонима могла би да утиче на *van der Waalsove* силе између елемената у каолиниту.

Монтморилонит. Кинетика катјонске размене је брза и катјони као што су Na^+ и Ca^{2+} формирају спољне површинске комплексе. У прилог катјонској измени иде и рН зависно усвајање метала. У овом процесу адсорпције, адсорбовани јони су везани за површину глине, делећи један или више лиганата (уобичајено кисеоник) са катјонима адсорбентима као изолованим комплексима. Са повећањем рН или концентрације адсорбованих катјона, може доћи до преципитације метала. Капацитет адсорпције метала на монтморилониту расте следећим редоследом $Pb = Cd < Cu < Zn < Mn < Ni$.

Природа дефицита наелектрисања глина-несавршеност кристалне решетке. Изоморфна супституција: Катјони у октаедарском и тетраедарском слоју могу бити замењени другим типом катјона без промене кристалне структуре што доводи до дисбаланса набоја у монтморилониту. Само занемарљива изоморфна супституција се одвија у каолиниту.

Сломљена ивица. Сломљена ивица може бити позитивно или негативно наелектрисана.

Наелектрисање од адсорбованих јона (наелектрисање унутрашњих и спољашњих комплекса). Јони у спољашњим комплексима не губе свој хидратациони омотач. Унутрашњи комплекси настају директним електростатичким везивањем између централних атома. Екстерна или међучестична површина је генерално негативно наелектрисана, док ивице могу бити позитивно и негативно наелектрисане. Дефицит наелектрисања балансирају различити катјони.

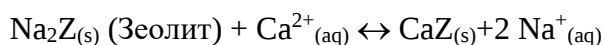
Катјонски измењивачки капацитет и својства површине глинених минерала. Различити типови и количине катјона се адсорбују на наелектрисаним честицама глине. Тип адсорбованих катјона зависи од околине у којој се глина налази. Нпр., Na и Mg су доминантни катјони у морским пределима (због њиховог садржаја у морској води). Генерално Ca и Mg су преобладајући катјони.

Измењивост катјона. Могућност измене катјона зависи од низа фактора: (1) валенце (катјони веће валенце могу да замене катјоне ниже валенце); (2) величина јона (катјони са већим хидратисаним радијусом

имају већу моћ измене). Према овим правилима може се направити генерални редослед измене:



Такође, као додатни фактор јавља се и релативна количина неког јона, па тако нпр. високе концентрације Na^+ могу да замене Al^{3+} . Особина измењивости јона која карактерише глину, омогућила је њену успешну примену за омекшавање воде. Тврда вода садржи соли калцијума и магнезијума као што су $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$. Тврдоћа се може уклонити заменом Ca^{2+} и Mg^{2+} са јонима Na^+ , по следећем механизму:



Када се јоноизмењивачки капацитет зеолита попуни, он може бити регенерисан пропуштањем концентрованог раствора NaCl .

Катјонски измењивачки капацитет или капацитет катјонске измене (*енг. Cation Exchange Capacity (CEC)*) се дефинише као количина измењивих катјона коју минерал може адсорбовати на одређеној рН вредности или способност земљишта да задржава нутријенте и спречава да дође до њиховог излуживања. Представља меру тоталног негативног наелектрисања и укључује: (1) негативно наелектрисање које потиче од изоморфне супституције унутар решетке, (2) слободне везе на ивицама и на спољашњој површини и (3) доступне дисосоване хидроксилне групе. Последњи тип наелектрисања је рН завистан. Катјони на површини глинених минерала су смештени у центру координационог полиедра чији су чворови молекули воде и/или кисеоници хексагоналних шупљина. Ако су окружени молекулима воде катјони граде са површином комплексе са спољашњом координационом сфером, док у директној интеракцији са базалним кисеонцима се формирају комплекси са унутрашњом координационом сфером. Величина и енергија хидратације катјона одређују његово понашање. Количина измењивих катјона се назива катјонизмењивачки капацитет и обично се изражава у милиеквивалентима (meq) по 100 грама суве глине.

Потенцијал бубрења. Три фактора су неопходна да би дошло до бубрења (1) присуство монтморилонита у земљишту; (2) садржај воде око пољског водног капацитета и (3) присуство потенцијалног извора воде за бубрење.

Оксиди и хидроксиди. У групу минералних компоненти спадају и продукти хемијског распадања примарних и секундарних алумосиликата, тзв. „слободни оксиди“ (оксиди и хидроксиди силицијума, алуминијума, гвожђа и мангана). По својој величини припадају глиновитој фракцији, аморфни су и имају способност привлачења других минералних честица услед способности њихове површине да се понаша као везујуће средство.

Минерали простих соли. Главни представници минерала простих соли су једињења соли земноалкалних и алкалних метала. Од соли земноалкалних метала (то су обично соли Ca, Mg, Fe), главни представници су карбонати, сулфати, фосфати, хлориди и нитрати. Што се тиче соли алкалних метала ту су у првом реду соли Na и K, карбонати, сулфати, хлориди и нитрати. Значај минералних компоненти земљишта лежи у томе што њихов састав одређује текстуру земљишта и друга физичка својства.

1.5.1.1. Елементарни хемијски састав земљишта и подела елемената у педосфери

Према просечној заступљености, хемијски елементи се углавном деле у две основне групе: макроелементи (са уделом већим од 0,1%) и микроелементи (са уделом мањим од 0,1%).

Макроелементи. Постоје четири групе макроелемената груписаних према уделу у саставу земљишта:

- (i) *Кисеоник и силицијум.* Кисеоник се у земљишту налази у два облика: као гас и као оксид у променљивој количини и дистрибуцији. Његов значај се огледа у одржавању динамике земљишта преко аеробних бактерија, а неопходан је и за респирацију виших биљака путем кореновог система. Силицијум се налази на другом месту по свом уделу у педосфери. Једињења силицијума су релативно лако покретљива, и иако се силицијум не сматра битним биогеним елементом неке биљке мочвара и неке врсте шумског дрвећа нагомилавају га у извесној количини.
- (ii) *Алуминијум и гвожђе.* Алуминијум у земљишту је присутан као примарни алумосиликат: фелдспат, амфиболи – лискуни и пироксени са садржајем алуминијума у облику Al_2O_3 у

проценту од 15-35 и у облику секундарних-глинених минерала: монтмори-лонит са 20% и каолинит са 45% Al_2O_3 . Не припада групи био-гених елемената, има утицаја на киселост земљишта и у вишим концентрацијама може испољити токсично дејство на биљке. Гвожђе испољава већу мобилност у поређењу са алуминијумом, и његова једињења представљају поуздан индикатор деструктивних процеса у земљишту. Као и алуминијум, у већим концентрацијама може испољити токсично дејство. Припада групи биогених елемената, али услед тога што га биљке усвајају из врло разређених раствора, неки овај елемент убрајају у групу микроелемената.

- (iii) *Калцијум, магнезијум, натријум и калијум.* Калцијум, магнезијум и калијум припадају групи биогених елемената. Калцијум учествује у великом броју процеса: синтези земљишта, синтези благог хумуса, сузбијању киселости, итд. Значај присуства магнезијума се огледа у смањењу распона приступачне влаге у земљишту, захваљујући способности хидратације молекула воде, као и утицају на заслањивање земљишта. Порекло калијума је у земљишту везано за минералну компоненту, те су главни облици једињења калијума соли, примарни и секундарни алумосиликати. И поред тога што је у основи биогени елемент, његово присуство може негативно утицати на структуру земљишта. Натријум, са друге стране, јесте једини елемент који припада овој групи, а не сматра се биогеним елементом, и ако га биљке често усвајају у већим количинама. Натријумова једињења (у првом реду Na_2CO_3 , NaOH или сам Na^+ јон) негативно утичу на физичка (услед пептизације), али и на хемијска својства земљишта (подижу рН).
- (iv) Сви остали макроелементи: *титанијум, фосфор, азот, сумпор, селен, угљеник и водоник.*

Микроелементи. У ову групу једињења спадају манган, цинк, бакар, кобалт, бор и молибден. Њихово присуство у земљишту је углавном испод 0,1%, и у малим количинама су потребни за правилан раст и развој биљака. Њихово присуство значајно варира у појединим земљиштима. Правило је да су површински слојеви „богатији“ овим елементима услед

биолошке акумулације путем усвајања кореновим системом из дубљих слојева.

Посебну групу елемената чине *радиоактивни елементи* у земљишту. У природне радиоактивне елементе се убрајају: (i) уранова група једињења (време полураспада 4,5 милијарди година); (ii) торијумова једињења (време полураспада 13,9 милијарди година) и (iii) актинијумова једињења (која настају из урановог изотопа ^{235}U). Поред природне, у земљишту постоји и вештачка радиоактивност, која је махом антропогеног порекла (хаварије нуклеарних реактора и других постројења, примена радиоактивних изотопа у научно истраживачким установама, медицини и слично).

1.5.2. Хемијска својства органске компоненте земљишта

Органску материју у земљишту чине све органске компоненте које су присутне у земљишту: (i) Свеже резидуе (до 15% органске материје су свеже резидуе (обично <10) и састоје се углавном од опалог лишћа и другог биљног материјала.); (ii) Органска материја у фази распадања (Биљни материјал се трансформише из једног органског једињења у друго углавном путем земљишних организама. Организми креирају нуспродукте, отпад и новонастало ћелијско ткиво. Једињења ослобођена као отпад од стране једног организма могу бити извор хране за други организам) и (iii) Стабилна органска материја (хумус и производи дубљег разлагања органских остатака). Производи разлагања и ресинтезе су органска једињења индивидуалне природе (беланчевине и аминокселине, угљени хидрати и њихови деривати, масти, воскови, смоле, танинске материје, лигнин и др.). Међу неспецифичним материјама земљишног хумуса нађени су и: нискомолекуларне органске киселине (неиспарљиве и испарљиве), полиуронске киселине и њихови деривати - аминокселине, глукозиди, полифеноли, биолошки активне материје као што су ферменти, витамини, антибиотици. Већина њих присутна је у земљишту у веома малим количинама и могућност њихове идентификације и одређивања је условљена применом новијих метода испитивања. Без обзира на мали садржај у земљишту, многе од тих материја имају важну улогу у земљишним процесима (распадању минерала, премештању неких хемијских елемената по профилу земљишта, образовању структуре земљишта), као и у метаболизму елемената у биљкама. У укупној маси органска једињења индивидуалне

природе чине приближно 10-15% укупне резерве хумуса у земљишту. Основну масу органске материје земљишта (85-90%) чини њен специфични део - специфичне хумусне материје. Специфичне хумусне материје се састоје из низа високомолекуларних једињења која имају карактер киселина. Већи њихов део налази се повезан на разне начине са минералним делом земљишта. Њихово издвајање из земљишта и раздвајање врши се помоћу разних растварача који раскидају ту везу. Претходно се земљиште ослобађа од калцијума обрадом са H_2SO_4 - декалцинира се.

Дијагенеза и хумификација. Дијагенеза је термин који се уопштено користи да се означе они процеси у току којих се лабави стенски материјал претвара у чвршће стање, често хемијски и минеролошки такође. Дијагенеза се у овом случају односи на један од два начина конверзије неживог (изумрлог) органског материјала у земљишту. Први ступањ је разлагање услед активности микроорганизама. С друге стране, у геолошком путу од фрагмената насталих овом разградњом настају органски минерали, тј. фосилна горива (хумински угаљ или минерални угаљ, лигнит, тврди угаљ - антрацит), што се назива карбонизацијом, а уз конверзију течности метаморфозом. Биолошки пут разградње доводи до ослобађања CO_2 , H_2O , NH_3 и минерала из органске фазе. Најзад, педолошки пут доводи до хуминских материја. Више фаза микробног разлагања изумрлог материјала је потребна за процес хумификације тако да се граде реактивни деградациони производи као што су монсахариди из полисахарида, као и пептиди и аминокиселине из протеина и фенолна једињења из компонената ћелијског зида. Надаље, у оваквим смешама се одвија полимеризација моносахарида, цикличких аминокиселина и фенола, што доводи до грађења високо-полимерних хуминских материја као кополимера. Принцип на коме се заснива грађење хуминских материја представља повезивање основних цикличких материјала који су већ присутни у биљци, као што су лигнини, боје и танински агенси, или подразумева циклизацију линеарних производа распадања једињења са прстеном. Овакав тип хемијске реакције може бити одлучујући у киселим, неплодним и високо-зamuљеним земљиштима. Хуминске материје и минерали глине подлежу релативно јаком везивању у земљишту, градећи тзв. глина-хумус комплексе. Хумус (који није врло растворан или реактиван) представља крајњи производ хумификације; фулвичне киселине имају

мале молекулске масе и већи садржај киселих група него хуминске киселине.

Земљиште и хумус. У профилу земљишта садржај хумуса (постмортални материјал као смеша неживе материје биљака и животиња) се приказује као функција дубине. Хумус се јавља у сферичном слоју – као "О" хоризонт, чија се под-подела заснива на садржају пепела – у "А_h" хоризонту. Хоризонт "О₁" (1 = остаци) садржи морфолошки већином непромењене делове, као што су лишће, иглице, кора; интензивно микробиолошко разарање се одвија у О_f хоризонту (f = ферментација); хоризонт хумификације "О_h" се састоји од тамног измета црва и хумусних честица (пречник < 2 mm) који је обавијен хуминским материјама. Садржај хумуса се смањује од горе на доле, док се у обрнутом смеру повећава садржај минералне фракције. Сирови хумус се састоји од механички сломљених делова биљака који су мумифицирани или обавијени (инкрустрирани) органским киселинама. Одлежали хумус садржи углавном оне делове биљке који су били разорени од стране антропода (ракова и паука), затим измет ових животиња и гљивине хифе. Насупрот устајалом хумусу, у благом хумусу фракције минералног тела и глине формирају релативно јаке хемијске везе. Активност глиста игра овде одлучујућу улогу, пошто се тиме хумусно и минерално тело доводи до димензија честица праха при проласку кроз њихов интестинални тракт. Предуслов за грађење мула јесте довољно присуство глине и материјала као што су креч и слободни оксиди гвожђа, који потпомажу везивање хуминских супстанци за минерале глине. Мул је доминантан тип хумуса у земљиштима богатим глином.

Биогенеза хуминских супстанци. Хуминске киселине и хуминске супстанце играју важну улогу у загађеним земљиштима: оне се комплексирају са тешким металима, адсорбују органске супстанце, а такође могу да имају одлучујући утицај на њихову трансформацију. Wolfgang Ziechmann, познати истраживач хуминских материјала предлаже диференцирано представљање биогенезе. Он укључује прекурсоре хуминских супстанци (ХсП) у хуминске материјале, киселе и релативно стабилне хуминске киселине (Ха) и хумине (Ху) као крајње производе процеса хумификације. Према Ziechmann-у у овом важном природном процесу се преображавају масе које су у погледу количине

упоредиве са онима у процесу фотосинтезе. Према садашњем стању ствари могу се разликовати различите фазе биогенезе. У метаболичкој фази постоји делимично микробијално разградње супстанци са великом молекуларном масом. При томе настају материјали који се могу хумификовати. Ако се посматра ароматични огранак, уводна фаза хумификације почиње са ароматичним природним супстанцама биљака. Стварање прекурсора хуминских материја (ХсП) почиње упоредо са грађењем радикала. Није могуће детектовати усвајање полазног неароматичног материјала у овој конформационој фази. Неароматични полазни материјали потичу од угљених хидрата, масти и протеина. У овој фази, у којој се укупни, врло сложени процес, завршава стварним грађењем система хуминских супстанци, контаминанти као што су метали и ксенобиотици се могу инфилтрирати у систем и бити увучени у реакције. Стога је биогенеза хуминских материја од интереса за науку о земљишту, али и за науку о животној средини као целини. До сада је фаза настанка система хуминских супстанци могла бити описана једино коришћењем модела реакција. Ови модели синтезе хуминских супстанци укључују аутооксидацију различитих фенола до радикала и њихове реакција, а такође и *Maillard*-ову активност познату из хемије животних намирница. На пример, узимајући хидрохинон као пример, било је показано да овај фенол подлеже аутооксидацији у алкалној средини у присуству кисеоника, што доводи до различитих интензивно мрких производа чије су особине сличне хуминским супстанцама. Чак и реакција настајања браон боје, позната као *Maillard*-ова реакција, која се јавља у процесу конверзије нередукуюћег шећера са аминокиселинама, даје производе сличне хуминским супстанцама (плус мирисе и пигменте у припреми хране). У првој фази система хуминске супстанце се детектују бројни стабилни комплекси хуминског материјала (или прекурсора хуминских материја) са нехуминским супстанцама као што су феноли, угљени хидрати и аминокиселине, а такође и комплекси са полицикличким угљоводоницима, стероидима и ензимима. Могуће је разликовати термин “хуминске супстанце” од “нехуминских супстанци” на следећи начин. Нехуминске супстанце су сви они материјали који се појављују у фази биолошке и абиолошке разградње (распада) и трансформација. Хуминске супстанце укључују све производе који се абиолошки синтетизују као производи и трансформације и производи синтезе. Литосферске фракције земљишта (минерали, оксихидрати) су такође укључени у ове абиолошке процесе синтезе. Ако су неорганске

компоненте укључене у процесе органске синтезе, настају стабилни глина-хумусни комплекси.

Основне групе хумусних материја су:

(1) *Хуминске киселине* чине групу тамно обојених једињења које се екстрахују из земљишта базама (или другим растварачима) у облику слабије или јаче обојеног раствора (хумата-Na, -NH₄ или -K), а таложе се киселинама у облику аморфног талога – гела при рН вредностима од 1-2. Хуминске киселине екстраховане из разних земљишта имају следећи елементарни састав: С - 50-62%, Н - 2,8-6%, О - 31-40%, N - 2-6%. На основу варирања у елементарном саставу хуминских киселина може се закључити да се ради о групи високомолекуларних хемијских једињења, сличних по саставу и својствима. Налазе се у облику мицела (групе већег броја молекула), и њихови појединачни молекули се састоје из микрограђевних јединица: једара (језгара), мостића и функционалних група. Као језгра служе изо-, хетероциклични шесто- или петочлани прстенови, као и кондензовани прстенови. Функционалне или реактивне групе представљају бочне ланце линеарно полимеризованог угљеника, од којих зависи карактер међусобног деловања хуминских киселина са средином која их окружује. Функционалне групе - карбоксилне (-COOH), фенолхидроксилне (-OH), метоксилне (-O-CH₃) и карбонилне (C=O) групе. Присуство карбоксилних група служи као основа да се хумусне материје могу убројити у органске киселине. Водена суспензија хуминских киселина има рН око 3. Карбоксилне групе се разликују од фенолхидроксилних тиме, што се њихови H⁺-јони замењују базама већ при неутралној реакцији, док се водоник фенолхидроксилних група може замењивати тек у алкалној средини. Број карбоксилних и фенолхидроксилних група у молекулу хуминских киселина није константан, већ зависи од стадијума хумификације, услова у којима се она врши и састава полазног органског материјала.

(2) *Фулво киселине* представљају специфичну групу хуминских материја, растворљивих у води и минералним киселинама, жуте или црвенкасте боје. Назив фулвокиселине је у вези са њиховом бојом (латинска реч „*fulvus*“ значи жут). Припадају групи високомолекуларних једињења. Водени раствори фулво киселина имају јако киселу реакцију медијума (рН 2,5). Молекуларна тежина

фулво киселина, одређена различитим методама, креће се од 100 до неколико стотина па чак и хиљада конвенционалних јединица масе. Молекул фулво киселине има једноставнију структуру у поређењу са хуминским киселинама. Ароматични део ових једињења је мање изражен. У структури фулво киселина преовлађују бочни (периферни) ланци. Активне функционалне групе су карбоксилне и фенол-хидроксилне групе, чији водоник улази у реакције размене. Капацитет измјене може достићи 700-800 mEq на 100 грама препарата фулво киселине. У интеракцији са минералним делом земљишта, фулво киселине стварају органо-минерална једињења са јонима метала, као и минерале. Фулво киселине, због своје јако киселе реакције и добре растворљивости у води, активно уништавају минерални део земљишта. У том случају настају соли фулво киселине које су врло покретне у профилу земљишта. Органо-минерална једињења фулво киселина активно су укључена у миграцију материје и енергије у профилу земљишта, у формирању, на пример, индивидуалних хоризоната. Све органске материје, које се екстрахују из земљишта базама, а не таложе киселинама, не могу бити сврстане у фулво киселине. Велики њихов део заступљен је у облику нискомолекуларних једињења. Елементарни састав фулвокиселина се разликује од елементарног састава хуминских киселина по нижем садржају С и N и већем садржају О и H (C - 44-49%, H - 3,5-5%, O - 44-49% и N - 2-4%).

(3) *Хумини* представљају комплекс хумусних материја, какав се екстрахује базом при непосредној обради декалцинираног земљишта, тј. састоји се из хуминских и фулвокиселина. Хуминске киселине из хумина одликују се само нешто нижим процентом C, а вишим процентом H и O у поређењу са хуминским киселинама, које се растварају у базама. У њима постоји веома чврста веза хуминских са фулво киселинама (по типу сложених естара и анхидрида), уз губитак знатног дела киселинских својстава са степеном полимеризације и сажимања, чиме се и објашњава њихова постојаност према базама. Доказана је такође веза фракције хумина са минералним делом земљишта. Њихово специфично понашање у земљишту, због којих су и издвојени у засебну групу хумусних материја, није условљено само њиховом природом, већ више карактером њихове везе. У ову групу хумусних материја улазе такође и угљенисане честице које се налазе у незнатној количини у земљишту. Ове честице настају као резултат карбонизације биљних остатака при наизменичном смењивању сувишног влажења и исушивања. Оне представљају инертне компоненте, које не учествују у земљишним процесима.

Синтеза хуминских супстанци. Хумус, као што је раније речено, настаје трансформацијом органских остатака под утицајем микробиолошке активности. Микроорганизми учествују у свим етапама синтезе хумуса. Основни материјал по количини за синтезу хумуса јесу остаци зелених хлорофилних биљака у земљишту или на његовој површини. Трансформација биљних остатака под утицајем животне активности микроорганизама врши се у земљишту на различите начине:

- потпуна минерализација до крајњих производа распадања: CO_2 , H_2O , NH_3 , просте соли (које аутотрофни организми поново користе за своју исхрану);
- синтеза нових органских једињења (микробна синтеза), а после аутолизе микроорганизама ова једињења поново подлежу трансформацијама;
- синтеза специфичних хумусних материја углавном на рачун међу-производа разлагања - хумификација

Према функцији хумус се дели на *хранљиви* (лако се раствара и минерализује и приступачан је биљкама) и *трајни* (отпоран на разградњу, састоји се од хумусних киселина – значајан за процесе адсорпције и физичка својства земљишта).

Функција хумуса. Хумус чини највећу резерву (85-90%) органског дела чврсте фазе земљишта. Хумус се назива специфичном и стабилном органском материјом земљишта због чињенице да су то једињења која се образују само у земљишној средини, а нису присутна у класичној органској материји. Посебни значај у квалитету хумуса има удео хуминских киселина, затим већи садржај угљеника, азота и осталих биогених елемената, од којих зависи капацитет адсорпције у земљишту, који се може овом органском материјом увећати неколико пута више од капацитета колиода глине. Улога хумуса се огледа у задржавању воде и нутријената, побољшању физичко-хемијских, водних и биолошких својстава земљишта, спречавању ерозије, побољшању топлотног режима као и у стимулативном деловању на развој, кореновог система и надземних органа гајених биљака обезбеђујући им малу количину нутријената (N и P) својим спорим распадањем путем микроорганизама, смањује ефикасност пестицида, доприноси стварању стабилних структурних агрегата, повећава порозност, аерацију, капацитет за воду код песковитих земљишта, пропустљивост за воду код глиновитих

земљишта, својом тамном бојом доприноси загревању земљишта и др. Додатно, хумус утиче на физичка, хемијска и биолошка својства: органска једињења у хумусу делују различито на земљиште – нека повећавају плодност, а нека делују деструктивно и смањују плодност; његов капацитет адсорпције је висок у односу на све остале материје присутне у земљишту – 400 mmol/100 g хумуса; хуминске материје и минерали глине подлежу релативно јаком везивању у земљишту градећи тзв. глина-хумус комплексе, а такође хуминске материје могу да оклудују и везују разне органске материје вештачког порекла, које човек додаје земљишту, као што су хербициди, инсектициди или органски отпад из хемијске и нафтне индустрије. Деградација хумуса се дешава брзином од 2,5% по години. С обзиром да хумус прекрива честице глине, праха, чиме они постају тамнији, правило је да што је боја тамнија то земљиште садржи више хумуса. За плодност земљишта изузетно је битан садржај и однос С и N, повољним се сматра однос 10:1, где хумус садржи 58% С и 3-6% N. Према садржају хумуса, земљишта се деле на:

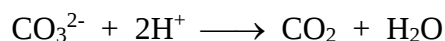
- слабо хумусно <2%
- средње хумусно 2-4%
- јако хумусно 4-10%
- врло јако хумусно 10-15%
- полутресетно (органогено-минерално) 15-30%
- тресетно (органогено) >30%

1.5.2.1. Динамички процеси у земљишту

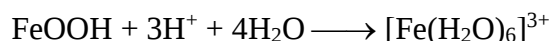
У земљишту се налази у слободном стању само незнатан део хумусних материја, док је највећи део везан са минералним материјама земљишта. Међусобне реакције хумусних материја са минералним делом земљишта доводе до образовања различитих једињења. У зависности од мобилности насталих једињења врши се акумулација хумусних и минералних материја, или пак миграција производа тих реакција по профилу земљишта. Основни облици везе хумусних материја са компонентама минералног дела земљишта јесу: (i) једињења са једновалентним и двовалентним катјонима, који се налазе у земљишном раствору или на површини колоидних честица (минерала глине) - образовање хумата и фулвата (Na, K, NH₄, Ca, Mg); (ii) реакција са водорастворљивим и колоидним облицима сесквиоксида (несиликатним облицима R₂O₃); и (iii) реакција са минералима глине.

Земљиште као јединица складиштења, пуфер и претварач (конвертор) полутаната. Утицај на земљиште потиче у првом реду од стварања киселина, сумпордиоксида и оксида азота; од тешких метала који се могу акумулирати као постојани полутанти у земљишту; и од ксенобиотика, који се тешко разграђују. Укупно, они утичу на материјални циклус почевши од земљишта, укључујући и ланац исхране.

Пуферишући системи у земљишту. Поред њихових особина јонске измене, земљиште такође функционише и као пуфер. Ако је присутан слободан кречњак, после додатка киселине, прво ступа у реакцију пуферски систем калцијум-хидрогенкарбоната (pH 6,8-8,0):



Ако слободан кречњак није више присутан онда се активира функција измењивача: земно-алкални и алкални јони (опсег силикатног пуфера) се замењују јонима H^+ из земљишног раствора. Систем се пуферише између pH 6,8 и 4,5. При нижим вредностима pH пуферски систем алуминијума преузима улогу. За разлику од јонске измене, у овим иреверзибилним процесима H^+ јони истискују јоне алуминијума из октаедра минерала глине. Јони алуминијума су присутни у хидратисаном облику при pH 3-4; при вишим вредностима pH (што се дешава, на пример, при додавању креча), могу се појавити полимери који мање оштећују коренов систем (грађење хидроксо-аква комплекса). При још нижим pH вредностима хидрати оксида гвожђа могу играти улогу пуфера:



Поред природног закишељавања земљишта као последице микробиолошких процеса (укључујући и хумификацију), увођење киселина које потичу од емисије (киселе кише) довело је до смањења пуферског капацитета земљишта у току неколико последњих деценија. Као резултат, нутријенти везани за минерале глине су испрани и тешки метали као што су Pb, Cd и Cu (из емисије) са својом токсичном активношћу су ушли у земљишни раствор. Надаље, при нижим pH вредностима гљивице корена, које промовишу усвајање хранљивих састојака од стране виших биљака као што је дрвеће путем симбиозе,

бивају оштећене. Према томе, снижавање рН у земљиштима је повезано са изумирањем шума.

Сорпциони процеси у земљишту. Земљиште по дефиницији представља дисперзион систем у коме се налазе честице различитих димензија. Смањење димензија честица доводи до повећања њихове активне површине, и лакшег везивања већих количина јона из гасовите или течне фазе. Стога, површине чврстих честица називају се активна површина, а сами процеси везивања молекула и јона на њој сорпционим процесима. Носиоци активне површине у земљишту су земљишни колоиди са димензијама мањим од 0,002 mm (слика 1.5). У минералне колоиде убрајају се минерали глине, оксиди алуминијума, гвожђа и силицијума, док се у органске колоиде убрајају хуминске киселине, а делимично и протеини.

У колоидну фракцију спадају честице земљишта, чији се пречник разликује од оног који је узет у колоидној хемији (0,1 μm) и износи мање од 0,2 μm . Као основа за ту промену служи адсорпциона способност честица земљишта различитог пречника, која се нагло повећава почев од 0,2 μm и мање. Земљишни колоиди су углавном заступљени у облику гела, а само незнатан њихов део налази се у земљишту у облику сола. Колоидна фракција, као и земљиште у целини састоји се из органског и минералног дела. Органска материја земљишта (хуминске киселине, фулвокиселине и хумини) је високог степена дисперзности. Може се узети да главна маса хумуса улази у састав пред колоидне и колоидне фракције, тј. има величину честица мању од 0,001 mm. Минерални део, који обично преовладава у саставу земљишних колоида, углавном се састоји од: а) секундарних минерала, који имају кристалну грађу, и б) аморфних материја. Од примарних минерала у колоидној фракцији у незнатној количини налазе се кварц и лискуни. У секундарне минерале кристалне грађе, који се налазе у саставу колоидне фракције земљишта, спадају глиновити минерали: групе хидролискуна (илити), групе монтморилонита, групе каолинита, а такође неглиновити минерали групе сесквиоксида. Највећи степен дисперзности од алумосиликатних минерала има група монтморилонита. У колоидној фракцији карбонатних земљишта и матичних супстрата налази се извесна количина калцијум карбоната. Аморфне материје колоидне фракције заступљене су хидроксидима гвожђа, алуминијума, силицијума, а такође производима њихових међусобних реакција (као што су

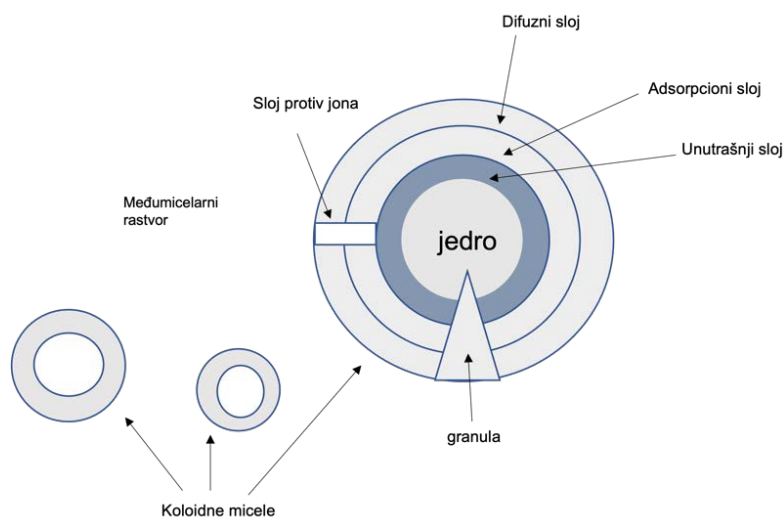
алофани). Колоидне честице земљишта имају електрични набој, који потиче од присуства јона на њиховој површини. Порекло набоја може бити двојако:

- (1) *адсорпција јона из раствора који окружује честице.* Површински јони чврстих честица због свог положаја разликују се од јона који се налази у унутрашњости честица. Док су код последњих, њихове везе потпуно засићене везама са јонима супротног знака из кристалне решетке који их окружују, дотле код јона који се налазе на површини, валентности су засићене само делимично. На рачун тих незасићених валентности могу се привлачити јони из околног раствора и тако се дограђује кристална решетка.)
- (2) *услед дисоцијације површинских молекула саме честице.* (У другом случају набој настаје услед дисоцијације молекула саме честице. Тако хуминска киселина, када дисосује H^+ јоне својих карбоксилних група, добија негативно наелектрисање (због остатка $-COO^-$), а H^+ јони образују око честица спољашњи дифузни слој. Аналогно настаје наелектрисање на површини честица силицијумове киселине, која такође отпушта H^+ јон при дисоцијацији.)

Грађа колодине мицеле обухвата (слика 1.5):

- (i) *Једро* које може бити изграђено од аморфних или кристалних материја.
- (ii) *Унутрашњег омотача* - слоја јона делимично дехидратисаних, који се налазе на површини честица и одређују знак њиховог наелектрисања
- (iii) *Слој адсорбованих јона* који чине супротно наелектрисани јони из раствора који су привучени некомпензованим набојем унутрашњег слоја.
- (iv) *Дифузни слој* јона чија дебљина се смањује са повећањем концентрације и валенце јона истог знака набоја у међумицеларном раствору. Од садржаја јона у овом слоју зависи величина некомпензованог електричног набоја колоидних честица, а тиме и њихово понашање у земљишту.

- (v) Колоидна честица у адсорбонавим молекулима воде и са двојним електричним слојем који је окружују чини колоидну мицелу.
- (vi) Једро мицеле, заједно са непокретним адсорпционим слојем, чини колоидну гранулу.



Слика 1.5. Шема колодине мицеле

Постоје две групе сорпционих процеса: **ансорпција** (привлачење компоненти у унутрашњост колоида у земљишту) и **адсорпција** (привлачење на површину колоида у земљишту). С обзиром да су колоиди у земљишту претежно негативног наелектрисања, они на себе адсорбују катјоне из земљишних раствора. Сам процес адсорпције је повратан и може се поновити више пута. Редослед адсорпције катјона зависи од њихове енергије односно афинитета адсорпције, која је условљена природом катјона. Редослед катјона према афинитету адсорпције у литератури је приказан следећим низом:

- (i) За алкалне метале: Cs^+ , Rb^+ , K^+ , Na^+ , Li^+
- (ii) За земноалкалне метале: Ba^{2+} , Sr^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+}

Изузетак је H^+ , који, и ако је једновалентан, умерено хидратише, лако се адсорбује и лако се десорбује. Катјони који се адсорбују на колоидну мицелу стоје у динамичкој равнотежи са одговарајућим катјонима у раствору. Ова равнотежа се може привремено нарушити и поново успоставити, уколико се на пример повећа или смањи концентрација

неког катјона у раствору. Према моћи супституције, катјони су поређани у следећи низ: $\text{Li}^+ < \text{H}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Rb}^+ < \text{Cs}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Sr}^{2+} < \text{Ba}^{2+}$

Равнотежа размене катјона варира и зависи од природе адсорбента и од природе адсорбованих јона. Капацитет адсорбције катјона по дефиницији представља укупан број адсорбованих катјона, при неутралној реакцији средине и изражава се у еквивалентима милимола H^+ /100 грама земљишта.

По сличном механизму тече и адсорпција анјона, с тим што се неки анјони као што су PO_4^{3-} и SO_4^{2-} могу адсорбовати и на специфичан начин, продирањем у унутрашњи слој мицеле где врше замену OH^- јона око централног металног јона (Fe^{3+} или Al^{3+}). Према афинитету адсорпције анјони се деле на три групе:

- (i) Анјони фосфорне (PO_4^{3-}), борне (BO_3^{3-}) и других органских лако адсорбујућих киселина
- (ii) Анјони као што су Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , који се не адсорбују и
- (iii) Анјони као што су SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} и SiO_3^{2-} код којих адсорпција зависи од услова средине

Адсорпционе особине земљишних колоида. Адсорпцијом се назива промена концентрације неке материје на граничној површини две фазе, која је условљена посебним особинама површинског слоја. На граничној површини могу да се адсорбују гасови, течности, а такође и материје растворене у течностима (електролити и неелектролити). Механичка својства земљишта утичу на његова адсорпциона својства. У глиновитим земљиштима, која садрже већу количину високодисперзних честица, адсорпција је изражена јаче, него у суглинастим, а у суглинастим јаче него у песковитим.

Земљиште (тј. његова чврста фаза) адсорбује: (i) гасове, (ii) течности, (iii) електролите и (iv) органске материје. Под сорптивном способношћу се подразумева способност земљишних колоида и земљишта да адсорбују и задржавају у порама и на површини земљишних честица гасове, молекуле, јоне или честице других колоида. Врсте сорпције: (i) *Механичка сорпција* – задржавање колоидних и суспендованих честица у шупљинама и порама; (ii) *Биолошка сорпција* – трансформација растворљивих материја у нерастворљиве у телу биљака и микоорганизама, (iii) *Физичка сорпција* – адсорпција – везивање молекула гасова или растворљивих једињења на површини колоидних честица под утицајем привлачних сила површинске енергије и (iv)

Физичко-хемијска сорпција – адсорпција – адсорпција јона из земљишног раствора на површини колоидних честица и њихова размена са јонима из раствора (електростатичко привлачење и van der Waals-ове силе; измена јона у еквивалентним односима). Сорптивне материје представљају честице колоидних димензија, огромна специфична активна површина и одговарајући набој. Носиоци сорптивних особина земљишта су:

- ▶ минерали глине који су кристалне грађе,
- ▶ хумусне (аморфне) материје,
- ▶ аморфни колоиди – хидратисани силицијумов гел, оксиди и хидроксида Al и Fe.

Сорпција означава појаву везивања неког састојка водене фазе на неку чврсту фазу. У зависности од типа и начина везивања постоје две врсте сорпције:

- (i) апсорпција – улажење материје у неки систем (нпр. у капиларне поре земљишта)
- (ii) адсорпција – привлачење материја на површину неког система

У земљишту постоје два типа граничне површине фаза:

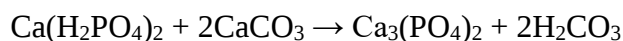
- (i) чврсто тело - гас (чврсте честице земљишта - земљишни ваздух) у случају када је земљиште суво
- (ii) чврсто тело - течност (чврсте честице земљишта - земљишни раствор), у случају влажног земљишта.

Адсорпција гасова. Разни гасови, који улазе у састав ваздуха, различито се адсорбују у земљишту, у зависности од природе и карактеристике гаса. Адсорпција гасова такође зависи од притиска и температуре — уколико је притисак гаса већи утолико се он јаче адсорбује, а уколико је температура већа утолико је адсорпција гаса мања. Гасове адсорбује суво земљиште. Адсорпција се састоји у кондензацији гаса у облику танке опне око колоидне честице. Адсорпција гаса се врши уз издвајање топлоте. Према способности адсорпције у земљишту гасови се могу сврстати у следећи редослед: $N_2 < O_2 < CO_2 < H_2O$ (водена пара). Хумусне материје и хидроксида гвожђа адсорбују гасове енергичније од честица другог хемијског састава. Адсорпција гасова се супротставља квашењу тј. адсорпцији течности, између њих постоји антагонизам.

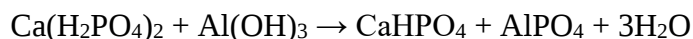
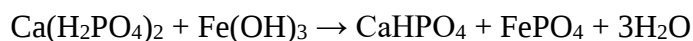
Адсорпција течности. Могућа је такође поларна незаменљива адсорпција: у том случају јон електролита, једнак по знаку набоја са колоидом (анјон OH^- - у случају негативних колоида), продире у слој који одређује потенцијал, а други јон у равнотежи са њим - у

компензациони слој. Све течности се не адсорбују подједнако у земљишту. Њих можемо разделити на течности које квасе и које не квасе. Појаву адсорпције течности прати карактеристично издвајање топлоте за ту течност, тзв. топлота квашења. Уколико течност боље кваси, утолико је већа њена топлота квашења.

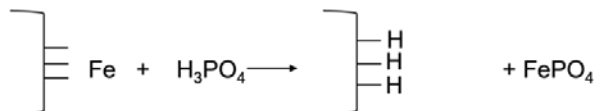
Хемијска сорпција. Према природи везе која се успоставља између сорбента и сорбата општа подела сорпције је на физичку и хемијску сорпцију. Пример за хемијску сорпцију јесте реакција где растворљиви монокалцијум-фосфат у карбонатним земљиштима прелази у тешко растворљиви трикалцијум-фосфат



или растворљиви монокалцијум-фосфат у киселим земљиштима прелази у нерастворљиви фери- одн., алуминијум-фосфат



реакција једињења из земљишног раствора и јона адсорбованих на површини колоида може се приказати следећом реакцијом:



Физичко-хемијска адсорпција. Јони спољашњег раствора улазе у састав двојног омотача колоидне честице. Најчешћи случај је изменљива адсорпција у слоју компензационих јона уз истовремено истискивање еквивалентне количине јона из тог слоја. При томе, негативни колоиди, који су највише заступљени у земљишту, адсорбују катјоне, а позитивни колоиди адсорбују анјоне. Појава физичко-хемијске - изменљиве адсорпције катјона игра главну улогу у процесу међусобних реакција између чврсте и течне фазе земљишта.

Јоноизмењивачке карактеристике земљишта се заснивају на присуству и особинама глине и органских компоненти. Настанак електричног набоја:

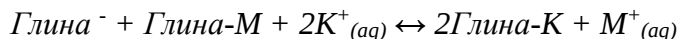
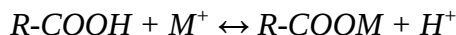
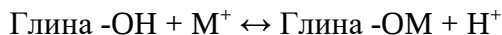
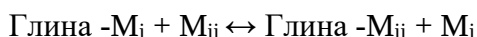
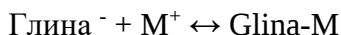
- перманентни – изоморфном разменом јона (Si се замени са Al-јоном или се Al замени Mg-јоном и добија се вишак негативног набоја)
- повремени – променом реакције средине, рН вредности (дисоцијација H-јона из OH групе глине или дисоцијацијом H-јона из COOH или фенолне OH групе хумусне материје)

Улога глина је доминантна - глине у којима су Si-јони делом замењени Al-јонима имају анјонски карактер, тако да при високим рН вредностима ОН-групе губе H⁺-јон, односно могу да га замене катјонима

Адсорпција катјона у земљишту. Улога глина је доминантна - глине у којима су Si-јони делом замењени Al-јонима имају анјонски карактер, тако да при високим рН вредностима ОН-групе губе H⁺-јон, односно могу да га замене катјонима. На исти начин делују и ОН-групе у органским једињењима. То је повратан процес, може се поновити безброј пута – једни катјони се десорбују, а други се адсорбују – брзина измене је велика и равнотежа се успоставља за неколико минута. Равнотежа размене зависи од природе земљишта (густине електричног набоја) и природе катјона (величина, хетеровалентност, распоред у дифузној слоју мицеле колоида и концентрација у раствору). Редослед према моћи супституције:



Реакције јонске измене теку по следећем механизму:



Равнотеже између катјона, јоноизмењивача и биљака стално се мењају – нпр. биљке троше K⁺, па се он зато стално ослобађа из глине, а на његово место долазе други катјони.

Капацитет адсорпције (размене) катјона представља укупан број адсорбованих катјона, при неутралној реакцији средине – изражава се у meq H⁺/100g земље. Битан је однос адсорбованих базних катјона, тзв. сума база S (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺) и адсорбованих водоникових јона Н. У киселим земљиштима могу бити присутни и Al³⁺ и Fe³⁺. Удео суме базних катјона у тоталном капацитету адсорпције *T* је дефинисан изразом:

$$V\% = S / T \times 100$$

Брзина катјонске измене. Процес размене врши се веома брзо (тренутно) у свим оним случајевима, када су катјони распоређени на спољним површинама честица, тј. при екстрамицеларној адсорпцији. Ако су пак катјони адсорбовани интрамицеларно у међуслојним

просторима минерала глине, или на површини честица сједињених у чврсте агрегате, тада за успостављање равнотеже реакције размене треба одређено време, некада и по неколико дана.

Фактори који утичу на реакцију размене:

- (1) Својства катјона. При реакцијама размене, адсорпција катјона из раствора у спољни слој колоидних честица врши се уз истовремено истискивање еквивалентне количине катјона из компензационог слоја у раствор. Способност за десорпцију, исто као и способност за адсорпцију, различита је за разне катјоне. Опште је правило да, уколико се јон јаче адсорбује, утолико се он теже мења. Једновалентни јони могу бити лакше замењени из адсорбованог стања него двовалентни, а последњи лакше од тровалентних. Већа валентност катјона значи и већу способност да се адсорбује, продре у компензациони слој негативних колоида. У једнаким условима једновалентни катјони у мањим количинама него двовалентни, а последњи у мањој количини од тровалентних: $M^+ < M^{2+} < M^{3+}$. Вишевалентни (дво- и тровалентни) јони граде са анјонима, који су највише заступљени у слоју који одређује потенцијал колоида (OH^- , COO^- , SiO_3^{2-} , AlO_2^-), једињења која мање дисосују, него једновалентни катјони, а реакција иде на страну образовања једињења која мање дисосују. Поред валентности јона овде, као и у случају адсорпције, игра одређену улогу величина хидратационог омотача јона. Уколико је већи хидратациони омотач катјона, утолико он лакше може бити истиснут. Способност замене једновалентних јона опада следећим редоследом: $Li > Na > NH_4 \geq K > H$, а двовалентних јона: $Mg > Ca$.
- (2) Својства адсорбента. Својства катјона (валентност, величина и хидратација) је одлучујућа за њихову сорптивност. Међутим, већи значај у адсорпцији јона имају хемијска природа и структура адсорбената.
- (3) Значај запремине и концентрације раствора. У природним условима постепено се врше промене у количини земљишног раствора (као последица влажења и сушења земљишта) и његовом саставу. Концентрација неких јона може се повећати под утицајем растварања или минерализације или при уношењу различитих материја у земљиште, а такође се може смањити услед усвајања јона од стране биљака и микроорганизама или услед испирања процедурним водама.

Мобилност размењивих катјона у земљишту. Поред укупног садржаја неког изменљивог катјона у земљишту велики значај има и мобилност катјона тј. њихова способност да прелазе у раствор. На пример, Mg у већини случајева лакше се замењује од Ca, Na – лакше од K и H. Међутим, један те исти јон (на пример Ca) у разним условима се десорбује различито. При постепеном излуживању земљишта, како у лабораторијским условима, тако и у природи, земљиште у почетку губи најпокретљивије - најлабавије везане јоне, а остатак тих јона се касније држи много јаче на колоидним честицама. Према томе, не само да су различито покретљиви адсорбовани катјони разних земљишта, већ и поједине фракције катјона једног истог земљишта имају различиту мобилност.

Незаменљива адсорпција (фиксација) катјона. Неразменљивој адсорпцији или фиксацији подлежу сви катјони, који се могу наћи у земљишном раствору, али највећу фиксациону способност имају K^+ и NH_4^+ , који се одликују блиским и доста већим јонским радијусима ($K - 0,133$ а, $NH_4^+ - 0,143$ nm) од других катјона у земљишту: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ (чији су радијуси $0,106$, $0,078$ и $0,098$ nm редом). Способност да фиксирају катјоне имају трослојни минерали глине са променљивим међуслојним растојањима - група хидролискуна и монтморилонита. Механизам фиксације катјона може се објаснити следећом хипотезом: катјони продиру у међуслојне просторе, када су они највећи (у стању бубрења) и заузимају хексагоналне празнине у мрежи кисеоничних атома тетраедарског слоја. При томе катјони привлаче ка себи оба негативно наелектрисана кисеонична слоја и као резултат тога они ће се наћи у затвореним просторима, који представљају сферу са приближним радијусом од $0,13 - 0,16$ nm. Фиксацији се могу подвргнути катјони, чији су радијуси блиски или незнатно већи од радијуса хексагоналних празнина, а такви су K^+ и NH_4^+ , а такође Rb^+ и Cs^+ са радијусима $0,14$, односно $0,165$ nm. Катјони чији су јонски радијуси мањи, као $Na^+ - 0,098$ и $Ca^{2+} - 0,106$ nm, распоређују се у хексагоналним празнинама не у центру, већ ближе ка једном од слојева, због чега не долази до чвршћег скупљања слојева.

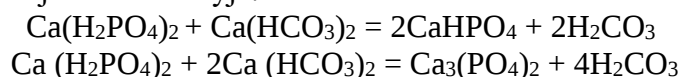
Адсорпција анјона. У неким земљиштима хидроксида Fe и Al су носиоци позитивног електричног наелектрисања док се на пример PO_4^{3-} и SO_4^{2-} могу везати и на други начина – заменом OH^- јона у хидроксидима Fe и Al у унутрашњости мицеле (иреверзибилно везивање). У зависности од већег броја фактора различити анјони се различито понашају. Нпр. анјони фосфорне, борне и неких органских киселина се лако адсорбују; хлориди, нитрати и нитрити се не адсорбују; сулфати, бикарбонати, карбонати и силикати се адсорбују или не,

зависно од датих услова где квалитативан састав адсорбованих јона утиче на хемијске особине земљишта – киселост, алкалитет, реакцију средине, пуферну способност). Адсорпција анјона у земљишту зависи од неколико фактора:

а) својства анјона - по растућој способности за адсорпцију добија се следећи ред: $\text{Cl}^- = \text{NO}_3^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{PO}_4^{3-} < \text{OH}^-$. Што је већа валентност анјона, утолико је већа њихова способност да се адсорбују на површини колоида. Изузетак чине само OH^- јон, који има највећу активност без обзира на малу валентност.

б) састав земљишних колоида и њихова електрокинетичка својства - са повећањем количине сесквиоксида (базоида) у саставу земљишних колоида, повећава се адсорптивна способност земљишта за анјоне.

в) реакција средине (рН) - промена реакције средине повлачи и промену потенцијала колоида, алкализација повећава негативан потенцијал, а закишељавање позитивни. Отуда произилази да кисела средина погодује већој адсорпцији анјона, и обрнуто, у алкалној средини адсорпција анјона се смањује.



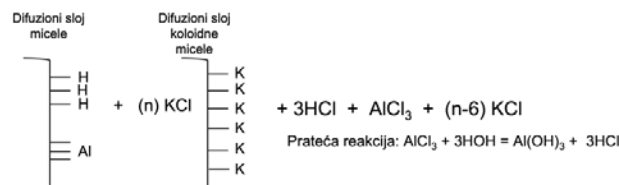
У земљиштима киселе реакције трансформација фосфата може бити везана за образовање слабо растворљивих једињења фосфора са јонима гвожђа, алуминијума и мангана, који су веома активни у таквим условима средине. На тај начин, фосфат се задржава у земљиштима богатим гвожђем и алуминијумом. Уколико фосфат замени молекуле воде из хидратисаних оксида, онда фосфат повећава негативно наелектрисање минерала.

У процесу физичко-хемијске адсорпције фосфата у земљишту учествују како аморфни колоиди (њихов базоидни део - сесквиоксиди), тако и кристалне творевине хидроксида гвожђа и алуминијума, као и минерали глине. Механизам изменљиве адсорпције фосфат-јона на површини позитивно наелектрисаних колоида састоји се у томе, што се фосфатни јони замењују јонима компензационог слоја, одакле и сами могу бити замењени активним јонима као што су арсенат, цитрат, тартарат, силикат и OH^- јони.

Закишељавање средине повећава активност базоида, што проузрокује повећану адсорпцију фосфата. Из тог разлога је ова појава интензивније изражена у киселим земљиштима.

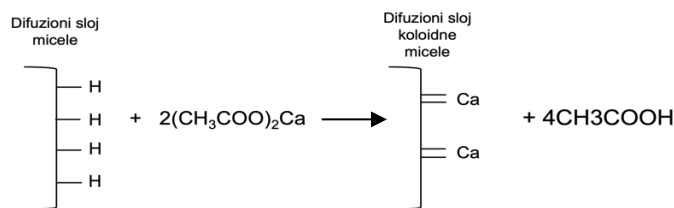
Киселост земљишта. Реакција земљишта (рН) је по дефиницији негативно декадни логаритам концентрације водоникових јона (H^+) и

говори о степену киселости земљишта. Постоје два основна типа киселости земљишта: *активна киселост* која је проузрокована слободним H^+ јонима и дефинише се као киселост течне фазе и *потенцијална киселост* (киселост чврсте фазе земљишта) која обухвата две подврсте киселости, које се међусобно разликују по јачини адсорпције и десорпције H^+ и Al^{3+} јона од стране чврсте фазе (супституциона и хидролитичка киселост). Механизам супституционе киселости приказан је реакцијама датим у наставку текста. Ова киселост је дефинисана H^+ и Al^{3+} јонима који су лабавије везани у дифузној слоју и подлежу брзој размени са базним катјонима. Шематски приказ размене H^+ јона супституционе киселости дат је приказом:



Ова реакција води настанку HCl , која као јака киселина подлеже дисоцијацији и њени H^+ јони теже да се врате у адсорбовани облик. Захваљујући томе, успоставља се равнотежа између адсорбованих и слободних H^+ јона у раствору.

Хидролитичка киселост представља укупну киселост земљишта условљену адсорбованим H^+ и Al^{3+} јонима који су лабавије и јаче везани у дифузној слоју колоидне мицеле. Као резултат ове реакције настаје слаба киселина – сирћетна киселина (CH_3COOH), која слабо дисоцира и као последица долази до неутрализације земљишта и потпуније размене адсорбованих H^+ јона. Шематски приказ размене H^+ јона хидролитичке киселости дат је приказом:

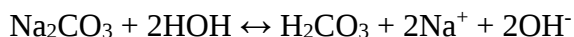


Калцификација земљишта. Средства на бази креча (CaO , $CaCO_3$, $Ca(OH)_2$) повољно утичу на смањење киселости земљишта и имају позитивне ефекте како на физичке, тако и на хемијске и микробиолошке карактеристике земљишта. Уношењем креча у земљиште долази до растварања на јоне калцијума, бикарбоната и хидроксидне јоне. OH^- јони неутралишу земљишну киселост везујући H^+ јоне и формирајући на тај начин H_2O . Тиме се смањује концентрација H^+ јона уз

истовремено повећање вредности pH. Приликом извођења калцификације за ефективност је битна и величина честица тј. степен уситњености примењеног материјала. Добра уситњеност омогућује боље растварање и тиме бољи ефекат калцификације. Применом кречног материјала са крупним честицама не постиже се задовољавајући ефекат обзиром да се исте теже и спорије растварају (понекад је потребан период од неколико година до њиховог потпуног растварања).

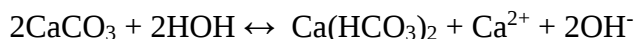
Алкалитет земљишта. Главни узроци настанка алкалитета јесу водорастворне соли натријума (карбонати, хидрогенкарбонати, хлориди, сулфати, итд). Аналогно киселости земљишта и алкалитет земљишта се дели у две групе:

- (i) Активни алкалитет који настаје накупљањем OH^- јона у земљишном раствору условљавајући pH вредност изнад 9 по следећој реакцији:



- (ii) Потенцијални алкалитет који је условљен адсорбованим Na^+ јонима чија се количина изражава у еквивалентима милимола $\text{H}^+/100\text{g}$ земљишта. Хидролиза Na-колоидног комплекса даје NaOH која својим OH^- јонима даје врло јаку алкалну реакцију са pH изнад 10.

Алкалитет у карбонатним земљиштима. Алкалитет у карбонатним земљиштима условљен је хидролизом калцијум карбоната по следећој реакцији. Добијена pH вредност таквих земљишта је од 7,5-8,5.



У случају хидролизе магнезијум карбоната pH вредност се креће изнад 8,5. Алкална реакција земљишта може бити ублажена уколико је присутан CO_2 и то по реакцији $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ при чему се због настанка калцијум хидрогенкарбоната pH вредност одржава на око 8.

1.5.3. Хемијска својства течне фазе земљишта

Најдинамичнији, најпроменљивији и најактивнији део земљишта представља његова течна фаза. У хемијском погледу за земљишни

раствор су од посебног значаја следеће карактеристике: концентрација и састав, реакција средине, пуферна способност и оксидоредукциони потенцијал. Концентрација земљишног раствора варира у веома широком опсегу и зависи од: механичког састава земљишта, адсорптивне способности, хемијског распадања, влаге у земљишту и његове биолошке активности.

Састав земљишног раствора је такође врло променљив и подложен варијацијама у широком опсегу. У земљишним растворима се налазе колодине, молекуларне и јонске честице; катјони и анјони разних водорастворних соли, киселина и база, као и растворени гасови. Од састојака су од највећег интереса биогени елементи присутни у земљишту: катјони (Ca^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} и др) и анјони (NO_2^- , NO_3^- , HCO_3^- , итд).

Земљишта са променљивим наелектрисањем. Један од најважнијих хемијских и физиолошких карактеристика течне фазе земљишта јесте реакција земљишног раствора. Мобилизација и транспорт појединих катјона у земљишту зависи од електропроводљивости и рН услова. Ова карактеристика дефинише се као однос водоникових H^+ и хидроксилних OH^- јона у раствору и суспензији земљишта.

Оксидо редукциони потенцијал. Редокс потенцијал земљишта (E_h) представља његову способност да прими или преда електроне и значајан је показатељ еколошких услова земљишта, првенствено његовог водног режима (где повољни водно-ваздушни услови условљавају аерацију и присуство кисеоника, док вишак влажности и стагнација воде истискује кисеоник, што доводи до пада рекос потенцијала и долази до редукције нитрата, фосфата, сулфата). Редокс потенцијал утиче на биохемијске процесе трансформације органских материја. E_h varira od -300 do +850 mV ($E_h < +250$ mV – слаба аерација и редукциони услови и $E_h > +500$ mV – јака аерација, оксидациони услови, ниска влажност). Оксидациони-редукциони (редокс) процеси у земљишту су делом биолошки, а делом хемијски. По дефиницији оксидација представља процес отпуштања електрона, односно примања кисеоника или отпуштања водоника. Редукционо средство је компонента која даје електроне оксидује се. Редукција је процес примања електрона, односно процес отпуштања кисеоника или примања водоника. Оксидационо средство је компонента која прима електроне, тј. редукује се. За одвијање оксидације или редукције мора постојати разлика у

потенцијалу, која одређује правац реакције. Тај електрични потенцијал се мери у милivolтима (mV), а назива се редокс потенцијал. На редокс потенцијал у земљишту највише утичу елементи чија се валенца лако мења (Fe, Mn, Cu, итд), а виша валенца (оксидовани облик) повећава Eh и обрнуто, док присуство свеже органске материје, H₂S, PH₃, CH₄ јако снижавају Eh. Генерално, величина Eh зависи од реакције земљишта те концентрацији оксидујућих и редукујућих компоненти у раствору земљишта и може да се представи изразом:

$$rH = \frac{Eh}{28,9} + 2 \times pH$$

rH = негативан логаритам притиска H⁺ (редукциона моћ земљишта)

28,9 = Нернстова константа

Eh вредности су индикатор процеса који се одвијају у земљишту: (i) прво се редукују нитрати и Mn⁴⁺- оксиди, након тога (Eh = 200-300 mV) фери-спојеви се редукују у фери-спојеве (сиво зелена боја), потом следи редукција сулфата до H₂S (сива и сивоцрна боја од FeS и FeS₂). У земљиштима с доминантним анаеробним условима (субаквална) долази до редукције CO₂ (CH₄ и др. токсични гасови).

1.6. Биолошка својства земљишта

У земљишту живи велики број различитих врста организама, и оно представља место њиховог раста и развоја. Земљишне компоненте имају способност фотосинтезе, респирације и репродукције, што овом систему даје особине динамичности. У њему се одвија велики број физичких, хемијских и биохемијских процеса који омогућавају кружење материје и енергије у природи. Иако биота земљишта, која укључује живи корен и организме у земљишту, заузима веома мали део од укупне запремине земљишта (<0,5%), има огроман утицај на својства земљишта и процесе у земљишту. Међутим, земљишни организми су обично најактивнији у површинском земљишту на дубини од 0–15 cm, јер ова зона има акумулацију органске и доступне хранљиве материје. Дубина тла, органска материје и садржај хранљивих материја, микроклима и физичко-хемијско услови у околини посматраног земљишта утичу на структуру и функцију биоте земљишта. Корење биљака и ризосфера у земљишту представљају јединствену еколошку нишу. Корење биљака има улогу адсорпције и складиштења воде, али и

хранљивих материја потребних за физиолошки раст и развој биљака. Захваљујући кореновом систему хранљиве материје могу да се транспортују из дубљих слојева на површину. По правилу, биљке са експанзивним кореновим системом имају већу способност да адсорбују воду, кисеоник и хранљиве материје из земљишта. Дубина и запремина земљишта коју заузима корење зависе од биљних врста и услова земљишта. Корени већине ратарских биљака су ограничени на око 0–15 cm дубине земљишта, док корен дрвета може бити и на већим дубинама. Најважнија еколошка функција коју корен обавља је модулација биолошке активности у земљиштима у њиховој близини. Фино и мало корење (<5 mm) и грубо корење (>5 mm) су две главне компоненте подземне биомасе. Корени дишу, и сматрају се главним изворима угљен-диоксида у земљишту. Део угљеника фиксиран у листовима током фотосинтезе се преноси до корена преко флоема и уноси се у земљиште као мешавина растворљивих и нерастворљивих супстанци. Овај процес је познат као ризодепозиција. Ризодепозиција доноси велику количину угљеника и хранљиве материје (до 10-25% угљеника фиксираних фотосинтезом и 30–40% фотосинтата транслоцираних до корена). Ризодепозиција ослобађа неколико супстанци у зону корена, укључујући ексудате растворљиве у води, једињења мале молекулске тежине излужена из корена без метаболичке контроле од стране биљке; секрета нискомолекуларних једињења која се ослобађају метаболичким процесима; и слузи које луче Голџијев апарат у капици корена, хидролизати полисахарида примарног ћелијског зида и ољуштене ћелије капице корена, слуз коју лучи епидерм ћелије и коренске длаке, као и оне настале разградњом бактерија мртвих ћелија епидерма. Ризодепозиција такође укључује муцигел, желатинасти материјал на површини корена, као и лизате и ољуштене ћелије из епидермиса и кортекса корена. Корени биљака имају огроман утицај на популацију и функције земљишних организама. Активности флоре и фауне земљишта на површини корена (ризоплан) и у ризосфери (око корена) се разликују од других зона тла. Ризоплански микроорганизми могу имати утицаја на раст и развој биљака. Постоје неке бактерије које насељавају ризоплан и подстичу раст биљака. Такве бактерије носе назив „бактерије које промовишу раст“ (енг. *plant growth-promoting bacteria (PGPB)*) и у њих спадају следеће врсте: *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Burkholderia*, *Bacillus* и *Serratia*. Такође, површине корена у мицелијском стању често насељавају гљиве и то претежно следећи родови: *Mortierella*, *Cephalosporium*, *Trichoderma*, *Penicillium*, *Gliocladium*, *Gliomastix*, *Fusarium*, *Cylindrocarpon*, *Botrytis*, *Coniothyrium*, *Mucor*, *Phoma*, *Pythium* и *Aspergillus*. Немачки научник Хилтнер увео је 1904. године термин

„ризосфера“ за означавање тог региона тла који је под утицајем корена биљака. Ризосферу карактерише већа микробиолошка и фаунистичка активност у односу на земљиште које је далеко од корена биљака. Не само да је популација микроорганизама већа у делу ризосфере, већ су и врсте организама и њихове потребе за метаболитима различите. Степен метаболичке активности микроорганизама ризосфере је већи од оне из неризосферног земљишта. Ту је, међутим, тешко направити оштро разграничење у пољу између ризосфере и неризосферне зоне земљишта. Зона ризосфере може бити ширине неколико милиметара, али нема јасне границе. То је област интензивне биолошке и хемијске активности под утицајем једињења која излучује корен и микроорганизмима који се хране овим једињењима. Корени биљака продукују велики број биохемијских једињења као што су аминокиселине, друге органске киселине, угљени хидрати, шећери, витамини, слуз (полисахариди), протеини, флавоноиди, ензими, цијановодонична киселина, гликозиди, ауксини и сапонини. Неке од ових супстанци служе као храна, други имају утицај на раст микроорганизама или имају инхибиторно дејство на микроорганизме. Међутим, микроорганизми минерализују органску материју и доносе друге трансформације које повећавају доступност хранљивих материја за биљке. Ексудати корена стимулишу раст многих бактерија, укључујући фиксаторе азота из рода *Azotobacter*, *Azospirillum* и *Azoarcus*, симбиотски фиксатори азота род *Rhizobium* и неколико других бактерија и гљивица, укључујући микоризне гљиве. Све ове активности чине ризосферу најдинамичнијом средином у земљишту. Према неколико процена, популација бактерија, гљива и актиномицета у ризосфери је пет до десет пута већа у односу на неризосферни део земљишта. Популација алги може бити бројнија у зони неризосфере. Веома сложене хемијске, физичке и биолошке интеракције настају између корена и земљишта у његовој околини. Ове интеракције укључују корен–корен, корен–инсект и интеракције корен–микроб, и могу бити позитивне или негативне. Позитивне интеракције укључују симбиотске асоцијације са бактеријама и микоризним гљивама и колонизацију корена бактеријама које подстичу раст биљака, РГРВ бактеријама. Негативне интеракције укључују такмичење или паразитизам међу биљкама, патогеним бактеријама или гљивама, и бескичмењацима хербиворима. Поред тога, бројна фитотоксична једињења у корену биљке идентификовани су као ексудати, укључујући 7,8-бензофлавоон, катехин, југлон, 8- хидроксиквинолин, сорголеон и 5,7,4'- трихидрокси -3',5'- диметоксифлавоон.

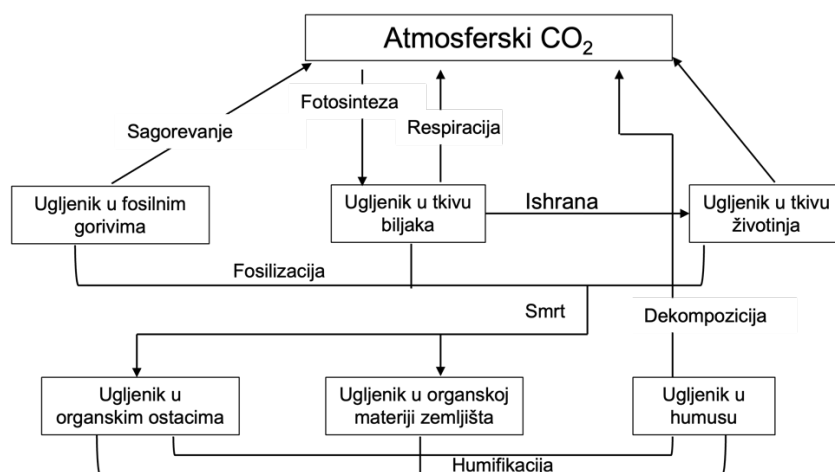
Организми у земљишту укључују макро- и микрофлору и фауну. У земљишту живи велики број микроорганизама: бактерије, гљиве, алге, протозое, вируси и лишајеви. Њихова бројност се креће од неколико десетина до неколико милиона по граму узорка земљишта. Организми у земљишту су класификовани на много различитих начина. Конвенционално се деле на флору и фауну. Осим корена биљака, друга важна компонента флоре земљишта је микрофлора. Фауна земљишта се даље дели на микрофауну (дужина тела $<0,1\text{ mm}$), мезофауна (дужина тела $0,1\text{--}2,0\text{ mm}$) и макрофауна (дужина тела $>2\text{ mm}$) на основу њихових величине. Примери ових категорија су следећи: (i) микрофлора - бактерије, алге, гљиве; (ii) микрофауна - протозое и неке нематодe; (iii) мезофауна - микроартропода и енхитреиде; и (iv) макрофауна - кишне глисте, термити и стоноге.

Фауна земљишта укључује главне хетеротрофе у системима земљишта; неки од њих су биљоједи који се хране коренима биљака, али већина живи од мртве биљне материје, микроба или обоје. Други су месождери, паразити или предатори. То укључује облике живота који живе, део или цео свој живот, у земљишту. Бубамара је пролазна врста која хибернира у земљишту, али живи у биљном слоју; комарци живе изнад земље, али полажу јаја у земљу и њима се хране ларве разграђујући органске остатке. Црви су привремени становници земљишта, њихове ларве се хране садницама биљака. Са друге стране постоје стални становници тла као што су скокуни (*Collembola*). Микрофауна (протозое, мале нематодe) насељавају водене слојеве. Мезофауна насељава просторе пора испуњених ваздухом. Макрофауна прави своје сопствене просторе кроз своје активности копања и попут мегафауне, могу имати велике утицаје на бруто структуру земљишта. Глисте, термити и мрави мењају физичку структуру земљишта, утичући на проток хранљивих материја и енергије, они су „инжењери екосистема“.

1.7. Биогеохемијски циклуси – кружење угљеника, азота, фосфора и сумпора

Кружење угљеника. Угљеник се у природи налази у облику органских и неорганских једињења (слика 1.6). Најчешћи неоргански облик угљеника је CO_2 у атмосфери или у облику карбоната и њихових јона CO_3^{2-} и HCO_3^- у земљишту. У органском облику се може наћи у угљеним хидратима, протеинима, липидима, лигнину и пектину. Угљеник се налази као CO_2 у атмосфери (2%), као биомаса у копненим биљкама и земљишту (5%), заробљен у фосилним горивима (8%), и око 85%

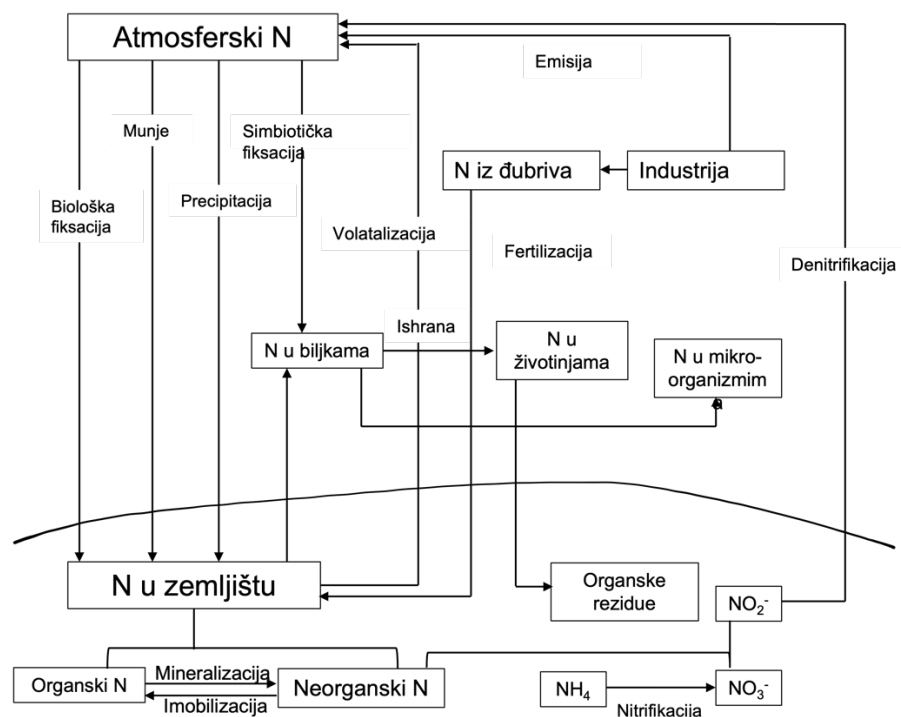
угљеника се налази у облику јона у океанима и морима. У копненим екосистемима, главна складишта угљеника су надземна биомаса и земљиште укључујући корење биљака. У земљишту се налази корење биљака са микробном биомасом и мезо- и макрофауном. Компоненту органске материје земљишта чине мртви остаци променљивог степена распадања у распону од препознатљивих биљних и животињских остатака до високо стабилних хумусних једињења. Угљеник је распоређен у различитим хоризонтима земљишта кроз одложен отпад, одумирање и разлагање корена, испирање и ексудацију. Примарни произвођачи укључујући биљке и аутотрофне микроорганизме фиксирају атмосферски CO_2 процесом фотосинтезе. Животиње конзумирају биљке и друге животиње које се налазе испод њих у ланцу исхране, а истовремено изумирање биљног и животињског света води ка повећању садржаја угљеника у земљишту услед њиховог таложења. Микроорганизми добијају енергију за раст и развој захваљујући присутној сложеној органској материји. Услед процеса разлагања органски комбиновани N, P и S појављују се као NH_4^+ , H_2PO_4^- и SO_4^{2-} јона, а значајна количина C се ослобађа као CO_2 . Остатак супстрата C који користе микроорганизми се уграђује у микробну биомасу, заједно са променљивим уделом других есенцијалних елемената као што су N, P и S. Ова инкорпорација чини ове елементе недоступним за раст биљака све док организми умиру и пропадају; па се процес зове имобилизација.



Слика 1.6. Циклус кружења угљеника

Током разлагања органских остатака, акумулирају се непожељне супстанце и неки нови комплекси органских једињења се синтетишу од стране микроорганизама. Комплексирањем ових супстанци са минералном материјом земљишта настаје хумус. Дакле, важни процеси у земљишту за циклус угљеника су имобилизација, минерализација и декомпозиција. Поред тога, хумификација је пратећи процес декомпозиције и ресинтезе којом се стабилизоване хумусне материје производе у земљишту.

Кружење азота. Атмосфера, као главни извор азота, садржи око 78% азота у мешавини гасова који се називају ваздух. Из атмосфере се нешто азота уноси у земљиште атмосферском фиксацијом и таложењем са падавинама (слика 1.7). Велика количина азота у земљиште доспева из индустрије која се бави производњом ђубрива које се додаје у земљиште за повећање производње усева.

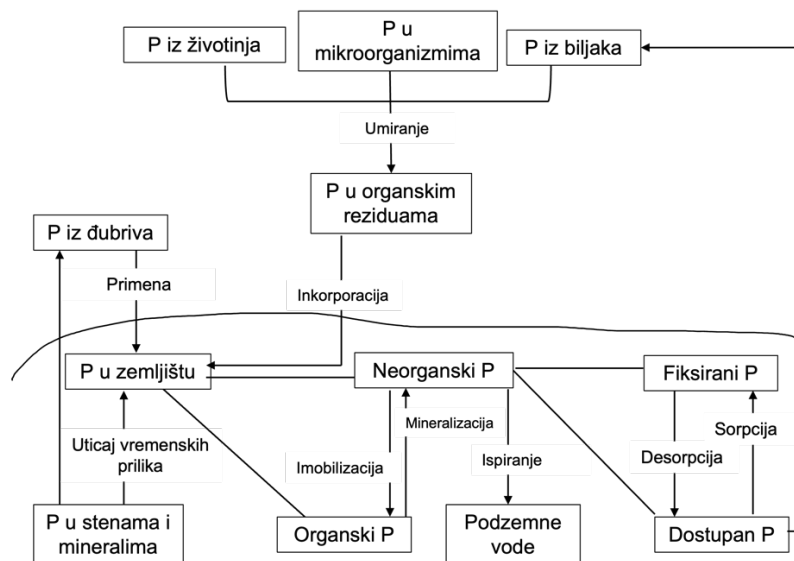


Слика 1.7. Циклус кружења азота

Додатно азот у земљишту користе биљке за раст и развој, тј. производњу аминокиселина, протеина, нуклеинских киселина и нуклеопотеина. Животиње добијају протеине из биљака и других животиња. Неки микроорганизми, такође, имају способност коришћења азота из

атмосфере. Ово се зове биолошка фиксација азота. Биљке и животињски остаци (измет, антропогени отпад, остаци усева и мртви организми) враћају значајан део азота у земљиште као органски азот. Органски азот се минерализује у неоргански азот, NH_3 . Амонијак се процесом нитрификације претвара у NO_3^- . Део амонијака испарава, а део и нитрата се денитрификује и поново ослобађа у атмосферу. Генерално, главни биолошки процеси циклуса кружења азота су минерализација, имобилизација, нитрификација, азот фиксација и денитрификација.

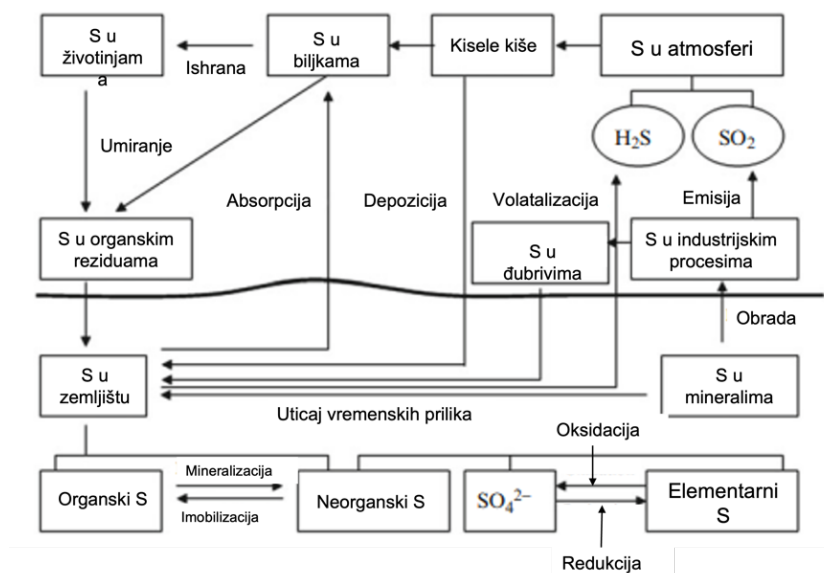
Кружење фосфора. Циклус фосфора у земљишту приказан је на слици 1.8. У току циклуса кружења, у земљишту, фосфор се трансформише укључујући интерконверзије три неорганска облика фосфора: (i) расположиви Р; (ii) адсорбовани Р на органским и на неорганским колоидима, или преципитован са другим јонима или једињењима и (iii) примарни минерал Р. Такође, органски фосфор је минерализован у неоргански фосфор, а неоргански Р је имобилизован у органски Р. Примарни извор фосфора у земљишту је минерал апатит, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$. Расположиви Р се адсорбује из земљишта од стране биљака и микроорганизама услед њихове физиолошке активности. На овај начин, растворљиви неоргански Р се претвара у органска једињења фосфата и уграђује у ткива биљака и микроорганизама. Овај процес је познат као имобилизација фосфора. Животиње добијају фосфор кроз ланац исхране. Након смрти ових организама, органски фосфат се додаје земљиштима у облику њихових остатака. Разлагањем органске материје, Р се ослобађа у земљиште у неорганским облицима. Ово се зове минерализација фосфора. Минерализовани Р може поново да се адсорбује или исталожи, адсорбује од стране биљака и микроорганизама, или део може бити испран у подземне воде.



Слика 1.8. Циклус кружења фосфора

Дакле, циклус кружења фосфора карактеришу процеси преципитација, минерализација, имобилизација, адсорпција и десорпција. Временске прилике, минерализација и десорпција повећавају садржај доступног Р за усвајање од стране биљака, док га имобилизација, преципитација и адсорпција смањују. Међу овим процесима, солубилизација фосфора, минерализација и имобилизација су биолошки посредовани.

Кружење сумпора. Земљишта садрже неколико валентних стања сумпора, у распону од -2 (као код сумпора и редукованог органског сумпора) до $+6$ (сулфат). Неки примарни и секундарни минерали као нпр. пирит (FeS_2) и гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) су извори сумпора у земљишту. Минерали сулфата или сулфида се хемијски и биолошки трансформишу у сулфат SO_4^{2-} у земљишту. Овај SO_4^{2-} јон је доступан за усвајање од стране биљака. Сулфат такође могу да адсорбују микроорганизми за своје физиолошке потребе и тај процес је познат као имобилизација сумпора (слика 1.9). Ови организми редукују SO_4^{2-} до $-\text{SH}$ групе кроз асимилациони процес. Микроорганизми и биљке производе неке аминокиселине и протеине који садрже сумпор.



Слика 1.9. Циклус кружења сумпора

Након изумирања и угинућа биљног и животињског света, као и микроорганизама, земљишту се додаје органски сумпор. Одређени микроорганизми разлажу и минерализују органски сумпор у H_2S , који се оксидује у сулфат, док неки имају способност оксидације минерала пирита уз производњу оксида сумпора, сулфата и сумпорне киселине, али и редукције сулфата у елементарни S, H_2S и FeS_2 . Нешто сумпора се ослобађа као оксиди сумпора у атмосферу из индустрије и возила преко сагоревања фосилних горива. Ови оксиди могу да реагују са молекулима воде, где настаје киселина, а затим и вода као таква пада на земљу у облику киселих киша. Дакле, важни процеси циклуса сумпора су имобилизација, минерализација, оксидација и редукција.

2. Класификација земљишта

Eswaran и сар. (1999) дефинисали су девет класа квалитета земљишта. Они су користили мапу света главних региона земљишта *"Major Soils Regions of the World Map"* и информације са 16.000 профила. Идентификоване су три класе земљишта на основу плодности (ниске, средње и високе) и три класе на основу флексибилности/отпорности земљишта (ниска, средња и висока). Њиховом комбинацијом, на глобалном нивоу данас постоји девет класа квалитета земљишта. Ове класе дефинишу квалитет, флексибилност/отпорност и плодност земљишта као следеће:

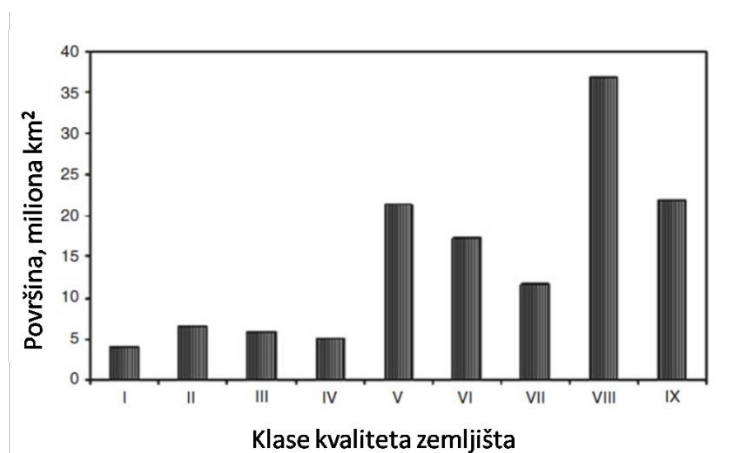
Квалитет земљишта: Способност земљишта да обавља своју функцију одрживе пољопривредне производње што јој омогућава да одговори на одрживо управљање земљиштем.

Флексибилност/отпорност земљишта: Способност земљишта да се врати у првобитни ниво производње након што се деградира нпр. лошим управљањем. Земљиште са ниском флексибилношћу је трајно оштећено деградацијом.

Плодност земљишта: Способност земљишта за производњу (изражено по приносу житарица или биомасе) при умереним условима уноса ђубрива и пестицида.

Земљишта класе I или примарна земљишта се налазе у Сједињеним Америчким Државама, Аргентини, Уругвају, јужном Бразилу, Европи, северној Кини и јужној Африци. Таквих земљишта нема у тропским пределима. Тропска земљишта (*Oxisols*, *Ultisols*, *Alfisols*, *Entisols*, *Inceptisols*, *Vertisols*) су углавном мале продуктивности. Земљишта класе II и III су распрострањена у тропским пределима и у континенталним пределима. Већина ових земљишта се наводњава и користи у пољопривредне сврхе у семиаридним делова. Само око 3% копнене површине литосфере може се посматрати као примарна или I класа земљишта. Других 8% копнене површине литосфере чине класу II и III земљишта. Велики део земљишта IV, V и VI класе, а посебно земљишта класе V налазе се у тропским пределима. У басену Амазона,

централне Африке и југоисточне Азије ови облици земљишта настањују шуме. Земљишта класе IV, V и VI заузимају значајан део земљине површине (36,8 милиона квадратних метара) и такође настањена су са више од 50% светске популације. Класом IV или непродуктивном класом земљишта се може управљати са великим уносом хемикалија како би ова земљишта била плоднија. Гледано са тачке одрживости, класе VII, VIII и IX нису погодне за пољопривреду. На глобалном нивоу се процењује да је површина земљишта погодна за даљу обраду око 60,2 милиона km^2 . До 1995. год. процењено је да је култивисано око 49,77 милиона km^2 . Ово сугерише да је површина укупно доступног земљишта само око 10 милиона km^2 за даљу обраду, пошумљавање и другу употребу. Проценат обрадиве површине земљишта у Азији, Африци, Северној и Јужној Америци и Европи су 15,2; 6,3; 6,0; 13,0 и 6,0%, редом, док су површине под пашњацима у наведеним регионима 20; 22; 14; 8 и 23%. Површине земљишта различитих класа приказане су на *слици 2.1*, док је сумарни преглед својстава различитих класа квалитета земљишта приказан у *табели 2.1*.



Слика 2.1 Различите класе земљишта и површине које заузимају

Табела 2.1 Класе квалитета и својства земљишта према Eswaran и сар. (1999)

Класе квалитета земљишта	Карактеристике
I	Високо квалитетно и високо продуктивно земљиште са мало ограничења. Температура и влажност земљишта су идеални за једногодишње усеве. Управљање земљиштем састоји се углавном од разумне праксе конзервације како би се минимизирала ерозија, прикладног ђубрења и коришћења најбољих доступних материјала. Ризик за одрживу производњу житарица је углавном <20%.
II и III	Ова земљишта су квалитетна и генерално имају мало проблема за одрживу производњу. За ова земљишта мора се посебно водити рачуна како би се смањила могућа деградација, посебно за земљиште II класе. Нижа флексибилност ових земљишта посебно за II класу чини их ризичнијим, посебно за производњу житарица у условима нискоуносне пољопривреде. Међутим, њихова продуктивност је генерално висока, а самим тим и лакше управљање. Конзерваторска обрада земљишта је од суштинске важности, обично је потребно одржавање вегетације у циљу одржавања потребних својства земљишта, а употреба ђубрива мора бити контролисана. Због релативно добрих теренских услова, земљиште је погодно за националне паркове и зоне биодиверзитета. Ризик за одрживу производњу житарица је обично 20–40%, али се ризици могу смањити добром праксом управљања.
IV, V, VI	Ова земљишта се не би требала користити за узгајање житарица. Све три класе захтевају значајно уношење хемикалија за конзерваторско управљање. У ствари, не сме да постоји ниједна производња житарица на овом замишљу уколико не постоји добар план управљања. Деградација земљишта мора бити континуирано праћена. Продуктивност није висока, тако да пољопривредници који обрађују ова земљишта морају добити значајну подршку за управљање. Земљиште се такође може користити за националне паркове или као зоне биодиверзитета. Ризик за одрживу производњу житарица је 40–60%.
VII	Ова земљишта се могу користити за производњу житарица само ако постоји стварна потреба. Оваква земљишта нису погодна за гајење житарица у условима нискоуносне пољопривреде; њихова мала отпорност/флексибилност чини их лако подложнима деградацији. Најбоље је пошумљавање оваквих земљишта или њихова употреба у рекреативне сврхе. Као и за V и VI класу, управљање биодиверзитетом је пресудно за ове области. Ризик за одрживу производњу житарица је 60–80%.
VIII, IX	Земљишта која припадају врло нестабилним екосистемима или су врло неекономична када је у питању њихова употреба за производњу житарица. Треба их одржавати у природном стању. Неке области се могу користити у рекреативне сврхе, али под благо контролисаним условима. У класи IX, која се углавном налази у хладним климатским подручјима, сеча дрвећа мора бити обављена врло пажљиво са великом пажњом од оштећења даљег екосистема. Класа VIII углавном заузима пустињске области. Ризик за одрживу производњу житарица је > 80%.

2.1. Принципи светске референтне основе за земљишта

Word reference base for soil resources (WRB) је међународни систем класификације земљишта прихваћен у свету. Омогућава упоређивање различитих националних класификација и боље разумевање стручњака из области науке о земљишту, у циљу управљања и заштите земљишног простора и животне средине на глобалном нивоу.

Рад на светској класификацији земљишта започет је седамдесетих година прошлог века, када је урађена легенда карте света. Потом је 1998. године завршена радна верзија WRB класификације, прихваћена од стране Међународног педолошког друштва на 16. конгресу. Настављен је рад и 2006. године издата знатно измењена верзија WRB (IUSS, FAO, ISRIC), а потом и најновија верзија WRB 2022 (*IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria*).

С обзиром на значај и потребу за информацијама о корелацији националних класификација у односу на WRB, и стално унапређивање светске класификације, неопходно је континуирано истраживање и усклађивање ових класификација.

У последњих 50 година многе земље изградиле су своје националне класификационе системе који су произашли из различитих педолошких школа или су издиференцирани зависно од природних услова региона за који су намењени.

Различити принципи и системи класификације земљишта који се примењују у свету континуирано се усавршавају и допуњују. Нове класификације које се развијају у појединим земљама ослањају се у већој или мањој мери на амерички класификациони систем „*Soil Taxonomy*“ који је добио своју завршну форму у публикацији изашлој 1975. године. Овај систем је већ у току припреме снажно утицао на готово све системе класификације земљишта који су постојали. У многим земљама прихваћен је у целини. Један од неопходних предуслова за ефикасну интеграцију светских напора у рационалном коришћењу и заштити светских земљишних ресурса је постојање јединствене класификације земљишта. Прве расправе о потреби заједничке терминологије и документације за светску класификацију

земљишта започете су на конгресу Међународног друштва за проучавање земљишта, који је одржан 1978. године у Едмонтону у Канади. Покренута је акција за креирање једне референтне базе за класификацију земљишта, која би омогућила корелацију између постојећих класификација. Идеју су подржали FAO, UNEP и UNESCO. Уз њихову подршку у току 1981. и 1982. године одржана су три консултативна састанка у Бугарској, на којима су утврђени принципи Интернационалне референтне базе за класификацију земљишта (енг. *IRBC – Intrnational Reference Base for Soil Classification*). Утврђено је да добру основу за израду IRBC представља класификација FAO из 1973. године, јер је она постигла висок степен међународне употребљивости, нарочито за успостављање корелације између постојећих класификација. Прва скица (драфт) WRB објављена је 1992. године на састанку у Монтпелиеру у Француској. Овај догађај није био случајан. Французи су већ тада имали трећу верзију референтне базе за њихова земљишта. После овога уследило је неколико нових састанака и теренских екскурзија широм света, како би се ускладила различита мишљења. Коначно, пре XVI Међународног педолошког конгреса, који је одржан у Монтпелиеру 1998. године изашла је публикација: Светска референтна база за земљишта.

WRB није класификација земљишта у класичном смислу. Овим системом се не желе заменити националне класификације, већ помоћи у њиховом усклађивању и обједињавању за регионалне потребе. Међутим, поређењем систематских јединица земљишта у нашем класификационом систему са земљишним јединицама Светске референтне базе за земљиште јављају се тешкоће по питању усклађивања назива за поједине типове земљишта. Управо због лакшег усклађивања нашег класификационог система са Светском референтном базом за класификацију земљишта неопходно је извршити ревизију нашег класификационог система и усклађивање хемијских анализа и увођење нових параметара за дијагностицирање одређених референтних група земљишта.

Прво издање Светске референтне базе објављено је 1988. године и садржи 30 референтних земљишних група, док је друго издање објављено 2006. године и садржи 32 референтне земљишне групе.

Општи принципи на којима се темељи Светска референтна база (WRB) су:

- Класификација земљишта темељи се на особинама земљишта дефинисаним на основу хоризоната, особина и материјала, који у највећој могућој мери треба да буду мерљиви и уочљиви на терену.
- Приликом избора особина узима се у обзир њихов однос са процесима који се одвијају приликом формирања земљишта. Уочено је да познавање процеса који се одигравају приликом формирања земљишта доприноси бољој карактеризацији земљишта, али да они не би требало да буду коришћени као критеријуми за диференцијацију. Применом највеће могуће генерализације, врши се одабир особина које су значајне за управљање земљиштем.
- Климатски параметри се не примењују приликом квалификације земљишта. У потпуности је прихваћено да они треба да буду коришћени у циљу интерпретације, у динамичној комбинацији са особинама земљишта, али не и да буду део дефиниције земљишта.

WRB је свеобухватни систем класификације који омогућава људима да прилагоде свој национални систем класификације и састоји се из два нивоа категоријских детаља:

- Ниво 1: Референтне земљишне групе, којих има 3 и
- Ниво 2: Комбинација референтних земљишних група са квалификаторима, како би се детаљно одредиле особине референтних земљишних група додавањем сета квалификатора дефинисаних на јединствен начин.

Референтна база није осмишљена да би заменила системе националне класификације земљишта, већ да би служила као заједнички именитељ који ће обезбедити комуникацију на међународном нивоу.

Осим што служи као спона између постојећих система класификације, Светска референтна база такође се користи као стално средство комуникације за прикупљање глобалних база података о земљиштима, као и за покретање и успостављање надзора над светским земљишним ресурсима.

Измењена легенда Мапе светских земљишта коју је сачинио FAO / UNESCO (FAO, 1988), употребљена је као основа за развој Светске референтне базе како би се искористила корелација која постоји на међународном нивоу у погледу земљишта, што је већ учињено реализацијом овог пројекта и покретањем других иницијатива.

Дефиниције и описи земљишних јединица одражавају варијације у карактеристикама земљишта и на хоризонталном и на вертикалном нивоу, служе као просторне везе у оквиру пејзажа.

Номенклатура која се користи за разликовање земљишних група задржава термине који се традиционално користе или који могу бити једноставно уведени у постојећи језик. Они се прецизно дефинишу како би била избегнута конфузија која настаје онда када се називи користе у различитим конотацијама.

Реферетне земљишне групе разврстане су на сетове на основу доминантних идентификатора, тј. фактора или процеса за формирање земљишта који на најочигледнији начин условљавају формирање земљишта. Разврставање група урађено је на основу следећих принципа:

1. Органска земљишта која се разликују од минералних земљишта (Хистосоли);
2. Друга важна дистинкција у Светској референтној бази (WRB) односи се на уочавање људске активности као фактора за формирање земљишта, због чега се *антросоли* и *техносоли* наводе после *хистосола*. Такође, стиче се утисак да новоуведени техносоли треба да буду наведени на почетку, из следећих разлога:
 - брзог препознавања земљишта која не би требало дирати (токсична земљишта о којима треба да се брину стручњаци);
 - добијања хомогене групе земљишта у неуобичајеним материјалима;
 - пружања могућности онима који доносе значајне одлуке да употребом правила за класификацију одмах уоче проблематична земљишта;
3. Земљишта са озбиљним ограничењима за развој корена биљака (*криосоли* и *лептосоли*);
4. Земљишне групе које су у прошлости биле или су још увек под снажним утицајем воде: *вертисоли*, *флувисоли*, *солонец*, *солончак* и *глејсоли*;
5. Земљишта у којима гвожђе (Fe) и/или алуминијум (Al) играју важну улогу приликом формирања: *андосоли*, *подзоли*, *нитисоли* и *ферасоли*;
6. Земљишта са водом у подземном слоју: *планосоли* и *стагносоли*;

7. Земљишта која се јављају углавном у степским пределима, која имају оранични слој богат хумусом и високу засићеност базама: *черноземи, кастаноземи и феоземи*;
8. Земљишта из сувљих подручја са акумулацијом гипса (*гипсисоли*), силицијум диоксида (*дурисоли*), или калцијум-карбоната (*калцисоли*)
9. Земљишта са подораничним слојем који је богат хумусом: *албелувисоли, акрисоли, лувисоли и ликсисоли*;
10. Релативно млада земљишта или земљишта са слабо или неразвијеним профилем, или веома хомогени пескови: *амбрисоли, ареносоли, камбиосоли и регосоли*;

Иако је усвојен основни оквир у FAO легенди (са два нивоа категорија и смерницама за развој класа у оквиру трећег нивоа), донета је одлука о повезивању нижих нивоа. Свака референтна земљишна група у оквиру Светске референтне базе има листу могућих суфикса и префикса који се могу сложити у низу, и тако могу настати јединице другог нивоа.

Префиксни квалификатори се обично доводе у везу са одређеном референтном земљишном групом и квалификатори који служе као спона између референтних група и осталих квалификатора. Квалификатори који се обично доводе у везу с одређеним референтним групама су наведени уз одговарајуће референтне земљишне групе, на пример: хидроаграрни или плагични користе се за одређивање антропосола. Квалификатори који служе као спона међу референтним земљишним групом одражавају значајне дијагностичне критеријуме за одређивање друге референтне земљишне групе. У том случају, правило за одређивање Светске референтне базе диктираће избор референтне земљишне групе, а квалификатор који служи као спона обезбедиће везу са другом референтном земљишном групом. Остали квалификатори су они који се не доводе у везу с референтном земљишном групом и не служе као спона с другим референтним групама, на пример: герични или позични за ферасоле. Ова група одржава карактеристике које се не користе као типичан квалификатор за одређену групу.

Суфиксни квалификатори су поређани на следећи начин:

1. квалификатори који се односе на дијагностичке хоризонте, особине или материјале;
2. квалификатори који се односе на хемијске карактеристике;
3. квалификатори који се односе на физичке карактеристике;
4. квалификатори који се односе на минералогичне карактеристике;
5. квалификатори који се односе на површинске карактеристике;
6. квалификатори који се односе на текстурне карактеристике, укључујући грубе фрагменте;
7. квалификатори који се односе на боју;
8. преостали квалификатори.

Префиксни квалификатори увек се стављају испред референтне земљишне групе, а суфиксни квалификатори се увек стављају између заграда после имена референтне земљишне групе.

Комбинације квалификатора којима се означава сличан статус или дуплирање квалификатора нису дозвољене, као што су, рецимо, комбинације тионични и дистрични, калкарични и еутрични, или родични и хромични.

Спецификатори као што су: *епи-*, *ендо-*, *хипер-*, *хипо-*, *тапто-*, *бати-*, *пара-*, *прото-*, *кумули-* и *орто-*, употребљавају се да означе одређени степен квалификатора.

Приликом квалификације земљишног профила, сви квалификатори с наведене листе морају бити евидентирани. Приликом израда мапа, размер ће условити број употребљених квалификатора. У том случају, префиксни квалификатори имају приоритет у односу на суфиксне квалификаторе.

Листа квалификатора за сваку референтну земљишну групу применљива је у већини случајева. Потребно је евидентирати оне случаје у којима се користе квалификатори који нису уврштени на листу и доставити тај списак Радној групи светске референтне базе.

2.2. Национална класификација земљишта заснована на принципима светске класификације земљишта

У предлогу за ревизију актуелне педолошке класификације земљишта заузети су следећи принципи:

Педосистематске јединице до нивоа типа не треба мењати обзиром да су упоредиве са одговарајућом референтном групом земљишта у WRB систему.

За поделу нижих систематских јединица од типа (подтип, варијетет, форма) треба по могућству примењивати јединствене критеријуме код сваке ниже систематске јединице, и то оне који у WRB систему представљају префиксе и суфиксе на основу које се ближе дефинишу референтне групе земљишта. Раздвајање подтипова се врши на основу споредног педогенетског процеса, варијетета на основу физичког стања супстрата, а форми на основу скелетности, текстурног састава, дубине или моћности хоризоната.

Ако се педосистематске јединице ниже од типа дефинишу на основу критеријума који одговарају префиксима и суфиксима у WRB систему оне се могу упоређивати са одговарајућом категоријом у WRB систему.

Усклађеност класификације представља сложен проце, посебно у нашој земљи где су веома разнолики педогенетски чиниоци, па постоји велики број типова земљишта и њихових нижих таксономских јединица. С обзиром на значај и стално унапређење WRB, неопходно је континуирано истраживање односа класификација. У току је израда предлога ревизије Класификације земљишта која се примењује у Републици Србији.

3. Деградација земљишта

До деградације земљишта долази када земљиште више није у могућности да обавља своје функције усвајања, складиштења и кружења енергије и нутријената и када продуктивност која је повезана са коришћењем земљишта постаје неодржива. Деградација земљишта се сматра мерљивим губитком или смањењем тренутне способности земљишта да произведе биомасу у жељеној количини и квалитету. Велики број физичких, хемијских и биолошких процеса доводи до деградације земљишта. Физички процеси укључују погоршање структуре земљишта, стварање покорнице, стврдњавање, збијање и/или сабијање, ерозију и дезертификацију. Хемијски процеси који доводе до деградације земљишта су излуживање нутријената, закишељавање, салинизација и присуство органских и неорганских загађујућих материја. Биолошки процеси деградације земљишта су смањење угљеника и биодиверзитета земљишта. Према неким ауторима деградација земљишта је резултат неусклађености између квалитета и коришћења земљишта.

Деградација земљишта може бити природног или антропогеног порекла. Топографски и климатски фактори као што су стрме падине, честе падавине, поплаве, торнада, олује, кише великог интензитета, спирање у влажним регионима и суша спадају у природне узроке деградације земљишта. Крчење шума и прекомерна експлоатација вегетације, промена културе, губитак површинског слоја земљишта, прекомерна испаша, неселективна употреба хемикалија, лоша пракса управљања и очувања земљишта као и прекомерна експлоатација подземних вода су узрочници антропогене деградације земљишта.

Најчешћи узрок деградације земљишта је ненаменска употреба земљишта. Економски и социјални проблеми, притисак становништва, сиромаштво, лоша пољопривредна пракса, недостатак техничких консултација са пољопривредницима, употреба неодговарајућих оруђа за обраду су најчешћи разлози деградације. На основу података Центра за интернационалне земљишне референце и информације (енг. *World Soil Information (ISRIC)*) и на основу Глобалне процене деградације земљишта антропогеног порекла (енг. *Global Assessment of Soil*

Degradation (GLOSAD)) идентификовао је пет главних узрока деградација земљишта: крчење шума (дефорестација), прекомерна испаша, лоше управљање пољопривредним земљиште, прекомерна експлоатација и био-индустријске активности.

3.1 Узроци деградације земљишта

Крчење шума (Дефорестација) се односи на претварање шумских земљишта у нешумска, нпр. у пољопривредна земљишта, излетишта, пашњаке, индустријске комплексе и урбана подручја. Укупна површина шумског земљишта на глобалном нивоу износи нешто више од четири милијарде хектара. Седам земаља (Русија, Бразил, Канада, САД, Кина, Индонезија и Демократска Република Конго) имају више од 60% укупне површине шума. Десет земаља или области немају шуме уопште, а додатне 54 земље имају шумске површине које су мање од 10% (извор: *Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO*). Око половине шума које су покривале земљу је данас уклоњено. Сваке године нестане још 16 милиона хектара шуме. Светски институт за ресурсе процењује да је само око 22% светског првобитног шумског покривача остало нетакнуто – највећи део је у три велика подручја: бореална шума Канаде и Аљаске, бореалне шуме Русије и тропске шуме северозападног Амазонског басена и Гвајанског штита (Гвајана, Суринам, Венецуела, Колумбија итд.). Човечанство је милионима година утицало на шумско земљиште. Крчење шума је интензивно се шири и убрзава, а квалитет преосталих шума опада. До недавно, крчења шума било је карактеристично за Европу, северну Африку и Блиски исток. Данас је крчење шума у овим регионима стабилизовано, а на појединим местима долази до поновног раста, иако су секундарне шуме другачијег карактера. У последњих неколико деценија, дошло је до значајног смањења шумског фонда у тропима - а темпо крчења и даље расте. Уклањање тропских шума у Латинској Америци износи око 2% годишње. У Африци, то износи око 0,8 % годишње, а у Азији 2% годишње.

Према анализи FAO, крчење шума било је карактеристично за земље у развоју, које су изгубиле скоро 200 милиона хектара између 1980. и 1995. Овај губитак је делимично компензован напорима и раду на пошумљавању, развоју нових шумских плантажа и постепеним

поновним растом и проширењем шумских површина у развијеним земљама. Међутим, преостале шуме могу бити веома деградиране уколико се не крче. Мерење обима и брзине крчења шума није тако једноставно као што се на први поглед чини. Први изазов јесте дефинисати шта се подразумева под „шумским подручјем“. Мапа „континуираних поља“ коју је припремила организација која садржи глобалне податке о земљишном покривачу (енг. *Global Land Cover Facility (GLCF)*) показује да су површине под шумама далеко од тога да буду хомогене и да могу варирати од 10 до 100% покривености дрвећем и да се још увек сматрају шумама.

Према подацима FAO узроци крчења шума су пољопривреда у сврху сопствених потреба (чешће у Африци и Азији) и промена намене земљишта односно претварање шумских површина у пашњаке (најчешће у Латинској Америци и Азији). Сиромаштво, незапосленост и неправедна расподела обрадивог земљишта, приморала је човека који не поседује обрадиво земљиште да уклања шуму у циљу добијања површине за пољопривредну производњу. Људи почињу да настањују шумска подручја јер сеча шума односно дрвећа ствара путеве који отварају раније неприступачне регионе. Што се тиче планова и шема за конверзију шума, оне се често користе за подстицање краткорочног економског развоја, стицање политичке контроле над удаљеним шумским регионима и проширење пољопривредне производње.

Процеси који доводе до крчења шума су индустријска сеча, неселективна сеча, шумски пожари, ширење пољопривреде. Последице сече шума су губитак шума, губитак биодиверзитета, климатске промене и природне катастрофе као што су циклони, поплаве и суше, поремећај кружења воде, пад квалитета воде, ерозија и седиментација. Шуме регулишу хидролошке процесе: евапорацију, транспирацију, инфилтрацију и површинско спирање. Резултат сече дрвећа у великим шумским системима доводи до климатских поремаћаја које онда постаје сушно подручје. Крчење шума доводи до излагања „голог“ земљишта дејству сунца и ударима кишних капи. Значајна количина површинског земљишта се губи ерозијом. Због повишене температуре, органска материја земљишта се брже разлаже, а агрегати у земљишту се распадају ударом кишних капи. Стопа инфилтрације је смањена што доводи до већег отицања воде. Велики делови земљине површине постају трајно осиромашени услед ерозије. Крчење шума повећава емисију угљен-

диоксида у атмосферу. Крчење тропских шума чини око 20% укупне глобалне емисије угљен-диоксида на основу података Међувладиног панела о климатским променама (енг. *The Intergovernmental Panel on Climate Changes - IPCC*). Шуме складиште значајну количину угљен-диоксида. Биљке током раста апсорбују угљен-диоксид из атмосфере и „чувају“ га у стаблу, лишћу, корену, као и у земљишту. Када живи организми изумру, знатан део угљен-диоксида који је био складиштен у њима испушта се назад у атмосферу. Након што се уклони део шуме, посечена стабла се или остављају да труну на месту сече или их људи спаљују, што доводи до додатне емисије у атмосферу.

Глобални климатски модели су показали да би сеча тропских шума могла утицати на климу у мањим или већим размерама. Резултати су показали да утицаји крчења тропских шума зависе од регионалних климатских карактеристике у тропима где су поремећаји уочени. Крчење тропских шума доприноси повећању оптерећења атмосферским угљен-диоксидом што даље доприноси расту температуре. Шуме заузимају значајан положај у хидролошком циклусу. Вода се губи евапотранспирацијом из земљишта и вегетације, кондензује се у виду облака, и поново пада на површину земље као киша. Поред тропских падавина, евапорација хлади површину земље. Уклањањем дрвећа смањује се површина земљишта која је под крошњама. Ово је битно с обзиром да крошње дрвећа током дана блокира сунчеве зраке, а ноћу утиче на задржавање топлоте у земљишту. Тај поремећај доводи до екстремних промена у температури, које могу бити штетне за биљке и животиње, али и за човека. Истраживања показују да је, у најмање једној трећини региона, где је минимално 15% шумског покривача уклоњено од преиндустријског периода до данас, дефорестација заслужна за додатни пораст температуре, посебно током најтоплијих дана у години.

Ово наводи на чињеницу да би поновна садња дрвећа, односно пошумљавање појединих региона, могло бити један од ефикасних начина заштите од даљег повећања температуре у овим регионима.

Многи модели, који се користе за предвиђање климатских промена, показују да уколико се тропске шуме замене пашњацима и усевима доћи ће до сушних услова и топлије климе у тропима. Неки модели такође предвиђају да ће крчење тропских шума пореметити образац падавина

далеко изван тропских крајева односно у Кини, северном Мексику и јужно-централном делу САД.

Крчем шума, угљеник складиштен у дрвној биомаси се спаљивањем враћа у атмосферу, појачавајући тако ефекат стаклене баште и глобално загревање. Када се шума крчи за гајање усева или у сврху добијања пашњака, земљишта могу постати велики извор емисије угљен-диоксида, у зависности од тога на који начин земљорадници и сточари управљају земљиштем.

Када површина земљишта остане без вегетације, горњи слој постаје подложнији ерозији. Земљиште се спира у површинске воде. Ово смањује способност земљишта да се регенерише и као последицу има губитак плодности. Такође погоршава се квалитет површинских и подземних вода. У неколико делова света читави региони су изгубили продуктивност као последица ерозије земљишта.

Култивација земљишта или пољопривреда на земљишту које је настало након крчења шума најчешће практикују пољопривредници у брдовитим пределима влажних тропских крајева. Крчи се део шуме, обично на благим падинама или на врховима падина, при чему се вегетација коси и веома често спаљује. Пољопривредници крче нови део шуме као припрему за култивацију у наредној сезони. Период ротације је кратак и мањи је од 3 године.

Пољопривредници који ротирају усева веома често спаљују остатак биомасе при чему се нутријенти из пепела користе како би се повећала плодност и принос усева. Овај ефекат је, међутим, привремен. Кише након спаљивања брзо уклањају остатке ерозијом и спирањем. Све већи докази показују да ротација усева са спаљивањем биомасе негативно утиче на квалитет земљишта, површинских и подземних вода. Такве активности утичу на физичке и хемијске особине земљишта, смањују залихе нутријената и убрзавају ерозију земљишта и седиментацију.

Прекомерна испаша подразумева испашу стоке што негативно утиче на раст, квалитет и састав вегетације на датом земљишту. Прекомерна испаша доводи до промене вегетације. За пашњаке то имплицира да пашњак губи биодиверзитет смањује се број и врста животиња у односу на ранији период. Прекомерна испаша је главни узрок деградације земљишта широм света и чини 35,8% свих облика деградације. Овај вид деградације земљишта је посебно распрострањен у Аустралији и

Африци, где чини 80,6% и 49,2%, редом. Овај вид деградације земљишта је најмање екстензиван у Европи (22,7%).

Прекомерна испаша је највећи узрочник дезертификације у сушним пределима. Сточарство је главни извор прихода у многим аридним и семиаридним пределима. Прекомерна испаша стоке изазива смањење биљног покривача и плодности земљишта, као и повећање ерозије. Домаће животиње брзо утичу на смање вегетације, изазивајући додатни стрес на земљиште које већ ионако има низак вегетациони покривач. Такође, животиње на испаша се крећу у великим групама и својим копитама утичу на површину земљишта, остављајући га подложнијим ерозији. Ерозија смањује садржај органске материје и плодност земљишта. Недостатак органске материје може довести до дезертификације кроз смањену доступност нутријената за раст биљака.

Губитак површинског слоја. Уклањање површинског слоја земљишта најчешће се спроводи у различите сврхе нпр. у сврху изградње путева, железничких пруга за производњу опеке и др. Површинско земљиште је најплоднији део земљишта; садржи највише органске материје и нутријената и поседује најпогодније физичке и хемијски особине/услове за раст биљака. Уклањање површинског слоја земљишта смањује садржај органске материје, нутријената и расположивост воде, што доводи до повећаног ризика за подземне слојеве земљишта. Губитак овог слоја значајно смањује квалитет земљишта и принос усева.

Монокултура. У пољопривреди, монокултура је пракса узгајања једне врсте усева из године у годину на истом земљишту без примене ротације усева. Кукуруз, соја и пшеница су три врсте усева које се често узгајају једнократно. То је економски исплатив начин, али може негативно утицати на плодност земљишта и животну средину. Систем корена стално усваја исту врсту и удео истих нутријената из земљишта у дужем временском периоду. Статус нутријената у земљишту постаје неуравнотежен након дужег периода сетве истих усева. Поједине врсте инсеката и штеточина се прекомерно размножавају што доводи до тога да пољопривредници постају зависни од пестицида.

Прекомерно наводњавање. Пољопривреда се не може одвијати у аридним пределима без наводњавања. Међутим, наводњавање у сушним областима може да доведе до појачане дезертификације кроз салинизацију и алкализацију. До салинизације долази због

евапотранспирације воде, остављајући соли (хлорида, сулфата и карбоната) на површини земљишта. Током дугог временског периода, прекомерне количине соли се акумулирају у дубљим слојевима, али и у површинским слојевима, због чега је биљкама све теже да усвоје воду из земљишта. Ово је може бити последица примене воде за наводњавање која није одговарајућег квалитета. Код наводњавања мора се узети у обзир и вода која се излучи (додатна вода за испирање соли) из земљишта.

Употреба тешких пољопривредних машина. Тешку пољопривредну механизацију најчешће користе развијеније земље. Трактори и комбајни могу бити тежи од 20 тона. Тако велика оптерећења утичу на збијање земљишта што је готово неповратан процес. Дубоко збијање земљишта испод подораничног слоја је касније јако тешко разбити. Овај утицај је детаљније разматран у поглављу 3.3.

Рударство значајно доприноси загађењу земљишта, посебно тешким металима. Пример је одлагање Cd из рудника у Јапану и контаминација земљишта и пиринчаних поља која је изазвала озлоглашену болест итаи-итаи.

Оружје и муниција су извор загађења земљишта у ратним подручјима. Региони који су захваћени ратом често остављају контаминирано земљиште металима од истрошене муниције. Овде је олово примарни елемент који изазива забринутост када је у питању загађење земљишта. Употреба оружја може продукovati концентрацију олова од неколико процената (1% је једнак 10000 mg/kg; сигуран ниво је само 35 mg/kg) у земљишту. У узорцима земљишта из постројења за уништавање оружја у Белгији детектоване су високе концентрације арсена, бакра и олова.

Неадекватно одлагање отпада. Материјали на крају животног циклуса представљају отпад. Отпад може бити различитог порекла: индустријски, комунални, пољопривредни и нуклеарни. Отпад је главни извор загађења земљишта. Комунални отпад је хетерогеног састава и обухвата кућни и кухињски отпад, отпад са тржишта, болнички отпад, отпад од стоке и живине и др.

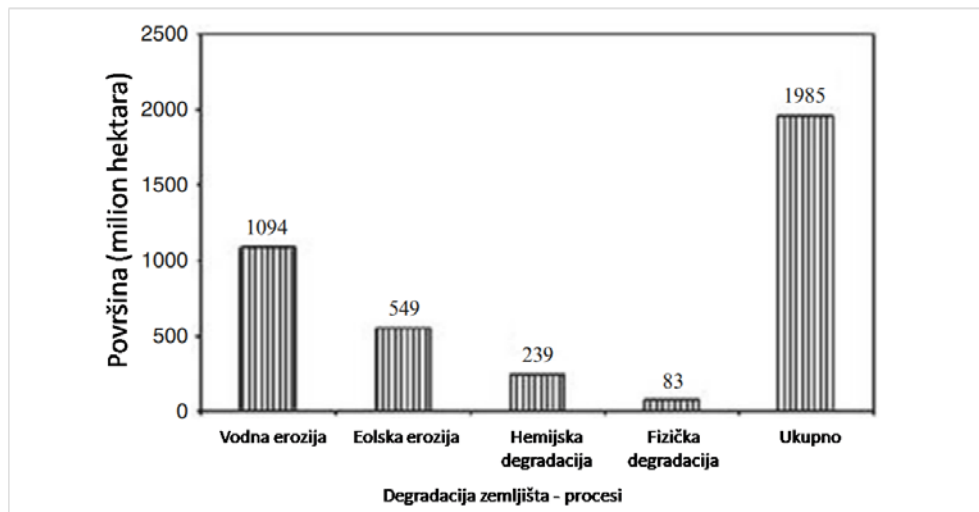
Комунални отпад може бити биоразградив и да садржи материјале који се могу рециклирати. Комунални отпад може да садржати биоразградиву органску материју и тешке метале. Муљ из постројења за третман отпадних вода може да се користи као суплемент/оплеменувач

земљишта с обзиром да садржи значајне количине нутријената. С друге стране, ови суплементи могу бити извор различитих контаминаната нпр. тешких метала (Pb, Cd, Zn, итд.).

Употреба агрохемикалија. Агрохемикалије укључују ђубрива, стајњак, суплементе, хормоне и пестициде. Употреба ђубрива и стајњака доводи до уноса тешких метала као што су арсен, кадмијум, уранијум и ванадијум у земљиште. Фосфатна ђубрива могу садржати значајне количине Cd. Живински и свињски стајњак може садржати мање концентрације цинка, арсена и бакра. Пестициди су друга група агрохемикалија, укључује инсектициде, хербициде и фунгициде. Група оргоанофосфорних једињења, оргоанохлорних, карбаматних и пиретроида се користе као пестициди. Неки су веома токсични и перзистентни у животној средини. Њихова неселективна примена може довести до многих проблема. Деградација земљишта као последица примене агрохемикалија описана је у поглављу загађење земљишта.

3.2 Врсте деградације земљишта

Карта о статусу деградације земљишта на глобалном нивоу, објављена је од стране ISRIC у сарадњи са FAO и UNEP (*енг. UN Environment Programme*) још 1991. год. Развијена је општа класификација, која се назива GLOSAD класификација. Према овој класификацији, постоје пет главних типова деградације земљишта, које укључују водну и еолску ерозију, погоршање хемијских, физичких и биолошких особина. За сваки тип деградације земљишта постоји неколико подтипова, осим за биолошку деградацију. Ови типови и подтипови су наведени у наставку. Површина земљишта деградирана сваким типом деградације дата је на *слици 3.1*, док су врсте и подтипови деградације земљишта дати у *табели 3.1*.



Слика 3.1 Површина земљишта деградирана различитим процесима

Табела 3.1. Типови и подтипови деградације земљишта

Тип деградације	Подтип
W: Водна ерозија	Wt: губитак површинског слоја
	Wd: деформација терена/померање масе
	Wo: ефекти ван локалитета
	Wo: резервоар седимента
	Wof: полава
	Woc: уништавање коралног гребена и морских алги
E: Еолска ерозија (ерозија ветром)	Et: губитак горњег слоја земљишта
	Ed: деформација терена
	Eo: бубрење
C: Хемијска деградација	Cn: Губитак нутријената и/или органских материја
	Cs: Салинизација
	Ca: Закишељавање
	Cr: Загађење
	Ct: кисела сулфатна земљишта
	Ce: Еутрификација
P: Физичка деградација	Ps: збијање, заптивање и стварање покорице
	Pw: наводњавање
	Pa: смањење нивоа подземних вода
	Ps: слегање органског слоја
	Pr: друге физичке активности као што су рударење и урбанизација
B: Деградација биолошке активности	

Око 38% пољопривредне површине земљишта може се сматрати деградираним. Удео деградираних територија у Африци је око 65%, у Централној Америци око 74%, а у Јужној Америци око 45 %. Удео деградираних пашњака и шума је много мањи и то за 21% и 18%, редом.

Процењује се да је око 38% површине (749 Mha) земљишта благо деградирано као последица антропогених активности, 46% (910 Mha) је умерено деградирано, 15% (296 Mha) снажно деградирано, док је мање од 1 % (9,3 Mha) изузетно деградирано.

3.3 Физички процеси деградације земљишта

До физичке деградације земљишта долази као последица промене структуре земљишта, дисперзије честица земљишта, смањења порозности, збијања и повећања густине, слегања, сабијања и смањеног продирања корена биомасе, мале инфилтрације, интензивног наводњавања, спирања и убрзане ерозије. Уз денудацију односно одношење површинског слоја, ови процеси доводе до дезертификације у аридним и семиаридним регионима.

3.3.1. Процеси и врсте физичке деградације земљишта

Важна физичка својства земљишта која се односе на плодност земљишта, продуктивност и квалитет земљишта су текстура, структура, насипна густина, порозност, влажност, ваздушне и топлотне карактеристике земљишта. Од ових својстава, само текстура земљишта је трајно својство које не може бити лако измењено.

Структура земљишта се може модификовати обрадом земљишта и ђубрењем. Обрада односно орање земљишта доводи до разбијања структурних агрегата, који мењају величину пора и однос макро- и микропора. Као последица тога, насипна густина, капацитет задржавања воде и аерација се мења. Често обрада земљишта уништава његову структуру, смањује порозност, и чини земљиште компактним. Дакле, погоршање физичких особина земљишта јавља се као последица лошег управљања земљиштем. Следећи процеси могу у великој мери објаснити физичку деградацију земљишта:

1. Коалесценција: спајање финих честица земљишта између појединачних агрегата, формирајући тако масивну структуру.

Земљишта која се обрађују у веома сувом стању су посебно склона коалесценцији.

2. Деструкција: Промена структуре када се суви агрегати земљишта брзо навлаже кишом или наводњавају. Земљишта са ниским садржајем органског угљеника ($<2\%$) су подложна брзој деструкцији агрегата.
3. Дисперзија: Дезинтеграција производа деструкције структурних агрегата на појединачне структурне елементе услед репулзивних сила између честица глине. Ове силе се додатно стимулишу високим концентрацијама изменљивог натријума.
4. Консолидација: Смањење запремине земљишта редукацијом садржаја пора, углавном макропора. Земљишта са ниским садржајем органског угљеника ($<2\%$) су посебно склона сабијању, али земљишта са високим садржајем органске материје показују еластичност која чини да се овај ефекат смањује.
5. Пулверизација агрегата: Ово се дешава када се земља која је превише сува обрађује, што доводи до уништавања агрегата у фини прах. С друге стране, обрада када је земљиште влажно уништава агрегате размазивањем, јер је тада чврстоћа земљишта минимална. Идеално би било да се земљиште обрађује када је влага у земљишту на тачки тзв. "доње границе пластичности."

Физичка деградација као последица промене физичких својства земљишта је један од основних типова деградације земљишта. Постоје следећи подтипови: (1) заптивање пора, формирање површинске покорице и збијање; (2) забаривање; (3) смањење нивоа подземне воде; и (4) слегање органског земљишта. Дезертификација је такође процес физичке деградације што изазива посебну забринутост у сушним и семиаридним регионима.

3.3.1.1. Заптивање пора и формирање површинске покорице

Термин заптивање пора се користи да опише промену у природи земљишта (обично за површинске слојеве земљиште) што доводи до непропустљивости земљишта. Честице земљишта се распршују урушавањем структуре агрегата у земљишту услед физичких притисака, као што је удар кишних капи или услед неког хемијског агенса као што је вишак изменљивог натријума. Пропадање структуре може такође да се јави у току неправилне обраде земљишта. Губитак структуре земљишта и распршивање честица ударица капљица воде на

непокривеном земљишту узрокује површинско заптивање пора, што отежава инфилтрацију воде и усвајање од стране кореновог система.

Порозност, способност инфилтрације и задржавања воде у земљишту су смањени што утиче на вегетацију. Поред тога, повећавају се вредности отицања, што повећава потенцијал ерозије. Губитак финих елемената са површине отежава подупирање кореновог система, а самим тим и везивање биљака за подлогу.

На пример, када се земљиште обрађује у сувом стању агрегати се разбијају и настаје фин прах. Фине честице улазе у макропоре и смањују инфилтрацију и перколацију. С друге стране, обрада у влажном стању доводи до стварања агрегата. Нестабилни агрегати могу да буду наквашени што узрокује смањену стабилност. Дакле, површина земљишта постаје непропусна за воду и корење биљака. Оваква земљишта се не могу користити у пољопривреди и за пошумљавање, док су еколошке функције смањене или чак у потпуности спречене. Поред тога, ово може утицати на околно земљиште кроз промену тока воде или фрагментацију станишта.

Заптивање пора може озбиљно да утиче на хидрологију земљишта. На пример, површинско заптивање ће у великој мери смањити кретање воде у земљишту што ће повећати густину земљишта и смањити порозност, величину пора и континуитет пора.

Механизми формирања заптивача: (1) физички распад земљишних агрегата, изазван влажењем и ударом кишних капи и (2) физичко-хемијском дисперзијом колоидних честица глине, које се крећу у замљишном раствору и који зачепљују поре. Смањена укупна порозност повећава насипну густину и смањује транспорт растворених материја и раст корена.

Садржај макропора (пречник пора $>1000 \mu\text{m}$) повећава инфилтрацију воде и смањује отицање. Ово је спречено с обзиром да се површинским заптивањем смањује број макропора.

У пољопривредним земљиштима интензивна обрада уништава природну агрегацију. Земљишни агрегати се могу урушити као последица притиска тешке механизације. Како се природни агрегати уништавају, ослобађају се ситније честице које се распршују под дејством капи кише

и наводњавања. Земљишта са ниским садржајем органске материје не могу формирати стабилне агрегате који могу да издрже ове притиске.

Физички процеси заптивања пора површинског слоја земљишта су резултат кинетичког удара кишних капи и транслокације честица водом. Када силе удара кишних капи премашују силу унутрашње кохезије агрегата, долази до разлагања ових агрегата на примарне честице. Ове честице се транспортују површинским отицањем или процесима излуживања у подповршински слој земљишта. Када се депонују, транслоциране честице могу зачепити поре земљишта и формирати површинске слојеве које карактерише већа запреминска густина и мања хидраулична проводљивост у односу на слој испод. Због губитка воде у земљишту и инфилтрационог капацитета, ерозија земљишта и ризик од поплава су значајни повећани.

Формиране површинске покорице. Приликом даље консолидације и сушења земљишта, површинско заптивање пора земљишта доводи до формирања површинске покорице.

Формирање покорице је веома честа појава у многим земљиштима широм света, посебно у аридним и семиаридним земљиштима. Падавине изазивају низ интеракција између воде и земљишта: дезинтеграцију, одвајање, усвајање, таложење и компресију. Ове акције доводе до заптивања пора, а потом и формирања покорице. Кора која настаје представља танак слој на површини земљишта који карактерише већа густина, већа отпорност на притисак и нижа хидрауличка проводљивост у односу на слојеве испод. Механизам формирања покорице укључује два главна процеса: (1) физичко дејство које укључује дезинтеграцију агрегата у земљишту и збијање честица земљишта узроковано ударом кишних капи и (2) физичко-хемијско дејство које укључује дисперзију агрегата, кретање честица земљишта које зачепљује поре и формира мању пропустљивост површинског слоја. Формирање коре зависи од многих фактора, као што су текстура и стабилност агрегата, интензитет и енергија удара кишних капи, градијента и концентрације електролита у земљишном раствору и кишници.

Постоје две врсте формирања површинске коре: структурна и депозициона кора. Структурна кора је када површински слој земљишта, има кору дебљине неколико милиметара до неколико центиметара и компактнији је од материјала испод. Структурне покорице се могу

формирати и као последица испаше стоке или притиска тешке механизације у току пољопривреде.

Формирање коре стврдњавањем који укључује колапс неких или свих агрегата током и након влажења претходно растреситог горњег слоја земљишта. Процеси стврдњавања могу се поделити у два физички различита процеса: слегање и једноосно скупљање. Слегање се јавља током и након влажења земљишта које садржи водонестабилне агрегате. Агрегати истовремено омекшају и набубре, при чему неке или све финије честице (прах и глина) постају суспендоване. Неке од фракција глине се распршују. Агрегати се распадају јер немају довољну снагу да издрже притисак који ствара брзо упијање воде, узроковано брзим ослобађањем топлоте при влажењу, заробљеним ваздухом, механичким дејством воде која се брзо креће или диференцијалним отицањем. Једноосно скупљање је важно с обзиром да мање растојање између честица повећава чврстоћу при сушењу коре.

Прекомерна испаша може изазвати стварање коре преко два механизма: површинским збијањем влажних земљишта и механичким уништавањем површинских земљишних агрегата. Нека земљишта су природно чврста. Има их пуно у тропским областима. Наравно, чврста земљишта нису у стању да развију водостабилне агрегате. Услови стврдњавања могу се јавити на земљиштима са високим процентом измењивог натријума.

С друге стране, површинска покорица се формира када се честице земљишта суспендоване у води, таложе на површини земљишта како се вода инфилтрира или испарава. Кора настала депозицијом (депозициона кора) се развија таложењем суспендованих честица на површину земљишта. Оне се налазе у неким култивисаним или необрађеним земљиштима. Главни разлози одношења финих честица земљишта су вода за наводњавање, забарене бразде, удари кишних капи, ударно прскање растреситих честица земљишта, изливање и поплаве река и отицање. Честице глине и праха у суспензији могу се или дисперговати или флокулисати. Оне флокулишу када концентрација електролита у суспензији прелази праг флокулације глине. Супротно томе, када је концентрација електролита у суспензији испод прага флокулације, дисперговане честице се таложе и формирају таложну кору, чија је хидрауличка проводљивост неколико редова величине нижа од оне код

матичног земљишта. Формирање покорице површинског слоја земљишта може значајно смањити инфилтрацију воде кроз земљиште и повећати капацитет отицања са површине, што заузврат повећава капацитет мобилности елемената из земљишта.

Фактори земљишта који утичу на формирање покорице. Настајање коре (енг. *crusting*) првенствено подразумева деструкцију агрегата земљишта. Агрегати се углавном здружују електрохемијским силама које везују честице глине заједно. Стабилност агрегата зависи од врсте минерала глине, њихових електрохемијских карактеристика и концентрације електролита у земљишном раствору. Што је стабилнији, то је агрегат земљишта мање подложен стварању коре.

Минерали глине. Земљишта богата каолинитом обично имају стабилне агрегате због веза између кластера, између позитивног наелектрисања на ивицама и негативног наелектрисања честица. Каолинит је врста глине која се не шири или не бубри. Дакле, агрегати земљишта сачињени претежно од каолинита се распадају лако при влажењу. С друге стране, монтморилонит је експандирајућа глина која бубри када се накваси. Због тога, земљишта са високим уделом монтморилонита формирају водонестабилне агрегате. Код таквих земљишта, на пример, смоница, агрегати се лако распадају у присуству влаге. Они постају лепљиви када су мокри и веома чврсти када су суви.

Измењиви катјони. Формирање покорице земљишта укључује дезинтеграцију и дисперзију агрегата. На дисперзију колоида у земљишту утиче природа и дистрибуција измењивих катјона који окружују електростатичким силама колоидну површину. Измењив јон натријума (Na^+) је мобилнији од водониковог јона (H^+), калцијума (Ca^{2+}), магнезијума (Mg^{2+}) и других поливалентних катјона. Како проценат измењивог јона Na^+ расте, потребан је раствор много веће концентрације да изазове флокулацију. Другим речима, глина са високим процентом измењивог натријума брзо ће дисперговати услед ефекта разблаживања кишом на површини земљишта.

Органска материја. Органске супстанце могу стабилизovati структуру земљишта на два различита начина: (1) органске супстанце могу смањити интеракцију воде са неорганским колоидима и (2) могу везати честице земљишта физички или хемијски. Хумини имају улогу цемента тако што међусобно везују честице. Органски полимери имају дуж своје структуре крајеве које садрже негативне и позитивне функционалне

групе као што су амидна, карбоксилна, хидроксилна и друге групе које могу бити поларизовати.

Гвожђе и рН. Оксиди гвожђа могу да ступе у интеракције са честицама земљишта. Земљишта богата каолинитом имају доста оксида гвожђа и нижа рН може довести до формирања покорице.

Управљање земљиштем. Смањена инфилтрација је највећи проблем код оваквог земљишта. Мала инфилтрација доводи до повећаног отицања и ерозије и смањује доступну влагу земљишта за биљке. Постоје три методе за повећање инфилтрације: коришћење додатака на земљиште, конзервациона пољопривреда и адекватно управљање обрадом земљишта. Ове методе се могу користити одвојено или комбиновано.

Додаци земљишта. Користе се различити додаци који се могу применити у циљу смањења дисперзије агрегата у земљишту. Један од начина да се смањи ризик од појаве коре је побољшање структуре земљишта и стабилности агрегата површине земљишта. Повећање концентрације електролита на површинском слоју додатком калцијум-сулфат хидрата може дати добре резултате.

Фосфогипс се прилично лако раствара током кишних олуја и ослобађа калцијум и сулфатне јоне у земљишни раствор како би се довољно високим концентрацијама спречила дисперзија глине. Додавањем фосфогипса побољшавају се физичка својства земљишта заменом јона Na^+ са јоном Ca^{2+} у земљишним колоидима.

Побољшање структуре земљишта и смањено формирање коре коришћењем органских полимера (нпр. ПАМ-полиакриламида) интезивно се испитује.

Конзервациона пољопривреда ефикасно смањује стварање покорице земљишта. Она укључује неке специфичне приступе у обради земљишта: остављање земљишта без обраде, употребу малче и минималну обраду земљишта. Ови системи се широко користе у САД и Аустралији да се спречи ерозија изазвана водом и ветром. Постоје два главна циља за ову врсту пољопривреде: (1) побољшање физичких и хемијских својстава земљишта и (2) заштита површине земљишта од разорних сила кишних капи коришћењем малчева или заштитног покривача. Интеграција ова два приступа уобичајено даје добре

резултате. Употреба покривача и малча смањује губитак воде и ерозију значајно.

Адекватна обрада земљишта. Управљање земљиштем са формираном кором укључује избор оруђа за обраду земљишта, разматрање оптерећења, операција за обраду земљишта као што је број обртаја плуга и временски распоред обраде у односу на временске услове.

3.3.1.2 Збијање/сабијање земљишта

Збијање је обично физичка консолидација земљишта настала применом силе пореклом од упоребе оруђа за обраду земљишта, који уништавају структуру земљишта, смањују запремину земљишта, повећавају насипну густину, смањују порозност и ограничавају кретање воде и ваздуха унутар земљишта.

Површинско заптивање, формирање коре и стврдњавање земљишта су заправо неке врсте сабијања које настају у површинским слојевима као последица нарушавања структуре земљишта. Понекад се консолидација разликује од сабијања земљишта. Консолидација земљишта се сматра процесом којим се засићено земљиште сабија под дуготрајним оптерећењем што је праћено смањењем порозности са отицањем воде. Насупрот томе, сабијање земљишта сматра се процесом у коме се незасићено земљиште сабија оптерећењем које се примењује кратко време без отицања воде.

Успорен раст биљака, плитко и деформисано корење биљака, забаривање, формирање великих грудвица након обраде и велика густина земљишта су знаци сабијеног земљишта. Сабијање земљишта је описано као једно од пет ризика по одрживи квалитет земљишта у ЕУ. У свету постоји око 68,3 милиона хектара збијеног земљишта, што чини 4% деградације земљишта антропогеног порекла.

У Европи, сабијање чини око 17% укупно деградиране површине. То је сложен проблем у којем интеракције између оруђа/земљишта /усева/времена играју важну улогу и могу имати економске и еколошке последице по пољопривреду на глобалном нивоу. Сабијање земљишта је глобални проблем који је обично повезан са тешком механизацијом у пољопривреди. То изазива смањење приноса у просеку око 25–50% у неким деловима Европе и Северне Америке и између 40 и 90% у западноафричким земљама.

Постоје две врсте збијања/сабијања земљишта: плитко и дубоко. Плитко сабијање настаје у површинским слојевима земљишта и може се разбити нормалном обрадом. Формирање површинске покорице и стврдњавање земљишта су врсте плитког сабијања земљишта. До дубоког сабијања долази углавном као последица осовинског оптерећења. Дубоко сабијање може да се протеже и до 75 cm испод површине. Ово је изузетно тешко исправити јер је испод уобичајене зоне обраде. Дубоко сабијање смањује складиштење воде и ваздуха у дубљим слојевима земљишног профила и омета раст биљака. Развијање пуног кореновог система дубоко укорењених биљака као што је кукуруз и детелина луцерка смањују дубоко сабијање. Последица сабијања земљишта је и погоршање водног режима земљишта. У збијеном земљишту смањују се количина приступачне воде за биљке, јер се вода налази претежно у микропорама где се држи јачим силама, услед чега је и непокретна.

Узрок сабијања земљишта није увек антропогеног порекла. У природи постоје земљишта са сабијеним слојевима и/или хоризонтима. За разлику од сабијања земљишта које је резултат деловања човека, слегање земљишта је природни процес, изазван пре свега масом земљишта. Слој земљишта од 20 cm врши притисак од 250-350 kg/m². Падавине проузрокују, пре свега површинско слагање.

Слегање слично сабијању неповољно се одражава на хемијске и микробиолошке процесе земљишта, пошто се при томе нарушава ваздушни и водни режим земљишта. Сабијени слој земљишта, настао као последица његовог слегања, потребно је обрадити оруђима за површинску обраду. На тај начин се успоставља водни и ваздушни режим земљишта важног предуслова неометани раст и развој биљака.

Фактори који утичу на збијање земљишта. Сваки процес који смањује порозност узрокује сабијање земљишта. Пољопривредне машине нпр. трактори и други прикључци могу сабити земљиште када се користе током обраде земљишта. Степен сабијања зависи од многих фактора: физичких услова земљишта као и тежине и оптерећења на земљиште, расподеле оптерећења на број осовина и гума и број прохода на терену. Текстура земљишта, структура, органска материја и вода су важни фактори земљишта који одређују осетљивост земљишта на сабијање. Земљишта састављена од честица приближно исте величине мање су компактна у односу на земљишта са различитим величинама честица.

Мање честице могу да попуне поре између већих честица што резултује повећањем густине. Земљиште са вишим садржајем органске материје углавном има бољу структуру. Сува земљишта се не сабијају лако. Обрада сувише сувог земљишта распршује структурне агрегате са великим уделом праха. Сабијање земљишта се повећава са повећањем садржаја воде у земљишту током обраде. Земљиште које је засићено водом не подлеже сабијању с обзиром да вода заузима поре, а вода није компресибилна. Земљишта се лако сабијају при мало већем садржају воде у односу на пољски водни капацитет земљишта. *Слика 3.2* приказује однос између садржаја воде и сабијање земљишта.



Слика 3.2. Ниво влажности земљишта и сабијање

Главни узрок сабијања земљишта је употреба тешке механизације током пољопривредне производње. Пољопривредни трактори, комбајни и друга опрема је велика и тешка. Трактори су тежине до 20 тона, а машине за примену течног стајњака могу тешке чак и 15 тона при пуном оптерећењу. Сваке године, при основној обради, припреми земљишта за сетву гранични слој обрадивог земљишта изложен је дејству машина и оруђа. Поједине пољопривредне машине не сабијају земљиште једнако. Сматра се да од пољопривредних машина и транспортних средстава, земљиште највише сабијају камиони и камионске приколице, затим трактори, па комбајни за кукуруз. Трактори гусеничари најмање сабијају земљиште.

До сабијања земљишта при употреби механизације долази услед притиска точкова и гусеница на земљиште. Притисак точкова и гусеница делују на земљиште по дубини и бочно. Формира се збијени слој земљишта, који подривачима треба разбити. При гажењу земљишта

на структуру и сабијање, осим оптерећења утичу и ефекти клизања точкова који могу бити много већи од самог оптерећења.

Штетно дејство клизања на структуру земљишта нарочито долази до изражаја на влажном, поквашеном земљишту. Повећање масе машина и њиховог терета појачава сабијање земљишта. Интезитет сабијања земљишта зависи и од других фактора као што су: број прохода по парцели, врсте точкова, притиска у гумама, влажности и типа земљишта. Зависно од употребљене механизације, особина земљишта сабијање се осећа и до 1 m дубине.

Управљање сабијеним земљиштем. Проблеми повезани са сабијањем земљишта су мала инфилтрација, велико отицање, слабо продирање корена, мала доступност воде у земљишту и лоша аерација. Дакле, управљање сабијеним земљиштем подразумева:

- избегавати компактност земљишта,
- избегавати прекомерну обраду земљишта,
- избегавати обраду земљишта када је превише влажно (односно мало више од пољског водног капацитета),
- побољшати инфилтрацију,
- смањити отицање,
- смањити евапотранспирацију,
- смањити број прохода,
- користити лакше машине,
- уводити гусенице као елементе ходног система,
- смена културе које захтевају мањи број прохода механизације,
- применити органска ђубрива,
- изабрати технологију производње и структуру сетве према климатским условима.

3.3.1.3 Забаривање земљишта

Забаривање је стање засићења земљишта водом током дужег периода. Земљиште понекад може бити засићено водом на врло кратко време и до неколико сати. Ова привремена и краткорочна стагнација се не сматра забаривање. Ова вода се лако одводи. Забаривање је стање

земљишта када је одвођење вишка воде тешко и захтева неко време, рад, планирање и енергију.

Појава забаривања је повезана са нерационалном применом наводњавања и високим нивоом подземне воде. Забаривање, висок ниво подземних вода, као и унутрашње воде неповољно утичу на већину гајених биљака, не толико због вишка воде, колико због недостатка кисеоника. Чак и када се земљиште засити водом оно садржи извесну количину кисеоника у виду ваздушних мехура који се налазе у води. Ова количина ваздуха није довољна за биљке. Ако је земљиште дуже време потпуно засићено водом, долази до изумирања биљака.

Забаривање се такође дешава када се ниво подземних вода подигне до зоне корена и остаје током дужег временског периода у току године. Око 10% наводњаваних површина широм света је означено као забарено. Као резултат тога, продуктивност у њима опада за око 20%. Изглед забареног земљишта је дато на *слици 3.3*.



Слика 3.3 Изглед забареног земљишта

Узроци забаривања. Забаривање настаје као последица различитих узрока, који укључују природне услове и антропогене активности.

Природни услови као што су обилне кише, низоземске површине, глиновито земљиште, поплаве и присуство непропусног површинској слоја.

Људске активности које доводе до забаривања су неадекватно наводњавање, неадекватна дренажа, површинско заптивање и дубоко сабијање земљишта, сабијање применом тешке механизације. Мочварна подручја су површине трајно преплављене водом.

Најважнији узроци забаривања су лоша дренажа услед сабијања и раст нивоа подземних вода. Сабијање, укључујући површинско заптивање, стварање покорице и дубоко сабијање резултат су недостатка органске материје, пропадање структуре, дисперзије, компресије и консолидације. Ови процеси настају као последица неадекватне обраде земљишта и оптерећењем односно притиском тешке механизације. Сабијање земљишта смањује хидрауличку проводљивост, самим тим смањује инфилтрацију и перколацију. У неким ситуацијама вода се акумулира и долази до подизања нивоа подземних вода према површинским слојевима земљишта.

Подизање нивоа подземних вода спречава респирацију кореновог система и ограничава нормално функционисање. Висок ниво подземних вода такође може довести до салинизације земљишта и смањити принос усева. У земљиштима у којима постоји дубока сабијеност, раст кореновог система је ограничен, а вишак воде од наводњавања не може лако да прође кроз непропусни слој.

Коренов систем се налази у површинском слоју односно плитко и доводи до забаривања. У неким случајевима, непропусни слој се може појавити испод горњих пропусних слојева. У овим случајевима, услед недостатка природне, мора се планирати и добро поставити вештачка дренажа односно системи за одводњавање. Често овакви системи не раде задовољавајуће, а поред тога често нису постављени на одговарајућу дубину.

Забаривање земљишта смањује његову аерацију. После неколико дана забарености, садржај кисеоника у земљишту може бити потпуно смањен. Раст усева и принос се смањују као последица измењених физиолошких процеса односно малог садржаја кисеоника и смањене респирације кореновог система у забареном делу земљишта. Поред тога,

забаривање не дозвољава праћење календара сетве. Процеси припреме земљишта за култивацију, као што су обрађивање и орање, не могу се изводити једноставно на влажном земљишту. Орање, сетва и садња се најчешће одлажу као последица забарености земљишта. На овај начин, многе забарене површине претварају обрадиво земљиште у пусте области.

Подизање нивоа подземне воде доводи до растварања соли из земљишта у излуживања у подземну воду. У горњим слојевима земљишта вода непрекидно испарава остављајући соли у земљишту. Дакле, висок садржај воде доводи до заслањивања земљишта, које је тешко контролисати. Заслањено земљиште има смањену продуктивност.

Смањење нивоа подземних вода. Вода која се налази испод површине земље у порама и пукотинама и стенама назива се подземна вода. Највиши ниво подземне воде познат је као „водена табла“. Водена табла је граница између незасићене и засићене зоне. Представља горњу површину подземних вода. Поре земљишта постају у потпуности засећена водом све до нивоа подземних вода. Инфилтрација воде у засићену зону земљишта назива се прихрањивање подземних вода. Допуњавање или прихрањивање подземних вода је хидролошки процес где вода креће наниже од површинских слојева до подземних вода. Овај процес се обично дешава у вадозној зони испод кореновог система биљака и често је изражен као флукс површине водене табле. Допуњавање може бити као резултат природних и/или антропогених процеса. Ресурси за допуњавање подземних вода обухватају процесе који настају као резултат природних и индикованих догађаја. Природни извори су допуњавање преципитацијом, језерима, барама и рекама и из других водоносних слојева. Људски-индуковано прихрањивање је последица: прекоморног наводњавања, оштећења водоводне и канализационе мреже, септичких јама и прекомерног наводњавања паркова, башта и других јавних површина. Прихрањивање из ових ресурса је класификовано као директно перколацијом падавина и индиректно прихрањивањем од отицања површинских вода. Када допуњавање подземних вода премашује отицање, ниво подземних вода расте. Када црпљење и испуштање подземних вода премашује прихрањивање, долази до опадања нивоа подземних вода.

Губитак воде из ресурса подземне воде познат је као црпљење подземних вода. Често велики део, речне воде филтрирањем кроз корито

реке доспе до подземних вода. Пропорција површинске воде која долази до подземних вода варира у зависности од географије, геологије и климе региона. Кретање подземних вода у овим правцима познато је као црпљење подземних вода. То је уклањање воде из подземних вода. Такође има доста подземних вода које се добијају из плитких и дубоких цевних бунара у урбаним и пољопривредним срединама. Највећа последица прекомерног захватања подземних вода је смањење нивоа подземне воде. Ово може довести до несташице воде у будућности као ресурса воде за пиће и у сврху пољопривреде. Споредни ефекат црпљења подземних вода је смањење нивоа подземне воде испод дубине која је битна за вегетацију. Укупни ефекат је губитак вегетације и биодиверзитета.

Дакле, ниво воде треба да буде одржив на одређеној дубини испод површине земљишта. Смањење нивоа подземне воде великих размера сматра се важним узроком дезертификације.

3.3.1.4 Слегање органских земљишта

Слегање је смањење нивоа земљишта услед компресије, консолидације, сабијања и оксидације органске материје. Посебно је изражено код култивације тресетних земљишта (Хистосолс). Слегање је дуго представљало озбиљан проблем у мелиорацији и развоју тресетних земљишта. Суви површински слојеви доводе до појачане аерације земљишта, тако да рекултивација тресетног земљишта доводи до оксидације ових слојева.

Искуства из Холандије показују да је рекултивација тресетних подручја довела до постепеног слегања и смањила ниво земљишта са 0,5 m изнад средњег нивоа мора на 1-2 m испод.

Процењује се да је дошло до слегања земљишта у периоду од осмог до десетог века за око 2 m. Око 85% овог слегања потиче од оксидације органске материје, а наставиће се великом брзином од 5 cm/години.

Одводњавање, ниво воде и оптерећење тешком механизацијом утиче на брзину и обим слегања. Слегање узроковано сабијањем различитих слојеви земљишта при датом садржају глине опада са дубином. Што је већа дебљина сабијеног слоја, то ће слегање бити веће. Пољопривреда са тешком механизацијом значајно сабија тресетно земљиште.

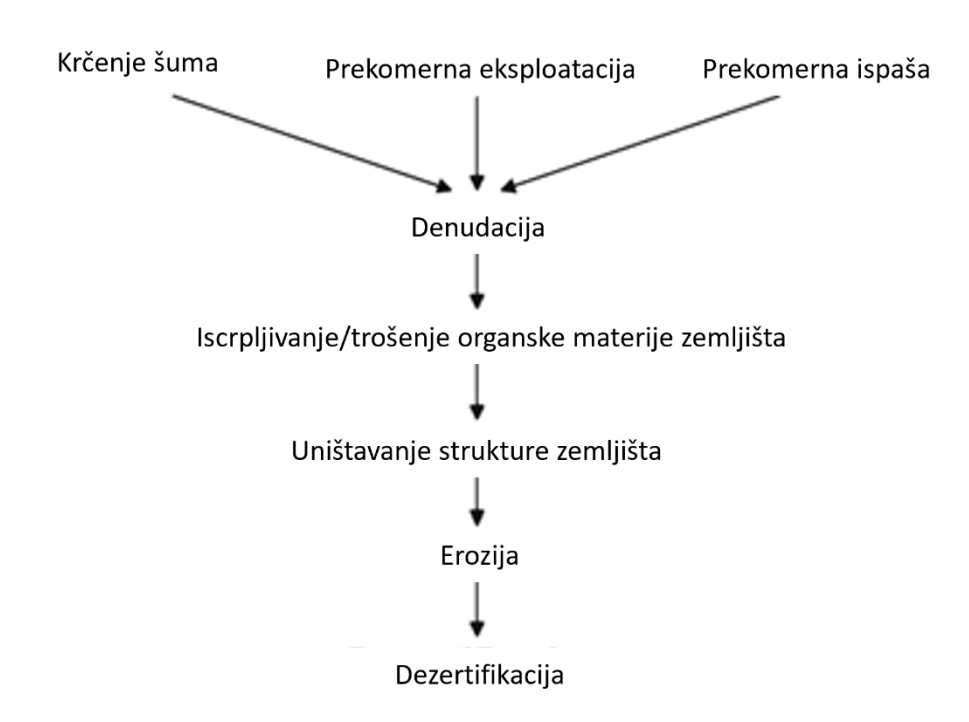
3.3.1.5 Дезертификација

Дезертификација је процес деградације земљишта који се јавља углавном у аридним и семиаридним регионима као последица људских активности и у комбинацији са неповољним климатским условима. Биолошка активност се губи као последица природних процеса или као последица људских активности при чему плодна подручја постају сушна. Једна од дефиниција дезертификације је: „Дезертификација је сиромашење копнених екосистема као последица људских активности. То је процес деградације земљишта који може довести до смањеног приноса усева, промене у биомаси и разноврсности микро- и макрофауне и флоре, убрзаног пропадања земљишта и повећане опасности по здравље и живот људи.” Због дезертификације, шуме, травњаци и обрадиве површине се претварају у пустиње. Дезертификација је у фокусу међународне заједнице од 1970. год. због девастирајућег и дестабилизујућег потенцијала на животну средину, човека и друштво. На основу процена Уједињених нација, овај феномен је уочен код 70% сушног земљишта, што чини око 30% светског обрадивог земљишта. Проблем је посебно озбиљан у Африци и у неколико земаља у развоју у Азији.

Десет милиона хектара обрадивог земљишта односно 24 милијарде тона површинског слоја земљишта губи се сваке године због дезертификације. Глобални проблеми узроковани дезертификацијом су губитак биолошке продуктивности и изглед пејзажа.

Природна или људски индукована дезертификација. Узроци дезертификације су сложени, могу бити локални и варирају од једног до другог региона широм света. Углавном је утицај већи у мање развијеним земљама. Једна група научника сматра да је дезертификација искључиво природна појава која настаје услед флуктуације у краткорочним и дугорочним сушним временским периодима. Друга група научника сматра да је дезертификација изазвана људским активностима и да је резултат притисака на ресурсе земљишта, неадекватне политике управљања и злоупотребе земљишта. Области осетљиве на дезертификацију су неразвијена земљишта и земљишта без биомасе. Вегетација у аридним и семиаридним регионима је природно крхка, а притисак на вегетацију и земљиште велики, технолошка подршка као и климатски услови неадекватни. Прекомерна испаша, крчење шума и друге пољопривредне активности допринесе дезертификацији са 35; 30

и 28%, редом. Предложена шема настанка дезертификације приказана је на слици 3.4.



Слика 3.4 Појава дезертификације земљишта

Интензивна пољопривреда пракса са прекомерном употребом хемикалија (ђубрива, пестицида), неадекватна технологија обраде и избор културе, прекомерно наводњавање изнад нивоа усвајања подземне воде, додатно повезано са процесом заслањивања доводи до проблема дезертификације у угроженим регионима. Процењује се да је око 7,1 милиона km^2 земљишта изложено малом ризику од дезертификације, 8,6 милиона km^2 је под умереним ризиком, 15,6 милиона km^2 под високим ризиком и 11,9 km^2 са веома високим ризиком.

Антропогени утицаји који доводе до дезертификације су губитак вегетације, крчење шума, смена култивације, прекомерна испаша, експлоатација подземних вода и збијање земљишта. Ови фактори доводе до дезертификације што је процес континуиране и постепене деградације екосистема, током којег су биљке, животиње и други природни ресурси као што су вода и земљиште под стресом изнад њихове способности прилагођавања на настале услове. Промене

физичких карактеристика земљишта су прогресивни губитак зреле, стабилне вегетације, или губитак биљног покривача резултирајући губитком неконсолидованог горњег слоја земљишта.

Прекомерна испаша је главни узрок дезертификације на глобалном нивоу. Уништавање вегетације у аридним регионима у циљу добијања огревног дрвета као и спаљивање вегетације одговорни су за денудацију земљишта. Денудација представља процес спирања и одношења површинског слоја земљишта и огољивање стеновите подлоге. Интензитет денудације зависи од количине падавина, нагиба терена и вегетације. Лоша пракса наводњавања у сушним подручјима може узроковати заслањивање, што спречава раст биљака. Смањује се садржај органске материје земљишта као последица смањене производње биомасе и појачане разградње. Структура земљишта је уништена и честице земљишта се уклањају ерозијом воде и ветром. Континуирана ерозија доводи до изложености подповршинских слојева које нема довољан капацитет да подржи вегетацију. Ерозија водом и ветром доводи до развоја јама и пешчаних дина на површини земљишта.

3.4 Ерозија земљишта водом

Ерозија је природни процес одношења честица земљишта и њиховог транспорта и таложења на удаљене локације природним агенсима као што су вода, ветар, лед и гравитација. Разбијање земљишних агрегата на честице првенствено ударима кишних капи и водом и њихово спирање са површине земљишта представља ерозију земљишта изазвану водом.

Смањује се плодност земљишта као последица уклањања површинског слоја који је најбогатији нутријентима. Ерозија водом настаје у сваком окружење где земљиште није покривено биљкама и има нестабилну структуру.

Природна ерозија се сматра нормалним процесом и обично изазива малу забринутост са становишта квалитета земљишта с обзиром да је стопа овог губитка ниска, а и губитак земљишта се може природно надокнадити формирањем новог слоја земљишта.

Антропогене активности као што су крчење шума, прекомерна испаша, прекомерна обрада и промена културе убрзали су ерозију изнад границе толеранције земљишта. Процењени опсег толеранције је 2–11 t/ha/год. у зависности од типа земљишта. Ово су вредности које су усвојене у САД.

Постоје места и ситуације где су стопе ерозије много веће од ових граница, чак и до 100 t/ha/год.

Главне врсте водне ерозије земљишта су ерозија кишним капима, ерозија листовима, ерозија браздама, каналска ерозија, клизишта, одрони и ерозија обале река/потока. Ефекти ерозије се могу испољити на месту ерозије и ван места ерозије. Ефекти на месту ерозије су губитак дела земљишта, губитак органске материје и нутријената, оштећење усева, изложеност кореновог система и смањење плодности и продуктивности земљишта. Ефекти ван локалитета су затрпавање усева и инсталација нанетим земљиштем, замуљивање резервоара, еутрофикација површинских вода, загађење вода, итд. За сузбијање водне ерозије примењује се различита агрономска и инжењерска пракса као што су необрађена или минимално обрађена земљишта, малчирање, употреба буфер трака (заштитна трака од биљног материјала око водених површина), ротација усева, градња брани (у циљу спречавања поплава), контурно обрезивање и терасаста садња. Обично је потребно неколико метода интегрисати у циљу ефикасне контроле ерозије земљишта.

Узроци ерозије земљишта укључују крчење шума, прекомерну испашу, спаљивање биомасе, смену култивације, механизовану сетву, култивацију уз и низ падину, моникултуру и сабијање земљишта испашом и машинама. Физички типови деградације земљишта који доводе и до ерозије разматрани су у претходном поглављу.

Овде треба напоменути да је водна ерозија значајан проблем земљишта на падинама. Нарушавање или мењање падине нпр. за припрему земљишта за сетву је веома ризично на овим локалитетима. Смањење ризика у оваквим ситуацијама доводи минимална обрада земљишта и малчирање. Ако је нагиб падине једнак или већи од 20° треба га оставити под природним условима јер ће култивација дуж падине изазвати јаку ерозију водом. Корисно је на таквим местима развијати шуме и траве.

У великој мери својства, којима се земљиште одупире ерозији зависи од стадијума развоја земљишта. Еволуционо генетски стадијум дат је у *табели 3.2.*

Табела 3.2. Еволуционо генетски стадијум земљишта

(A)-C→	A-C→	A-(B)-C→	A-E-Bt→	A-E-g-Bt-C
Литосол	Хумусно акумулативно земљиште	Камбично земљиште	Илимеризовано земљиште	Псеудоглеј
$K_{(A)-C} <$	$K_{A-C} <$	$K_{A-(B)-C} <$	$K_{A-E-Bt} <$	$K_{A-E-g-Bt-C}$

Млађи еволуционо генетски стадијуми земљишта, по правилу, имају већи садржај органске материје, стабилније структурне агрегате и бржу филтрацију кроз цео профил, а тиме и мањи фактор еродибилности. Са повећањем развојног стадијума смањује се садржај органске материје и стабилност структурних агрегата, повећава садржај глине, а у дубљим слојевима ствара се илувијални хоризонт, који смањује брзину филтрације воде кроз цео прпфил.

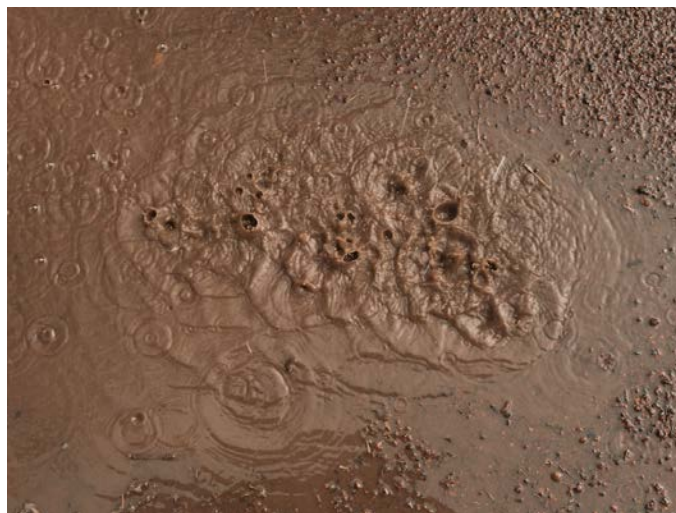
Типови водне ерозије. Ерозију водом изазива вода – вода која долази кишом и отиче са земљишта као процесима спирања или као струјни ток. У почетној фази, честице земљишта се расипају из форме агрегата ударом кишних капи или воде која тече што је праћено транспортом ових честица заједно са водом. Овако оптерећена вода суспендованим честицама доводи до још додатног одношења честица са површине земљишта на свом путу отицања.

Ерозија земљишта је процес губитка земљишта, посебно са површине, али понекад може доћи до губитка и велике масе земљиште као код клизишта и код ерозије обала реке. Следећа четири типа водне ерозије су генерално позната: ерозија кишом/распришивањем (плувијална ерозија), плочаста ерозија (енг. sheet erosion), ерозија јаругама и браздама и каналска ерозија.

Кишна и ламиарна ерозија понекад се називају ерозијом каналима, јаругама и браздама.

3.4.1 Ерозија кишом (плувијална ерозија)

Плувијална ерозија изазвана је дејством кишних капи на земљиште. Кишне капи својом кинетичком енергијом нарушавају структурне агрегате земљишта и припремају земљишне честице за транспорт (слика 3.5). Транспорт честица земљишта одвија се у суспензији површинских токова који се, на нагнутим теренима, успостављају увек када је интензитет падавина већи од брзине инфилтрације воде у земљиште.



Слика 3.5. Удар кишних капи о површину земљишта

Интензитет ерозионих процеса зависи од: интензитета агенса ерозије (у случају плувијалне ерозије од интензитета и кинетичке енергије кише), заштићености земљишта вегетационим покривачем који штити земљиште од директних удара кишних капи, нагиба терена и могућности успостављања површинских токова и способности земљишта да се сумом својих својстава одупре агенсима ерозије.

Настале честице распршивањем агрегата зачепљују велике поре земљишта и на тај начин се смањује капацитет инфилтрације земљишта. Вода не може да буде усвојена од стране земљишта, а плитак слој воде може прекрити површину земљишта. Даље, капи кише ударају у воду и распршују осушене честице земљишта. Честице земљишта се преносе на одређену удаљеност распршивањем. Распршене честице се могу уздићи и до 60 cm изнад земљишта и на растојања већа од 1,5 m од места удара. Процеси ове ерозије су удар кишних капи, распршивање агрегата земљишта и формирање кратера. Заправо, ерозија кишним капима представља почетак других врста ерозије земљишта. Овај тип ерозије је увод за плочасту ерозију.

3.4.2 Ерозија плоча

Када се танак слој земљишта уклони ударом кишних капи и плитким површинским токовима са целе површине назива се ерозија листова. Ерозија листова се јавља када се вода скупља на површини и креће

малим потоком, уклањајући широко распрострањен, танак слој земљишта дуж пута. Уклања се површински слој земљишта са садржајем нутријената и органске материје. То је најопаснији тип ерозије земљишта с обзиром да настаје постепено и готово неприметно остављајући за собом малу масу земљишта или чак потпуно уклоњен површински слој земљишта.

Поред честица земљишта, ова ерозија уклања (1) органску материју из површинског слоја земљишта и (2) растворене и лако растворене материје, материје које се растварају у слабо киселим растворима каква је кишница.

Ерозија листова се развија у две фазе. Сматра се да је прва фаза ове ерозија заправо ерозија изазвана кишним капима, где на површини настају селективно мале шупљине, микропирамиде и други облици, ерозија кишних капи тако постаје део ерозије подлоге итд. Одвојене честице се крећу низ падину са водом која тече и раствара честице и носи седимент. Ерозија уклања равномерно слој земљишта низ целу површину. Честице земљишта најчешће се одвајају првенствено помоћу капи кише, али могу бити распршене и секундарно нпр. мразом, копитама домаћих животиња, обрадом земљишта и механичким дејством пољопривредних машина. Плочаста ерозија је равномерна и постепена, како површина постаје клизавија. Међутим, вода се и даље може акумулирати чак и када је површина клизава и јако глатка. Интензитет акумулације воде од спирања зависи од висине струјања, храпавости површине, вегетације или дистрибуције усева. Ова ерозијом уклања дубљи слој земљишта постепено, ако се одвија несметано, а велика површина подземља може бити изложена спољашњој средини. Подземље је обично различите текстуре, боје и збијености. Међутим, површина је уједначена на целом подручју, а вода се акумулира у малим каналима, тако да је површина испресецана дисконтинуалним каналима, и тада се назива каналска ерозија.

Други подтип плочасте ерозије је ламинарна ерозија. Јавља се у било ком току воде на косој површини земљишта (падина) где је кинетичка енергија воде мала и само се ситне, фине честице земљишта спирају на изразито селективан начин и на удаљене површине. Услед накупљања, струјања и спирања воде, долази до формирања каналске ерозије која изазива формирање малих бразда/канала са пречником од неколико центиметара, и дубине која не прелази дубину обрадивог слоја. Тако

настале мале бразде се постепено повећавају и укањају култивацијом. У овом облику ерозије, земљиште и честице однешене водом могу се интензивно одвајати и сортирати. Код ерозије слоја, земљиште се не испира ламинарном ерозијом и формираним браздама, већ у слоју ширине до неколико метара и дубине 10–25 cm са обрађене површине, односно у привидним тракама са којих је горњи слој земљишта потпуно уклоњен.

3.4.3 Ерозија бразда

У случају када падавине превазиђу брзину инфилтрације земљишта, вода се акумулира на површини, ако је земљиште на падини почиње да се креће уз њу. На земљиштима са благим нагибом, са усевима или на површинама које су обрађене, вода оптерећена честицама земљишта се креће дуж формираних шупљина које се зову бразде или канали. Бразде су мање од 30 cm дубине. Количина губитка земљишта може бити велика, с тим да формиране бразде обично не доводе до већих проблема код обраде земљишта. Бразде се могу изравнати уобичајеним операцијама обраде земљишта. Ова врсте ерозије је обично почетна фаза развијања велике каналске ерозије.

Ерозија браздама у великој мери доводи до последица транспорта и наношења велике количине материјала који се депонују на удаљене области. С друге стране, струјање воде преко површине има мањи утицај на одношење земљишта, али већи ефекат транспорта на удаљене локације. Ипак, вода која тече браздама, посебно на обрађеном земљишту, може постати медијум транспорта различитих материја и честица које се губе механичким, хемијским или неким другим путем при чему тај транспорт може бити другачији од самог тока воде, и стога је овај феномен од великог значаја са становишта укупног губитака земљишта. Долази до забаривања земљишта као последица смањене инфилтрације, великих падавина и храпавости површине земљишта. Вода се концентрише дуж формираног плодореда током обраде земљишта, бразда, редова усева, итд. Дужи период забаривања земљишта мења укупну количину воде.

При високим интензитетима падавина долази до већег зачепљења пора, при чему расте садржај воде на површини земљишта и број однешених честица земљишта кишним капима.

Овај тип ерозије најчешће се јавља на стрмим падинама са непропусним материјалом земљишта, а који се састоји од млађих седимената који су подложнији ерозији. Ерозија браздама утиче на целу дужину нагиба, што значи да оборинска вода, чим доспе у земљиште, отиче формираним браздама и практично сече падину на танке плоче.

На непропусном и отпорном материјалу, ерозија браздама формира гребене који су развојени оштро усеченим рововима и браздама. Бразде су повремено толико уске да личе на пукотине, и то се може назвати ерозија пукотинама. На стрмим падинама материјали различите отпорности, вертикално формирају шупљине, који се убрзо развијају у каналаску ерозију. Ако је материјал више хомоген и нагиб мање стрм, преовлађује ерозија браздама. Ако земљиште има крупнозрнасту и мање отпорну структуру, вода која тече брзо носи земљиште и ствара троугласте или коритасте форме канала. Што земљиште има крупније честице и пропуснији материјал, мање је изражено каналисање, бразде не добију широк облик, и више имају облик умерено таласастих удубљења, чак и на веома стрмим деловима еродираних падина. Ерозија браздама се обично јавља у доњем делу падине. Ово је посебно изражено када долази до отапања снега или код падавина слабог интензитета. Чим се интензитет падавина повећа, интензитет и брзина површинског отицања се повећавају, а у зависности од пермеабилности земљишта долази до ерозије.

3.4.4 Каналска ерозија

Каналска ерозија подразумева формирање канала дубљих од 30 cm. Канали се развијају када се велике количине воде акумулирају и теку кроз један канал великом брзином на релативно стрмој падини. Канали се такође могу развити постепеним продубљивањем бразда. Постоје две врсте канала: ефемерни и стални/трајни. Ефемерни канали су плитки канали који се могу лако кориговати рутинском обрадом земљишта. С друге стране, трајни канали су веома велики и не могу се изравнати редовном обрадом земљишта. Постепеним продубљивањем бразда настају канали различитих величина и облика.

Поред ретроградне и вертикалне ерозије овде се јавља и латерална ерозија, заједно са пратећим клизиштима, одроњавањем земљишта и другим појавама. Вододерине (корита и жлебови) могу прерасти у

клизуре и кањоне на великим надморским висинама и веома стрмим падинама.

Канали имају широко дно и имају облик слова U. Латерална ерозија је овде доминатнија у односу на дубинску ерозију. Често се дешава да новији облици замене старије облике канала, тако да се њихово порекло и старост не могу проценити површинским посматрањем. Главна карактеристика каналске ерозије је запремина и брзина воде која је на најмањем нивоу. Енергија текуће воде повећава њену снагу резања и разбијања и често доводи до ерозије обале.

3.4.5 Остали типови водне ерозије

Понекад обрада земљишта постаје интензивна и континуирана, драстично мења функције земљишта што изазива ерозију земљишта. Нови тип ерозије који је данас чест, зове се „ерозија настала обрадом земљишта“, која се односи на постепено уклањање или преношење земљишта низбрдо узроковано операцијама обраде земљишта. Руковање механичким оруђем за обраду земљишта транспортује земљиште, а овде не учествује вода. Транслокација земљишта обрадом се изражава у јединицама запремине, масе или дубине по јединици ширине обрађеног земљишта.

Померање великог блока земљишта и реголита надоле изазвано гравитацијом назива се одрон и клизиште. Овај вид ерозије настаје када терет саме земље, услед дејства гравитације, одвоји слој земљишта. Одрони и клизишта су чести на стрминама, тако да су честа појава у планинским регионима.

Одрони настају када земљиште, пуно камења, попусти и сруши се услед дејства гравитације. Постоје многе технике које се примењује у грађевинарству, чији је циљ заштита од одрона, а једна од њих је пољопривреда. Реч је, наравно, о сетви култура са дубоким корењем на местима где је могућ одрон. Могу да се користе исте културе као и за спречавање водне ерозије. Овај метод није решење, али помаже да се неизбежан проблем одгоди.

Клизишта су велики проблем који је тешко санирати. Настају тако што се један слој земљишта, услед упијања великих запремина воде, претвори у течан глиб, који клизи низбрдо и повуче све са собом. Под

клизиштем подразумевамо стеновиту или растреситу масу која је одвојена од подлоге, под утицајем гравитације, клизи по клизној површини. Обухвата мноштво различитих покрета земљане масе низ природне падине и вештачке косине под директним утицајем гравитације.

Најчешћи узроци појаве клизишта су:

- повећање нагиба падине (усецање путева, грађевински радови);
- промена нивоа подземне воде (пораства нивоа воде уз ножицу косине, нпр. успоравањем воде реке уз ножицу, промене вегетације на површини терена (крчење шуме и огољавање, претварање пашњака у оранице, воћњаке), већих климатских промена (обилне падавине након дуготрајног сушног периода), лоше дренираних површинских вода, неконтролисаног развођења воде попадини.
- смањење чврстоће материјала у косини и
- додатно оптерећење падине.

Проблем настаје када се тај слој земљишта налази на већој дубини од једног метра. Код готово свих падина неизбежна је деградација услед природног процеса трошења и транспорта материјала низ падину. На већини падина то је континуирани, врло спор процес. Нека клизања се догађају као изненадни драматични догађај на падинама које су пре тога биле дуго стабилне.

Основни елементи клизишта: 1. Ожиљци – су у време активности клизишта обично његов најупадљивији део. Они представљају једини видљиви део клизне површи; 2. Клизна површина – је површина по којој је дошло до клизања. Дубина клизне површине може да буде и до неколико десетина метара; 3. Тело (под телом клизишта подразумева се материјал покренут клизањем); 4. Увала – је депресија која се јавља на телу клизишта непосредно иза ожуљка; 5. Трбух – клизишта је највиши део на телу клизишта и јавља се испред увале; 6. Ножица клизишта – је доњи део тела клизишта и налази се на супротној страни од ожиљка. Основни типови клизања су:

1. Одроњавање је одвајање масе са стрмих падина по површини, кад долази до слободног пада стенског материјала, превртања или котрљања.

2.Превртање је ротација (према напред) одвојене масе око осе која се налази у њеној бази или у близини базе; понекад може бити изражено као још међусобно прислоњени одвојени блокови. Превртање може претходити или следити након одроњавања или клизања.

3.Течење је разноврсно кретање са знатним варијацијама брзине и садржаја воде. Течење често почиње као клизање, одроњавање или као превртање на стрмим падинама, при чему долази до брзог губитка кохезије покренутог материјала.

Сетвом култура, које имају јак и дубок корен, може да се спречи ерозија земљишта до дубине од једног метра, али све што је дубље од тога треба препустити шумарству. Нема гаранције да ће ово зауставити клизиште, али се знатно смањују шансе да настане катастрофа.

Флубијална (речна) ерозија настаје услед одношења обале и масовног пропадања. Директно уклањање обалског материјала физичким дејством текуће воде назива се спирање обале. Речна ерозија где се процеси ерозије јављају претежно струјањем текуће воде речног тока и манифестују се у облику одрона и разарања обала, меандрирања, стварања ада, спрудова, вирова. Уколико у неком сливу дође до поремећаја водног режима (најчешћи разлог поремећаја водног режима је појава натпросечне количине падавина) може попримити знатније деструктивне елементе, онда је у таквом сливу овладала бујична ерозија. Слив у коме су овакви процеси узели већи замах, постаје бујични слив. У том случају величина слива нема битних утицаја.

Глацијална ерозија се јавља у хладним климатским условима где су просечне годишње температуре испод 0°C. Наталожене масе леда (ледници) својим покретима и тежином еродирају стеновиту подлогу, откидају површинске слојеве стена или земљишта и носе их са собом. Овај ношени материјал, нарочито ако је изграђен од стена велике твроче такође врши ерозију подлоге. Покренути материјал одликује се великим степеном некохерентности и лако га односи вода од истопљеног ледника и падавина.

3.4.6 Ефекти водне ерозије

Ерозија земљишта може бити безопасна (бенигна) или штетна (малигна). У шумама, на пашњацима и у равним и малчираним површинама са вегетацијом, природна ерозија је ниска, постепена и безопасна. При оваквим условима брзина губитка земљишта је мања од брзине формирања земљишта. Та вредност представља губитак еродираног земљишта која не умањује значајније продуктивност земљишта. Максимално толерантне границе ерозије варирају у зависности од типа земљише.

Ефекти ерозије земљишта ван локалитета нису увек лако уочљиви. Еродирани материјали се носе на удаљена места и тамо се депонују у водним телима, језерима, потоцима, рекама, на пољопривредном земљишту, на путевима и др.

3.4.6.1 Једначине за израчунавање губитка земљишта

Највише употребљаван модел за прорачун ерозије представља USLE (енг. *Universal Soil Loss Equation*) који је развијен од стране USDA. Ова једначина је позната као универзална једначина за процену губитка земљишта. Даље је ревидирана 1987. године и данас се назива RUSLE (енг. *Revised Universal Soil Loss Equation*). RUSLE једначина користи исти факторски приступ који користи и USLE:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

A – потенцијални дугорочни просечни годишњи губитак земљишта у тонама по парцели годишње ($\times 2,24 \text{ Mg/ha/години}$). Ово је количина земљишта која се упоређује са „горњом границом подношљивог губитка земљишта”.

R – фактор падавина и отицања. Што је већи интензитет и трајање падавина, већи је потенцијал ерозије.

K – фактор еродибилности земљишта. K је мера осетљивости честица земљишта на одвајање и транспорт падавинама и отицањем. Текстура земљишта је главни фактор који утиче на K , али структура, органска материја и пермеабилност такође доприносе.

LS – фактор дужине и стрмине. LS фактор представља однос губитка земљишта при датим условима. Што је стрмији и дужи нагиб, то је већи ризик од ерозије. Ово је веома важан фактор у укупној брзини ерозије.

C – фактор култивације. Користи се за одређивање релативне ефикасности система управљања земљиштем и усевама у смислу спречавања губитка земљишта. *C* фактор је однос који упоређује губитак земљишта за земљиште које је обрађено и култивисано у односу на необрађено земљиште. Усеви, врста и време обраде земљишта, коришћење зимског покривача и примена чврстог стајњака ће утицати на овај фактор.

P – фактор поређења различите пољопривредне праксе. *P* фактор упоређује губитке земљишта који су настали обрадом земљишта.

У *RUSLE*, фактори су ревидирани најновијим информацијама и новим факторским односима који су изведени на основу савремене теорије ерозије и података. Главне промене *USLE* које су укључене у *RUSLE* моделу су:

R фактор: нове и побољшане карте ерозије и дистрибуције индекса еродибилности за неке области;

K фактор: временски променљива еродибилност земљишта која се одражава на смрзавање – одмрзавање у неким географским областима;

LS фактор: нове једначине за израчунавање дужине и стрмине нагиба;

C фактор: додатни подфактори за процену степена покривености земљишта и управљања обрадивим земљиштем и пашњацима и

P фактор: нове вредности за различите праксе обраде пољопривредног земљишта и пашњака.

Поред ових једначина, често се користи једначина аутора који су предложили Вишмајер и сар. 1971. Према овом моделу способност земљишта да се сумом својих својстава одупре агенсима ерозије дефинисана је фактором еродибилности (*K*):

$$K = \frac{2,713 \times 10^{-4} \times (12 - OM) \times M^{1,14} + 3,25 \times (S - 2) + 2,5 \times (P - 3)}{100}$$

Параметри Вишмајерове једначине за израчунавање фактора еродибилности су својства којима се земљиште одупире агенсима ерозије: садржај органске материје (хумуса) у површинском слоју земљишта (*OM*); величина и стабилност структурних агрегата

површинског слоја (S); текстурни састав (M); брзина филтрације воде кроз земљишни профил (P).

Према величини фактора еродибилности (K) земљишта се могу поделити на: отпирна на ерозију, $K < 0,1$; средње еродибилна, $K=0,1-0,3$; високо еродибилна $K=0,3-0,6$ и врло високо еродибилна $K > 0,6$.

Фактор ерозионе снаге кише (R). Генерално, локалне варијације у ерозивности падавина ($\pm 5\%$) могу се представити R фактором. R вредности се могу израчунати за одређене локације из података о интензитету падавина. Међутим, ово је веома дуготрајан и интензиван процес који захтева израчунавање индекса еродибилности за сваку врсту падавине већу од 12,7 mm током године. „Еквивалентне“ R вредности су доступне за многе области. Овај ефекат односно R вредности су укључене у модел за израчунавање фактора C .

Фактор еродибилности земљишта (K). K фактор представља подложност земљишта ерозији и количину и брзину губитка. Текстура земљишта, органска материја, структура и пермеабилност одређују еродибилност одређеног земљишта. Вредности K за различите типове земљишта су дате у табели 3.3.

Табела 3.3. Фактор еродибилности земљишта

Тип земљишта	Еродибилност	K вредност
Фина текстура; висок садржај глине	Ниска	0,05–0,15
Груба текстура; песак	Ниска	0,05–0,20
Средња текстура; иловача	Умерена	0,25–0,45
Висок садржај праха	Висока	0,45–0,65

Фактор дужине и стрмине нагиба падине (LS). LS фактор представља комбинован ефекат дужине и релативног нагиба падине. Падине неуједначеног нагиба захтевају поделу нагиба на сегменте. Обично се дужина и стрмина падине дели на пет сегмената и стрмина, при чему је ова подела довољна да дефинише неуједначен профил нагиба. Постоје различите једначине за израчунавање LS фактора за различите услове нагиба.

Фактор култивације и управљања земљиштем (C фактор). C фактор представља ефекат биљака, земљишног покривача, подземне биомасе и активности које утичу на земљиште и доводе до ерозије. C фактор

зависи од ефективне масе корена у горњим слојевима земљишта, процента биомасе, просечне висине, вредности храпавости површине (генерално се крећу од 0,3 до 1,5), проценат покривености земљишта и функција површинског покривача изражена је као V вредност (релативна ефикасност површинског покривача у циљу смањења губитка земљишта). Типичне V вредности су у опсегу 0,025–0,050.

Толерантна вредност губитка земљишта (T фактор). Вредност толеранције губитка земљишта дефинисана је као показатељ колика ерозија може бити толерисана. T вредност дефинише максимални губитак земљишта ерозијом који не изазива значајан губитак продуктивности. Зависи од карактеристика земљишта. На пример, плитка земљишта имају ниске T вредности. Већи губитак земљишта може се толерисати за дубоко пропусна земљишта на пропусним неконсолидованим матичним материјалима. Тамо где подповршински слојеви имају физичка својства непогодна за раст и развој корења, долази до ерозије и смањења продуктивности земљишта које се не може превазићи применом само ђубрива. Таква земљишта имају низак ниво толеранције (ниска T вредност). T вредности се обично крећу од 2 до 11 t/ha.

3.4.7 Контрола водне ерозије

Контрола водне ерозије земљишта заснива се на следећим принципима:

- Смањење утицаја кишних капи: може се постићи обезбеђивањем покривача земљишта током сезоне кише. Густа шумска крошња, блиско растуће културе, биљни покривач и малчеви на голим или култивисаним земљиштима могу пружити неопходну заштиту против удара кишних капи.
- Стабилни агрегати земљишта: стабилни агрегати се добијају у земљишту са довољно органске материје што се може постићи применом органских суплемената. Агрегација побољшава порозност и инфилтрацију и смањује отицање.
- Повећање инфилтрације и смањење отицања: инфилтрација се може повећати малчирањем и модификацијом нагиба. Органски малчеви усвајају воду и складиште воду за инфилтрацију дужи

временски период. Земљишта на равним површинама имају већи капацитет инфилтрације него земљишта на падинама.

- Смањење брзине отицања: брзина отицања се може смањити модификацијом степена и дужине нагиба кроз формирање тераса и контурисање. Обрезивање контура, изрезивање и обрезивање трака по контурама ефикасно смањују брзину отицања. Када се смањи брзина отицања, повећава се инфилтрација.
- Минимално нарушавање земљишта: обрада чини земљиште еродабилним. Конзервација система за обраду земљишта, необрађено и минимално обрађено земљиште су ефикасне праксе очувања земљишта.
- Спречавање акумулације воде у каналима: претходно нивелисање рељефа, пажљиво узгајање усева и држање жетвених остатака на обрадивој површини спречава акумулацију овакве воде.
- Безбедно уклањање оптерећене воде ван побрађене површине. Отпадна вода се може безбедно уклонити преко травнатих путева.
- Интегрисање мера за контролу ерозије: обично ниједна метода сама по себи није довољна за контролу ерозије земљишта. На пример, интегрисање малчирања са необрађеним земљиштем може ефикасно смањити ерозију.
- Редовна примена и одржавање мера за контролу ерозије. Мере и добру праксу за контролу ерозије земљишта треба редовно примењивати и одржавати. За баријере може бити потреба реконструкција.
- Додавање стајњака и компоста погодује формирању структуре, повећава стабилност агрегата, порозност и инфилтрацију; а самим тим смањује и отицање. Ћубрење може смањити отицање воде за 70–90% и губитак седимента за 80–95% као резултат повећања садржаја органске материје. Коришћењем стајњака у комбинацији са другом праксом очувања земљишта, као што је нпр. парлог, може бити ефикасна стратегија за смањење ерозије земљишта. Међутим, неселективна употреба стајњака може бити штетна с обзиром да може утицати на квалитет подземне воде.

3.5 Ерозија ветром (Еолска ерозија)

Као последица климатских и педогених разлога, земљишта аридних и семиаридних региона су обично сува, растресита и са ниским садржајем органске материје. Ово је карактеристично за песковита земљишта која су подложна значајном губитку као последица ерозије ветра. Еол је у грчкој митологији био бог и господар ветрова. Еолска ерозија или дефлација настаје као последица рада ветра. Еолска ерозија се појављује у регионима који се карактеришу честим јаким ветровима, чија су земљишта растресита, а нису заштићена густим биљним покривачем.

Антропогене активности као што су крчење шума, прекомерна испаша, прекомерна експлоатација вегетације, земљишта и водних ресурса доводе до ерозије ветром.

Еолска ерозија је присутна у свим деловима света, нарочито је изражена у равничарским пределима. У Србији у равничарским деловима најзаступљеније земљиште је високовалитетна црница (чернозем) која има фину структуру и површина има дебео слој хумуса.

Та фина структура страда, услед дејства ветра, који у равници увек дува, и односи честице са површине земљишта. Када наступи еолска ерозија први се губи хумус: са земљишта се губи слој по слој. Пошто се хумус спорије обнавља него што се губи, а ветрови су га годинама односили са парцела, што је довело до момента да је еолска ерозија озбиљно осиромашила наше најплодније земљиште.

Ерозија ветром уклања лакшу фракцију земљишта која је богата органском материјом, нутријентима, глином и прахом. Особине земљишта као што су: механички састав, структура и влажност земљишта утичу на појаву еолске ерозије. Ветар односи углавном ситне честице неструктурних, прашкасто – ситно песковитих земљишта и прашкасте структурне агрегате у сувом стању када су најслабије везани. То значајно смањује продуктивност земљишта и принос усева. Одношење честица је интензивније што је ређи покривач, већа експонираност земљишта ветру, као и већа јачина и учесталост ветра. У зависности од јачине ветра, величине и тежине честица, ветар односи честице на мања или већа растојања. Најситније честице као што су ситан прах и глина могу бити ветром однешени на удаљености од неколико хиљада километара. Приликом одношења честица песка, ветар

врши и корозију односно разарање стена. Долази до механичког глачања и распадања стена. Са одношењем честица песка и праха долази до сортирања и навејавања (акумулације) честица и стварања специфичног облика еолског рељефа-пешчаних дина.

Напуштена земљишта подлежу дезертификацији што на крају доводи до ерозије ветром. Методе за смањење ерозије ветром су рестаурација биљне производње и санација земљишта за пољопривредну производњу. Ове мере укључују стабилизацију земљишта, покривање површине усевима, управљање жетвеним остацима, малчирање, механичке баријере и ветробране.

Ерозија ветром је велики проблем у аридним и семиаридним регионима. Овде је вегетација ретка, падавине су мале, а температура ваздуха висока. Евапорација је већа од количине падавина током већег дела године, што изазива губитак воде, органске материје и структуре земљишта. Олује су у оваквим регионима честа појава, а у сушној топлој сезони, јаки ветрови подижу ситне честице земљишта и носе их на удаљена места. Екосистеми у сушним и семиаридним регионима су по природи осетљиви на антропогене активности. Раст хумане популације и социо-економске потребе представљају стрес за све природне ресурсе. Лоше управљање земљиштем, прекомерна испаша, прекомерна сеча и крчење шума, као и прекомерна употреба водних ресурса доводи до губитка природног вегетационог покривача што доводи до убрзане ерозије ветром. Свеукупно, ерозија ветром узрокована људским активностима у просеку износи приближно 78% од укупно процењене ерозије ветром.

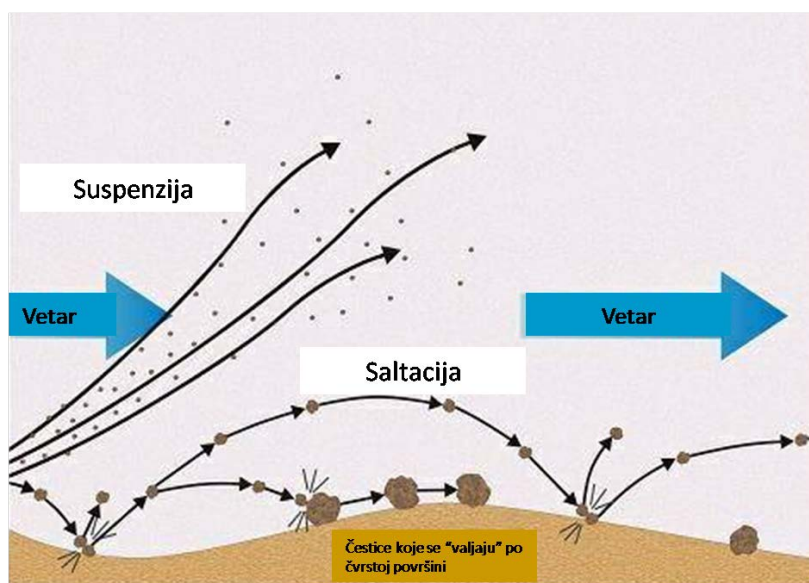
Ерозија ветром не само да уклања земљиште, већ и оштећује усеве, зграде, објекте и аутопутеве. Ерозија ветром уклања лакшу фракцију земљишта као што су органска материја, глина и прах. Изазива губитак најплоднијег дела земљишта и значајно смањује продуктивност земљишта. Ако се не предузму одговарајуће мере и ерозија ветром траје дуго, на крају може доћи до дезертификације. Честице са оштећеног земљишта улазе у састав ваздуха и утичу на загађење и оптерећеност прашином. Прашина смањује видљивост, утиче на квалитет површинских вода, утиче на рад машина и уређаја и угрожава здравље људи и животиња.

Постоје три типична процеса кретања честица земљишта током ерозије ветром. То су салтација „скоковито кретање“, суспензија и површинско

пузање/вучење. Ова три процеса ерозије ветром одигравају се истовремено. Салтација доводи до кретања честица у суспензији и површинског вучења. Ни вучење ни суспензија не могу да настану без салтације. У процес ерозије ветром укључени су следећи процеси: иницијација, транспорт (суспензија, салтација и површинско пузање), абразија, сортирање и таложење.

3.5.1. Транспорт честица

Салтација. Код салтације, ситне честице земљишта (пречника 0,1-0,5 mm) се котрљају по површини земљишта директним ударом ветра до одређеног растојања, а затим се нагло дижу вертикално на висину од 20-30 cm. Подигнуте честице добијају на брзини, а затим скоро праволинијски падају у односу на хоризонталну раван. Хоризонтално пређени пут честица је четири до пет пута већа од висине њеног скока. При удару ветра на површину, честице бивају захваћене ветром и враћају се на удаљено место поново на земљиште, при чему могу ударити у друге честице и изазвати њихово подизање ветром. Честице суспендоване у ваздуху даље могу ударити у друге честице у ваздуху пре него што стигну до површине земљишта. Дакле, салтација доводи до прогресије узастопних честичних скокова (слика 3.6).



Слика 3.6. Процес салтације

Када честице салтацијом падају на површину, оне ударају у друге честице на површини и доводе до њиховог кретања у ваздуху. Ово бомбардовање површине изазива ефекат лавине мултипликације који се шири у облику лепезе, са све више и више честица земљишта покренутих од стране ветра. Између 50 и 75% земљишта се преноси салтацијом.

Суспензија се односи на вертикално подизање и хоризонтални транспорт веома ситних честица земљишта које се углавном уклањају са неког локалног извора. Суспендоване честице могу бити депоноване на површини на растојању од неколико метара до неколико стотина километара. Опсег величина честица које се односе је од 2 до 100 μm , са средњим пречником око 50 μm . Међутим, на веће удаљености транспортују се честице пречника $< 20 \mu\text{m}$, с обзиром да веће честице имају значајну брзину седиментације. Један део ових честица које се карактеристичне за одношење ветром су присутне у земљишту, док већина настаје абразијом (честице које потичу од ветра који одбацује или троши материјал са рељефа током ерозије). Органска материја и неки нутријенти обично се налазе у финој фракцији земљишта, па анализом суспензије који садрже такве фракције може се одредити порекло земљишта.

Површинско пузање/вучење. Честице земљишта или агрегати пречника 500–1000 μm су превелики да би се могли подићи нормалним ерозивним ветром. Оне се гурају, котрљају и покрећу ударима убрзаних честица насталих током ссалтације. При јаком ветру изгледа као да се цела површина полако креће унапред. Настале акумулације песка нанесеног ветром формирају неравнине и избочине које су настале као последица пузећег тока по површини. Површинско пузање чини 7–25% укупног транспорта честица. Пузање/вучење изгледа као скоро пасивно, али пузајући агрегати могу да досегну величину честица карактеристичних за салтацију и суспензију и да промене вид транспорта. Пузајући агрегати ретко се удаљавају од места порекла.

3.5.2 Абразија

Проценат еродибилности земљишта ($< 1000 \mu\text{m}$) у површинском слоју је у доброј корелацији са масом земљишта која се може уклонити са те површине. Абразиона ерозија или ерозија комбинованим радом ветра и воде, је ерозија настала као последица морских, језерских и речних

таласа. Облик абразионог рељефа зависи с једне стране од механичке снаге таласа и трајности његовог деловања, а с друге стране од отпорности обале. Димензије таласа зависе од јачине, односно, брзине ветрова, од њихове трајности, затим од пространства и дубине океанских, морских и језерских басена. Овај облик ерозије постаје све више значајан и као последица антропогених активности јер се изградњом вештачких водних акумулација стварају услови за деловање овог вида ерозије.

У областима која су подложна ерозији, укупна количина земљишта која се може изгубити је обично неколико пута већа од количине еродираниог материјала који је првобитно био присутан на површини. Тако је отпорност на абразивно распадање површинских агрегата јако важна у ерозији ветром.

3.5.3 Сортирање

Осим ако су агрегати или честице површинског слоја хомогени по физичким својствима (величина, облик, густина), што је мало вероватно за пољопривредна земљишта, сортирање настаје током ерозије. Сортирање се овде односи на селективно уклањање агрегата или честица током ерозије с обзиром да се различите величине крећу различитим брзинама. Процес сортирања током времена уклања fine материјале обогаћене нутријентима, остављајући оне који су мање плодни и грубљи.

3.5.4 Фактори који утичу на ерозију ветром

Неколико фактора је укључено у једначину ерозије ветром (*енг. wind erosion equation, WEQ*), која се користи као модел да предвиди дугорочни просечни годишњи губитак земљишта тачно одређених карактеристика. Једначина је приказана као:

$$E = f(IKCLV)$$

где је E —процењени просечни годишњи губитак земљишта изражен у тонама по јутру годишње; I —индекс еродибилности земљишта; K —фактор храпавости земљишта; C — климатски фактор; L — дужина поља дуж ветра у правацу ерозије и V — покривач вегетацијом.

Земљиште. Еродибилност земљишта се односи на лакоћу одвајања и транспорта честица ветром. Бездимензионални индекс еродибилности земљишта (I) заснива се на нееродибилној фракцији (проценат агрегата пречника већег од 0,84 mm). Индекс еродибилности земљишта изражен је као:

$$I = X_2/X_1$$

где је X_1 количина еродираног земљишта које садржи 60% агрегата већих од 0,84 mm, а X_2 је количина еродираног земљишта који садржи било који процентуални удео агрегата већих од 0,84 mm. Индекс еродибилности земљишта, I , даје релативну меру еродибилности, али стварни губитак земљишта услед ерозије ветром је непознат. Када је површина земљишта гола, глатка, широка, незаштићена и без покорице, његова релативна еродибилност је еквивалентна индексу еродибилности земљишта дефинисаном горњом једначином. Карактеристике земљишта које утичу на еродибилност земљишта су текстура, структура и садржај воде земљишта. Текстура се сматра најдоминантнијим фактором и опште је познато да се честице мање од 0,25 mm и веће од 0,08 mm најлакше еродирају ветром. Земљиште са високим садржајем ситних честица песка имају низак садржај органске материје и лакше подлежу ерозији ветром. Структура земљишта, степен збијености и покривеност вегетацијом су главни фактори који одређују отпорност земљишта на ерозију ветром. Брзина честица земљишта зависи од просечног пречника агрегата земљишта, а не од величине појединачних честица. Еродибилност песка у функцији је његове величине честица, при чему је песак са величином зрна од 0,09 mm најподложнији ерозији ветром.

Еродибилност песка се може поделити у 3 категорије: тешко еродибилан >0,7 – <0,05 mm, умерено еродибилан на 0,7 – 0,4 mm и 0,075 – 0,05 mm и високо еродибилан 0,4 – 0,075 mm. Смеше различитих величина подложније су ерозији у поређењу са земљиштем које има уједначену величину честица. Храпавост површине од 6 cm смањује ерозију ветром 50%. Када се храпавост повећава на око 11 cm, фактор храпавости земљишта (K) остаје приближно константан, а затим додатним повећањем храпавости, ефикасност се постепено смањује.

Клима утиче на ерозију ветром и то највише брзином ветра, количином падавина и температуром која, заузврат, одређује евапорацију и садржај воде у земљишту. Ерозија ветром настаје када притисак који на

површину земљишта врши ветар премашује способност површинског материјала да се одупре одвајању и транспорту. Јаки ветрови еродирају земљиште, а суша повећава подложност површинског зглоба земљишта ерозији. За изражавање суше често се примењује Будико индекс суше. Индекс суше датог локалитета показује колико пута нето енергија зрачења може да испари средњу годишњу количину падавина.

Семиаридни региони у којима је ерозија ветром озбиљан проблем имају индекс суше између 2 и 7. Области са индексом суше већим од 7 су пустињске зоне. Већина великих равница имају индекс суше између 2 и 5. Пустиња Сахара у северној Африци има максимални индекс од чак 200. Што је индекс већи, расте и ризик од ерозије ветром.

Ширина и нагиб површине. Истраживања су показала да постоје два утицаја нагиба терена на ерозију ветром. Прво, брзина ветра се повећава са нагибом у правцу успона рељефа и ерозија ветром је јача на стрмом делу, а друго, гранична брзина честица расте са нагибом и слаби ерозију ветром.

Брзина кретања честица се повећава са растојањем преко еродирајућег поља све док (ако је поље довољно велико) не достигне максимум који дата брзина ветра може носити. Након тога брзина тока остаје константа. Овај максимум је приближно исти за сва земљишта било које текстуре и износи 2 t по ширини од 5 m/h за ветар од 40 mph за $15,2 \text{ m}$ удаљености. Потребна удаљеност за струјање тока земљишта да би се достигао максимум који ветар дате брзине може да носи варира обрнуто са еродибилношћу површине поља. Што је површина ерозивнија, то је потребна краћа удаљеност за постизање максималног протока.

Вегетација. Покривеност вегетацијом смањују утицај брзине ветра који делује на површину земљишта и уопште смањује еродибилност земљишта. Однос између покривености вегетацијом и брзине ерозије ветром је експоненцијална функција, односно са повећањем покривености вегетацијом брзина ерозије ветром опада експоненцијално. Мерење граничне брзине ерозије ветром при различитој покривености вегетацијом су показала да се гранична брзина повећава са покривеношћу вегетацијом и да брзина ерозије ветром нагло опада како расте покривеност вегетацијом.

Специфичне особине вегетацијског покривача утичу на еродибилност земљишта. Користи се регресиона једначина која повезују губитак земљишта ветром у зависности од степена покривености вегетацијом, врсте и оријентације вегетације, брзине ветра и агрегата земљишта. Може се закључити следеће (1) фина текстура земљишта је подложнија ерозији од крупније текстуре, (2) било која оријентација честица осим равне смањује ерозију ветром и (3) усеви са мањим лишћем, попут трава и житарица, омогућавају висок степен контроле ерозије по јединици масе.

3.5.5 Контрола ерозије ветром

Још од 1910. године почеле су да се спроводе различите активности у циљу контроле ерозије ветром као што су:

- повећање садржаја воде у земљишту,
- повећање садржаја хумуса (органске материје),
- обезбеђивање покривача вегетације,
- остављање жетвених остатака да стоје на земљишту,
- обезбеђивање вештачког покривача од сламе,
- садња биљака као ветробрана за заштиту поља,
- остављање површине земљишта у малим агрегатима уместо у фино уситњеном стању и
- повећати храпавост површине правилним обрадом под правим углом у правцу јаких ветрови.

Следећа четири принципа контроле ерозије ветром се посебно издвајају из напред наведене листе:

1. Успоставити и одржавати вегетацију или оставити жетвене остатке на површини земљишта;
2. Произвести или оставити на површину нееродибилне агрегате или грудве;
3. Смањити ширину поља дуж правца ветра; и
4. Повећати храпавост површине земљишта.

Различита пракса за контролу ерозије ветром у циљу очувања земљишта може се применити. Ове праксе су дизајниране тако да умањују дејство ветра на површину земљишта или да стварају површину земљишта која је отпорна на силе ударе ветра.

Стабилизација земљишта. За контролу ерозије ветром користе се различити стабилизатори земљишта. Многи од ових производа се успешно користе за контролу ерозије ветром. Међутим, лака и јефтина стабилизација се такође може постићи формирањем вегетацијског покривача. Често се хемијски агенси користе за стабилизацију земљишта. Критеријуми које морају задовољити површински стабилизатори су: (1) површина земљишта мора бити 100% покривена, (2) стабилизатор не сме негативно да делује на раст и развој вегетације, (3) ерозија се мора у почетку спречити и смањити када постоји озбиљна опасност од ерозије, обично је то најмање два месеца пре сваке сезоне, (4) стабилизатор треба да се поставља лако и без посебне опреме и (5) цена мора бити довољно ниска за профитабилну употребу. Ови стабилизатори могу спречити ерозију ветром ако се примене на укупну површину земљишта и при довољно високој дози, али су тада трошкови превисоки. За примену стабилизатора на пољопривредном земљишту, морају се задовољити следећи захтеви: (1) развити метода за брзу примену великих количина, (2) применити безбедне хемикалије за сузбијање корова на земљишту које има грубу текстуру, (3) формирати филмове довољно јаке да издрже ударе кишних капи, али да се ипак омогући инфилтрација воде и (4) формирати филмове који немају штетне ефекте по окружење земљиште–воду–ваздух.

Биљни покривач. Биљни покривач подразумева примену биљака или тзв. зелених фертилизера који се узгајају у сврху сезонске заштите земљишта или побољшања земљишта. Биљни покривач помаже у контроли кретања земљишта и штити површину земљишта између два периода култивације. Биљни покривач смањује ерозију ветром тако што штити земљиште вегетацијом која се везује за земљиштем својим корењем. Зелено ђубрење подразумева заоравање зелених остатака у пролеће, најмање месец дана пре сетве. Ово обезбеђује додатне нутријенте, тако што се заорени усеви распадају.

3.6 Хемијска деградација земљишта

На основу доступних података процењује се да је око 240 Мha земљишта хемијски даградирано. Исцрпљеност земљишта у погледу садржаја нутријената довело је до деградације 136 Мha, салинизација је узорковала деградацију 77 Мha земљишта, а ацидификација је даградирао око 6 Мha земљишта. Око 11 Мha земљишта је погођено загађењем. Интензивна пољопривредна пракса (58%) и крчење шума (28%) су главни узроци хемијске деградације земљишта. Недостатак нутријената је најзаступљенији вид деградације у Африци (65 Мha) и Јужној Америци (68 Мha), док је салинизација главни тип хемијске деградације земљишта у Азији (53 Мha). Недостатак нутријената је проузроковало неравнотежу у земљишту код нискоуносне пољопривреде у маргиналним земљиштима. Смањење нутријената је узроковано испирањем, жетвом и спаљивањем остатака, ерозијом и уклањањем усева. Салинизација се јавља природно као последица педогенских процеса у различитим климатским условима, али може бити изазвана и људским активностима. Заслањивање је узроковало да многа земљишта буду напуштена, која су раније била продуктивна.

Главни узрок заслањивања земљишта као последица антропогенских активности је неодговарајући систем за наводњавање у сушним и семиаридним регионима. Испирање соли додатним наводњавањем и сетва усева који су отпорни на соли је стратегија за управљање заслањеним земљиштем.

Ацидификација земљишта изазвана је киселим кишама, излуживањем базних компоненти и употребом киселих ђубрива. Употреба креча је метод за регенерацију киселих земљишта. Раст усева погодних за рН вредност земљишта може бити ефикасна мера у слабо и средње киселим земљиштима.

3.6.1. Губитак нутријената и органских материја

Иако се каже да је губитак нутријената проблем ниско уносне пољопривреде, дешава се и у неколико других ситуација. Ако се нпр. пољопривреда спроводи на сиромашном или умерено плодном земљишту, без довољне примене стајњака и ђубрива.

Модерна интензивна пољопривреда захтева употребу минералних и органских ђубрива како би се одржавала плодност земљишта. Недостатак нутријената може бити потврђен:

- директним испитивањем земљишта или
- индиректном анализом биљака.

Рационални приступ испитивања земљишта је примена концепта квантитет/интезитет (Q/I) за дати нутријент у циљу мерења снабдевања земљишта испитиваним нутријентима; али у пракси се користе разноврсне емпиријске формуле како би се омогућило композитно одређивање оба фактора Q и I . Концентрација испитиваног јона је независна од величине испитиваног система и стога представља меру његовог интезитета (фактор интезитета, I). Промене I са променама Q зависе од нагиба праве Q/I , који дефинише пуферски капацитет соли за испитивани нутријент.

Квалитативни аспект одређивања вишка или мањка нутријената показују различити знакови на биљкама (индиректни метод). На пример: биљке са недостатком фосфора имају заостали раст, док недостатак азота узрокује жуту боју листа и заостао раст биљке. Недостатак калијум узрокује појаву флека на крајевима лишћа и на крају долази до потпуне некрозе крајева лишћа.

Брз губитак органске материје и нутријената у горњем слоју земљишта настаје као последица уклањања аутохтоне вегетације. Сагоревање биомасе, смена култивације и ерозија су други важни узроци губитка нутријената и органске материје. Губитак нутријената индукован људским активностима је процес којим се залихе нутријената у земљишту смањују због континуираног усвајања нутријената, без довољног додатка нутријената у пољопривредној производњи и као последица губитака нутријената убрзаном ерозијом земљишта и спирањем. Природна ерозија и излуживање се додатно погоршавају људским активностима услед интензивне експлоатације земљишта. Општи узрок смањене плодности је поремећена равнотежа између производње (кроз жетву, сагоревање, испирање, итд.) и уноса (путем стајњака, ђубрива, жетвених остатака, и др.) нутријената и органске материје.

Методолошки приступ процене баланса између брзине губитка нутријената и захтева за нутријентима комбинује информације о пољопривредној производњи, карактеристикама земљишта и биофизичким ограничењима са моделима и процедурама за израду таквих процена. Информације и подаци који се односе на пољопривредну производњу обухватају коришћење земљишта, капацитет популације, биљну производњу и употребу минералних и органских ђубрива. Овај приступ користи системе атрибутних и географских база података са емпиријским и механичким моделима како би се добиле информације за анализу и мониторинг.

Смањење нутријената у земљишту повезано је са несигурношћу производње хране у сиромашним земљама и земљама у развоју као последица интензивног коришћења земљишта за пољопривредну производњу без одговарајућег уноса. Недовољан унос нутријената у земљиште које је осиромашено нутријентима угрожава одрживост пољопривреде у овим регионима. Дугорочни пад приноса у условима ниског уноса и неуравнотеженог ђубрења је уочен у многим деловима Африке, Азије и Латинске Америке.

Деградација земљишта као последица губитка органске материје. Земљиште је главни копнени резервоар угљеника и мале промене његових залиха утичу на баланс угљеника у копненим екосистемима. Ако се адекватно управља земљиштем, може се повећати садржај органског угљеника што може повећати продуктивност земљишта. Један од најзначајнијих видова деградације земљишта је смањење садржаја органске материје у земљишту. У циљу одрживог управљања земљиштем, потребно је да се органска материја сачува и одржава на задовољавајућем нивоу.

Тако је смањење садржаја органске материје индикатор лошег квалитета земљишта у већини случајева. Органска материја земљишта је изузетно важна за све процесе који се у земљишту одвијају. У органској материји се акумулирају хранљиви елементи, извор је плодности, доприноси аерацији што смањује збијеност земљишта, побољшава инфилтрацију и повећава капацитет земљишта за воду. Она има улогу пуфера за промене рН и представља извор енергије за микроорганизме. Учествује у глобалном кружењу угљеника. Имобилизација угљеника у терестријалним екосистемима подразумева премештање CO₂ из атмосфере у дуготрајне резерве C, као што су нпр. терестријалне и

геолошке. Везивање представља усвајање и складиштење C биолошким путем фотосинтезом и абиотичким процесима (депоновање у геолошке слојеве или океане). Повећање органске материје у земљишту представља важну стратегију биолошког везивања угљеника. Кјото протоколом се сматра да је земљиште есенцијална компонента за ублажавање повећане концентрације гасова са ефектом стаклене баште.

Органска материја у земљишту у појединим слојевима представља основу за израчунавање акумулације органске материје у слоју до један метар дубине земљишта. Тако се могу проценити резерве угљеника у земљишту у зависности од типа земљишта и начина његовог коришћења. Процена параметара који утичу на смањење органске материје као и однос ових параметара представљају основ за процену ризика од смањења органске материје у земљишту.

Данас постоји интензиван тренд да у великом броју испитиваних земљишта, широм Европе као последица неадекватне обраде земљишта, долази до опадања садржаја органске материје. Оно што прво треба урадити јесте идентификација тренутних залиха органске материје и узроци који доводе до њеног смањења. Процене су да се на годишњем нивоу у Европи губи 0,6% угљеника из земљишта.

Излуживање нутријената. Излуживање је силазно кретање растворених земљишних компоненти заједно са инфилтрираном водом. На овај начин се распоређује и уклања значајна количина материјала под условом да постоји позитиван водни биланс, односно ако постоји довољан вишак воде за ефективно кретање наниже, а који превазилази евапотранспирацију. Дакле, излуживање је важан процес којим се уклањају нутријенти у влажним регионима. Излуживање се дешава чак и у природној вегетацији, али пољопривредне активности могу у великој мери повећати губитак излуживањем. Земљишта са високим степеном инфилтрације воде и малим капацитетом за задржавање нутријената као што су песковита и добро структурирана фералитна земљишта са малим садржајем глине и ниским садржајем органске материје су посебно осетљива на излуживање нутријената. Нутријенти се разликују по својој мобилности у земљишту; нитрати су најмобилнији у поређењу са другим анјонима. Нитратне јоне не привлачи негативно наелектрисан матрикс горњег слоја земљишта. Нитрати се континуирано производе у земљишту нитрификацијом

амонијака добијеног из ђубрива и органске материје земљишта. Излуживање нитрата је озбиљан проблем у песковитим и слабо ретенционим земљиштима. Ово често доводи до загађења подземних и површинских вода које се налазе око пољопривредних површина. Сулфати се такође излужују лако из пољопривредног земљишта, док су фосфати релативно непокретни. Колоиди земљишта, калцијум, алуминијум, гвожђе и манган имобилишу фосфате. Земљишни раствор који перколира кроз профил земљишта је у суштини неутралан; садржи анјоне и еквивалентне количине катјона. Дакле, катјони се такође излужују, и подложнији су излуживању калцијум и магнезијум у поређењу са калијумом.

У песковитим земљиштима, знатне количине магнезијума могу се излужити након примене ђубрива калијум-хлорида или калијум-сулфата. Калијум се излужује у много мањој количини од калцијума и магнезијума.

Губитак нутријената услед спаљивања жетвених остатака. Када се спаљују остаци биомасе, усеви или отпад, већа количина азота и сумпора се губи, док се нутријенти, као што је фосфор и калијум задржавају. Испитивања су показала да спаљивањем остатака пшенице, преостали пепео садржи минералне елементе фосфора и калијума. Студије су показале губитке азота 98–100%, сумпора 75%, фосфора 21% и калијума 35 %.

Овај пепео може бити поново депонован на поље, у зависности од ветра и других фактора средине. Временски услови после спаљивања често играју важну улогу у губитку нутријената са поља. На пример, јаки ветрови могу да одувају пепео са поља или да га гомилају у наносе. Ротација усева са спаљивањем остатака биомасе се користи како би се обезбедили нутријенти за пољопривредну производњу. Такви нутријенти често имају привремену корист јер обилне кише често уклањају базе ослобођене од спаљивања. Поред тога, ерозија земљишта ветром или водом лакше настаје када је уништена вегетација и земљиште остављено без биљног покривача.

Губитак нутријената као последица ерозије. На количине губитка нутријената водном ерозијом утичу тип земљишта, покривач и плодност; нагиб терена; количина, начин и време примене ђубрива; интензитет, количина и појава падавина; као и пракса управљања земљиштем. Очекује се да ће губици нутријената бити мањи у

системима управљања земљиштем који чувају резидуе биомасе. Међутим, чак и у таквим условима, остаци биомасе могу бити испрани, при чему постају извор растворних нутријената, који се могу изгубити водном ерозијом. Губици калцијума и магнезијума водном ерозијом су обично високи. Ово се дешава зато што се ови елементи снажно адсорбују на колоидима земљишта, што им олакшава транспорт са честицама седимента.

Уклањање нутријената вегетацијом. На уклањање нутријената вегетацијом утичу услови у земљишту и климатски фактори. Својства земљишта као што су расположиве залихе нутријената у земљишту, садржај влаге, аерација, збијање, температура, рН, баланс нутријената и други фактори утичу на усвајање нутријената од стране биљака. У табели 3.4 дате су вредности које могу бити усвојене од стране одређених биљака.

Табела. 3.4. Усвајање нутријената од стране одабраних усева (kg/ha)

Врста културе	N	P	K	S
<i>Житарице</i>				
Јара пшеница	60–75	10–12	15–17	5–6
Озима пшеница	60–65	11–13	14–17	7–9
Јечам	80–95	15–18	20–25	7–9
Овас	60–76	12–14	15–18	5–6
Раж	60–75	11–14	15–20	5–6
Кукуруз	95–145	18–22	22–28	7–8
<i>Уљане културе</i>				
Канола	85–100	16–20	15–18	12–14
Лан	60–70	7–8	12–15	6–7
Сунцокрет	65–75	7–8	10–12	5–6
<i>Махунарке</i>				
Грашак	135–145	14–18	30–35	6–7
Сочиво	62–74	8–10	27–35	4–5
Остало				
Кромпир	85–110	16–22	120–150	12–14
Парадајз	125–155	16–20	185–225	11–13
<i>Крмне културе</i>				
Алфалфа	290–350	30–37	260–320	27–33
Детелина	220–260	25–30	175–218	10–12
Силажа јечма	145–220	22–30	110–130	14–21
Силажа кукуруза	170–200	27–35	175–220	12–14

Ако би се додало уклањање нутријената жетвеним остацима, ове вредности би се могле помножити са фактором 2–3. Дакле, усеви сами по себи уклањају значајну количину нутријената из земљишта при чему је потребно садржај нутријената допунити ђубривима. Ако се жетвени остаци уклоне са поља, губитак постаје много већи. У просеку, усеви уклањају 50–100 kg/ha N, 10–20 kg/ha P и 15–30 kg/ha K у ратарским културама. Уклањање калијума износи до 100–200 kg/ha у крмним културама.

Употреба ђубрива. Земљишту се додају нутријенти N, P, K и S или као појединачни употребом одговарајућих минералних ђубрива или употребом мултинутријентних ђубрива. Већина једноставних једињења као што су $\text{N-NH}_4\text{NO}_3$, KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ су растворљива једињења. Азот се такође може користи и у течном стању у облику NH_4NO_3 , NH_3 или уреа. N из ових једињења је одмах доступан биљкама, али је подложен излуживању и денитрификацији у NO_3^- облик.

Уколико се количина и време примене N ђубрива поклапају са захтевима усева, мало ђубрива остаје у минералној форми у земљишту. Међутим, поновном употребом N ђубрива довешће до акумулације лабилно везаног органског N који може да се минерализује веома брзо. Губитак излуживањем и денитрификација може се смањити применом нитрификационих инхибитора заједно са N ђубривом, или употребом споро-ослобађајућег или контролисано-ослобађајућег N ђубрива.

Фосфатне стене садрже франколит минерал који може бити коришћен за директну примену у случају дугогодишњих пашњака и за усеве на земљишту чији је $\text{pH} < 5,5$ у влажним климатским подручјима. Монокалцијум фосфат $(\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O})$ је активни састојак суперфосфата. Растворљива ђубрива фосфора реагују веома брзо са земљиштем и формирају мање растворно ђубриво које усвајају биљке. Ови продукти ђубрива могу имати дуг резидуални ефекат.

Главна једињења K су KCl и K_2SO_4 веома растворљива, алли под условом да земљиште има знатан капацитет катјонске измене. Калијум се задржава као измењив катјон K^+ , а губици излуживањем нису велики.

Пре 1980. год. уношење сумпора у атмосферу путем сагоревања фосилних горива у индустријским земљама био је велики па је као последица тога и његова депозиција на земљишту била довољна.

Међутим, контролом његове емисије у атмосферу, депозиција S на земљиште је драматично опала, па је порастао и недостатак S у земљиштима, што захтева примену сумпорних ђубрива. Атмосферска емисија S није никада била велика у неразвијеним земљама тропских и субтрпских региона, тако да уколико постоји и излиживање SO_4^{2-} из земљишта, недостатак овог нутријента је заједничко за оба региона. S се примењује као елементарни S, као гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ или као $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

3.6.2. Ацидификација (закишељавање) земљишта

Киселост земљишта потиче од концентрације водоникових (H^+) јона у земљишном раствору. Када дође до померења равнотеже и концентрација H^+ јона је већа од садржаја OH^- јоне, каже се да је земљиште кисело. Ацидификација (закишељавање) земљишта је природан процес смањења рН вредности земљишта као резултат бројних биогеохемијских процеса у земљишту и у природним условима може трајати хиљадама година.

Заступљеност H^+ и OH^- јона изражава се путем рН вредности земљишта. рН је негативан логаритам концентрације водоникових јона (молови по литру) и може бити у опсегу 1–14. Киселост земљишта се изражава рН скалом и представља негативан логаритам концентрације активних водоникових (H^+) јона у земљишном раствору. Земљишта са рН нижом од 7.0 сматрају се киселим и то: рН < 4.5 екстремно кисела; 4.5–5.0 веома јако кисела; 5.1–5.5 јако кисела; 5.6–6.0 умерено кисела; 6.1–7.3 слабо кисела до неутрална. С обзиром да је рН скала логаритамска, земљиште које има рН 5 је 10 пута киселије од земљишта са рН 6 и 100 пута киселије од земљишта са рН 7.

Ацидификација као природан процес и карактерише земљишта са повећаним садржајем сумпора, земљишта образована на киселом матичном супстрату, као и подручја у хумидним условима.

Закишељавање може настати природно у земљиштима развијеним од киселих матичних супстрата због ослобађања хемијских једињења која формирају киселине, у подручјима са великим падавинама услед излуживања базних једињења, на вишим надморским висинама услед ерозије и интензивних временских услова као последица високог садржаја гвожђа и алуминијум-оксида. Лоша пољопривредна пракса

може убразати или утицати на појаву киселости у кратком временском периоду.

Закишељавање у пољопривредним земљиштима може бити последица примене азотних ђубрива, испирања нитрата, уклањање остатака и накупљање органске материје у земљишту.

Људске активности које доводе до прекомерне емисије сумпора и азота, неконтролисано сечом шума и интензивном пољопривредом, процес ацидификације може бити знатно убрзан и интензиван. У овом контексту ацидификација земљишта представља облик деградације земљишта који води до трајног смањења квалитета и губитка земљишта.

Постоје две врсте киселости земљишта: активна киселост настала као последица доминантне концентрације H^+ јона у раствору и резервисана или измењива киселост коју карактерише заступљеност изменљивих јона H^+ и Al^{3+} на измењивим местима колоида земљишта. Већи проценат заступљености измењивих јона алумунијума и водоника, доводи до ниже рН и киселост земљишта је већа. Активност H^+ јона и хемијске реакције размене јона доводе до веће мобилности, концентрације и биолошке токсичности јона алуминијума, гвожђа и мангана и смањене доступности хранљивих елемената биљкама.

Повећана мобилност алуминијумових јона у земљишту може изазвати бројне негативне последице у екосистему. Тако висока концентрација Al^{3+} јона делује инхибирајуће на раст биљака и усвајање хранљивих материја. Биљке изложене високим концентрацијама алуминијума карактерише инхибиција раста корена дуж главне осе (елонгација – издуживање), корен постаје тањи, светлије боје и у неким случајевима некротиран.

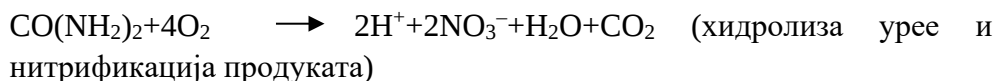
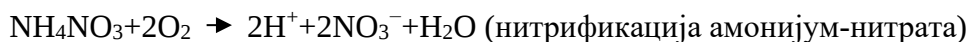
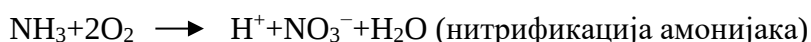
Токсичност алуминијума ретко се јавља при $pH > 5.0$, а испод ове вредности растворљивост и концентрација алуминијума експоненцијално расте као и његова потенцијална биолошка токсичност. Корелација између рН вредности и токсичности алуминијума није униформна па се рН не може сматрати добрим индикатором потенцијалне токсичности алуминијума осим код земљишта са сличним минералošким саставом и високом стопом разлагања минерала, где овај однос показује висок степен корелације. Фитотоксичност алуминијума у земљишту условљена је концентрацијом његових хемијских облика. Хемијски облик Al_{13} ,

$[\text{AlO}_4\text{Al}_{12}(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$, има 5-10 пута већу фитотоксичност него јони Al^{3+} . На основу резултата спроведених истраживања утврђен је степен ризотоксичности појединих облика алуминијума у земљишту и то: $\text{Al}_{13} > \text{Al}^{3+} > \text{AlF}_{2+} > \text{AlF}_{2+}$. Садржај Al^{3+} јона највећи је и доминантнији у односу на друге форме алуминијума у слоју земљишта до 30 cm, док је у слоју од 60 cm концентрација Al^{3+} јона најмања, садржај Al-F је доминантан облик алуминијума у слоју од 60 cm.

Укупна површина површинског слоја земљишта која је захваћена процесом ацидификације у свету процењује се између $3.777 \cdot 10^9$ – $3.950 \cdot 10^9$ ha, што чини приближно 30% копна, изузимајући површине под ледом. Потповршински слојеви земљишта захваћени процесом ацидификације се процењују на $2.918 \cdot 10^9$ ha.

Осетљивост земљишта на процес ацидификације условљен је типом геолошке подлоге, својстима–типом земљишта (киселост, садржај базних катјона, капацитет катјонске измене, текстура, садржај органске материје, капацитетом сорпције сумпора у земљишту), постојећом вегетацијом и количином киселе депозиције.

Фертилизери као узорчници киселости земљишта. Закишељавање земљишта које настаје употребом азотних ђубрива зависи од врсте ђубрива. Вубрива која садрже азот у облику амонијум јона, на пример, амонијум-сулфат, може закиселити земљиште у року од неколико недеља након примене. Најважнија реакција формирања киселина је микробиолошка оксидација амонијачних ђубрива која могу сама по себи бити јаке базе:



Ови фертилизери имају синтетичко порекло и њиховом применом се азот уноси у агроекосистеме, било као појединачно или као мешавина NPK ђубрива, који ће се оксидовати до еквивалента азотне киселине у добро дренираним и аеробним условима у већини пољопривредних земљишта. Калцијум-нитрат и натријум-нитрат неутралишу ефекат киселости земљишта, осим у случају када су нитрати излужени.

Међутим, примена ових агенаса је скупа и употреба је ограничена углавном на хортикултуру. Примена суперфосфатног ђубрива на култивисаним земљиштима и пашњацима не закишељава директно земљиште, док примена чистог сумпора закишељава земљиште.

Благо кисела ђубрива: уреа, амонијум-нитрат и раствори на бази урее, амонијум-нитрата. Ови производи доводе до умереног закишељавања с обзиром да садрже амонијак или производе амонијум јоне када се примењују на земљиште. За сваки килограм примењеног азота, за неутрализацију киселости потребно је око 1,8 kg чистог калцијум карбоната.

Умерено кисела ђубрива: диамонијум-фосфат (DAP). Диамонијум-фосфат је примарно фосфорно ђубриво које се углавном примењује у многим земљама и при примени показује умерени ефекат закишељавања земљишта. За сваки kg додатог N додат у виду DAP, потребно је 5,25 kg калцијум-карбоната за потпуну неутрализацију. Код примене фосфорног ђубрива, препоручује се троструки суперфосфат (0-46-0) који не утиче на pH вредност земљишта.

Јако кисела ђубрива: амонијум-сулфат, моноамонијум-фосфат (MAP). Ова ђубрива су веома кисела и треба их избегавати ако је могуће. Приближно 8 kg кречњака је потребно да се неутралише дејство 1 kg овог ђубрива. На пример, ако би се применило око 50 kg MAP или амонијум-сулфата морало би се применити око 400 kg креча. Пољопривредници обично примењују ђубрива, али не и креч. Дакле, земљиште на дуге стазе постаје кисело. Количине креча потребног за примену неких ђубрива приказане су у *табели 3.5*.

Табела 3.4. Количина CaCO_3 за неутрализацију

Извор азота	kg чистог CaCO_3 по kg примењеног N
Амонијум-сулфат	5,2
Анхидровани амонијак	1,8
Амонијум-нитрат	1,8
Уреа	1,8
MAP	5,0
DAP	3,1

Излуживање нитрата је главни узрок киселости пољопривредног земљишта. Нитрат настаје биолошком оксидацијом амонијака или се додаје у форми ђубрива. Амонијум се добија из ђубрива и

минерализацијом органске материје. Хемијски процеси који производе нитратни азот из амонијума јона доводи до благог закишељавања земљишта. Ову киселост неутралишу биљке које испуштају алкалну супстанцу док усвајају нитратни азот. Док биљке настављају да узимају сав нитратни азот, киселинско-базна равнотежа земљишта које окружује корење биљака остаје у равнотежи. Излуживање нарушава равнотежу кисело/базних процеса и резултује повећаном киселошћу земљишта. Излуживање нитрата је важно са аспекта утицаја на животну средину. Излужени нитрати са пољопривредних површина могу загадити подземне и површинске воде.

Уклањање остатака и проузова. Жетвени остаци, пашњаци и производи животињског порекла су благо алкални и уколико се настави са праксом њиховог уклањања временом ће доћи до смањења рН вредности земљишта. Ако се уклони врло мало нуспроизвода, на пример у производњи вуне, онда систем остаје скоро избалансиран. Када се уклони велика количина производа, као у случају производње сена (посебно детелина или сено луцерке), земљиште остаје знатно киселије. Уклањање производа спаљивањем, нпр. сагоревање жетвених остатака, не мења кисело-базну равнотежу земљишта, али изазива прераспodelу, остављајући базне компоненте на површини земљишта у виду пепела. Ако се пепео однесе и мокром депозицијом транспортује на велике удаљености, што се може десити након кише, земљиште постаје киселије.

Складиштење органске материје у земљишту. Повећање садржаја органске материје има многе предности, укључујући побољшање структуре земљишта, али такође долази и до повећава киселости земљишта. Закишељавање изазвано акумулацијом органске материје у дубљим слојевима земљишта није дуготрајно и може се смањити ако се органска материја разгради. Међутим, може доћи до трајне промене киселог статуса земљишта ако горњи слој земљишта који садржи органску материју буде еродираан или уклоњен.

Киселе кише. Излуживање катјона и нутријената (Са, Mg, K, и др.) из земљишта настаје као последица мокре киселе депозије. таложења. Кисела депозиција је позната као кисела киша. Јавља се када емисије киселих гасова у ваздуху (CO₂), амонијак (NH₃), оксиди азота (NO_x) и честице из сагоревања фосилних горива и осталих индустријских

процеса пролазе кроз сложене хемијске реакције у атмосфери и доспевају до површине земљишта у виду мокре (киша, снег, роса, магла) или суве (суве честице, гас) депозиције. Ефекат киселих киша на земљиште у великој мери зависи од пуферског капацитета земљишта. Кречњачка земљишта су најефикаснија у неутрализацији киселости насталих киселим кишама и спречавају снижавање рН вредности земљишта. Антропогено закишељавање земљишта као последица киселих киша повезано је са високим концентрацијама SO_4^{2-} и NO_3^- у земљишном раствору.

Ефекти закишељавања земљишта. Кисела земљишта могу имати само неке или пак све проблеме: смањење садржаја нутријената које рециклирају микроорганизми у земљишту (нпр. снабдевање азотом може бити смањено); фосфор у земљишту може постати мање доступан биљкама; што може бити изазвано недостацима калцијума, магнезијума и молибдена; токсичност алуминијума и мангана за биљке и микроорганизме; и усвајање тешких метала од стране биљака.

Растворљиви и изменљиви јони су доступни облици хранљивих материја у земљишту. рН земљишта регулише растворљивост елемената и једињења у земљишном раствору и регулише доступност хранљивих материја биљкама. Када се рН вредност земљишта смањи испод 6,5, односно како земљиште постаје киселије, растворљивост неких елемената као што су Fe, Al, Mn, Cu и Zn се повећава, а неких других, на пример, Ca, Mg и Mo се смањује. С друге стране, када рН земљишта порасте изнад 7,0, растворљивост Ca, Mg и Mo се повећава, а опада доступност Fe, Al, Mn, Cu и Zn. Алуминијум, иако веома доминантан у земљишту, није значајан када су биљке у питању. На јако киселим земљиштима (рН<5), растворљивост Al заједно са Fe и Mn расте до те мере да они постају токсични за многе биљке. Штавише, биљке могу патити од недостатка Ca и Mg у киселим земљиштима. При ниским рН (<5,5), фосфор се таложи са Al, Fe и Mn у форми њихових полифосфати. При вишим рН (>8,0), P се таложи са Ca. И код киселих и алкалних земљишта, доступност P је смањена до нивоа потпуног недостатка. Доступност P је обично већа у опсегу рН 6,5-7,0. Недостатак бора се може јавити у јако киселим и јако алкалним земљиштима. Доступност макронутријената (Ca, Mg, K, P, N, S) и Mo и B су ограничени при нижим рН. С друге стране, доступност већине макронутријената (Fe,

Mn, Zn, Cu, Co) расте при нижим рН. Најоптималнији услови за усвајање хранљивих материја за биљке су када је рН опсегу од 5,5-6,5.

Токсичност гвожђа, алуминијума и мангана. Токсичност хранљивих материја може се јавити у киселим земљиштима када је рН 4,8 или мање. Два елемента испољавају највећу токсичност у киселим земљиштима, а то су алуминијум (Al) и манган (Mn). У јако киселим земљиштима (рН<4,3), алуминијум и манган постају растворени и доступни и испољавају негативан ефекат на корење биљака. Токсичност алуминијума је најчешћи ефекат код биљака на киселим земљиштима и изазива смањење раста кореновог система. Смањен раст корена смањује усвајање хранљивих материја и воде што резултује и смањеним приносом. Неке биљке су високо толерантне на високе концентрације Al у земљишном раствору. Биљке као што су луцерка, репица и јечам тешко се развијају и расту у киселим земљиштима. Ниска рН и токсичност алуминијума неповратно утичу на раст и развој луцерке. Вишегодишњи пашњаци са луцерком доводе до успоравања процеса ацидификације земљишта. Алуминијум може блокирати усвајање Са и може исталожити Р у надземним деловима биљке. То утиче на метаболизам Р, формирање АТП и функцију ДНК. Биљке које пате од токсичности алуминијумом производе симптоме на листовима који подсећају на недостатак фосфора.

Токсичност оксидованим облицима Fe често се јавља у земљиштима која имају рН<4. Токсичност манганом јавља се у земљиштима са 200–5000 mg Mn/kg. Концентрације мангана у опсегу 0,2-12 mM изазивају озбиљна ограничења раста код неких култура.

Раст биљке. Благо кисело земљиште (рН око 6,5) је оптимално за већину гајених биљака. На овом рН, микроорганизми земљишта су најактивнији, а хранљиве материје за биљке су лако доступне. У екстремно алкалним и киселим условима, ова равнотежа је поремећена, а хранљиве материје које су биле у адекватним залихама могу постати или дефицитарне или токсичне за раст биљака. Неки есенцијални хранљиви елементи као што су фосфор, калцијум, магнезијум, и молибден постају недоступни ако рН вредност земљишта постане превише ниска односно земљиште кисело. Кисели услови у земљишту смањују принос у пољопривредним системима што доводи мање

профитабилност и повећаног уноса ђубрива за одржавање продуктивне пољопривреде.

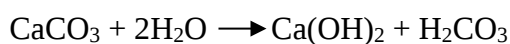
Микроорганизми. Киселост земљишта лимитира опстанак и постојаност соја *Rhizobium*. Повећана концентрација алуминијума је токсична за раст *Rhizobium* соја утичући на процес фиксације азота. Ова врста соја има значајан утицај на принос усева и пашњака који се ослањају на биолошки унос азота. При веома ниским вредностима рН земљишта и у условима високе растворљивости алуминијума, може се испољити метагенетски ефекат на *Rhizobium*. Биодиверзитет микроорганизама може се променити са променом рН вредности земљишта. У добро пропусном киселом земљишту, раст бактерија је инхибиран токсичношћу нутријената и малом доступношћу нутријената. Киселост утиче на промене микробне заједнице земљишта и смањују се ефекти корена и ризосфере. У овим условима смањује се разградња органске материје и кружење нутријената. Киселост смањује активност нитрификационих бактерија које су одговорне за разлагање органске материје у амонијак и нитрат за усвајање од стране биљака. За гљиве генерално оптималан је нижи рН у поређењу са оптимумом за бактерије.

Киселост земљишта и фауна. Киселост земљишта утиче на равнотежу између присутних организама и биодиверзитет земљишта. Уопштено, фауна земљишта има значајно мањи капацитет да реагује на велике промене рН вредности земљишта. Већина макрофауне укључујући врсте које се налазе у дубоким слојевима земљишта као што су црви и термити показују тенденцију смањења бројности у условима киселог земљишта. Неке врсте црва су у стању да толеришу киселе услове земљишта и играју активну улогу у размножавају, али на ове црве утиче влага средине.

Управљање киселим земљиштем. Упркос великим проблемима за пољопривредну употребу, кисела земљишта могу бити веома продуктивна ако се примени креч и нутријенти у одговарајућем времену и количини. За управљање киселим земљишта, рН вредност треба да се подеси на жељени ниво применом адекватних мера наводњавања и одводњавања и одабиром одговарајућих усева. Примена креча је ефикасан начин за повећање рН вредности земљишта и смањење токсичности гвожђа, алуминијума, мангана и молибденума. Креч такође стимулише биолошку активност земљишта и утиче позитивно на циклус азота, фосфора и сумпора. Повећава доступност Р за биљке. Побољшава

се структура земљишта, порозност, аерација и кретање воде у земљишту. Међутим, прекомерна примена креча смањује доступност фосфора и изазива недостатке микроелемената као што су манган, цинк, бакар и молибден. Киселост земљишта односно нижа рН вредност земљишта, токсичност Al и Mn, недостатак Ca и Mo се могу смањити употребом креча. Кречни материјали или креч су сви материјали који садрже Ca или Mg и који су способни неутралишу киселост земљишта. У групу ових материјала углавном спадају карбонати и бикарбонати, понекад оксиди и хидроксиди калцијума и магнезијума.

Потребна количина креча зависи од пуферског капацитета земљишта. Креч примењен на влажно земљиште подлеже хидролизи при чему се ствара алкална рН, у складу са следећом реакцијом:

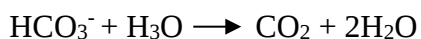


Међутим, јака база $\text{Ca}(\text{OH})_2$ реагује са CO_2 из ваздуха земљишта при чему настаје $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ тако да је сумарна реакција следећа:



Бикарбонатни јони неутралишу хидронијум јоне у земљишном раствору и јони Ca^{2+} замењују јоне алуминијума и хидронијум на измењивим местима колоида.

Када су у раствореном облику, јони алуминијума и хидронијум јони се такође неутралишу бикарбонатним јонима према следећој реакцији:



Постугнута финална рН вредност може се одредити применом једначине:

$$\text{pH} = K - 1/2 \log_{10}(P_{\text{CO}_2}) - 1/2 \log_{10}(\text{Ca})$$

где је P_{CO_2} парцијални притисак CO_2 , (Ca) је активност Ca^{2+} јона у раствору и $K = 4,8$ ако карбонат има растворљивост чистог калцита, за карбонатне соли које су растворљивије од чистог калцита, $K = 5,2$.

Управљање закишељеним земљиштем захтева смањење уноса киселина и губитка нутријената, као и примену креча у циљу повећања рН вредности земљишта.

Заслањивање земљишта. За земљиште се каже да је заслањено ако је електрична проводљивост (EC_e) земљишног раствора већа од 4 dS/m. Слана земљишта генерално садрже висок садржај растворених соли хлорида и сулфата, са нешто мање карбоната и бикарбоната, натријума, калијума, калцијума и магнезијума. Заслањено земљиште је штетно за све биљке осим халофита; изазива стрес кроз осмотске поремећаје у биљном ткиву и токсичности соли. Клијавост семена, раст биљака и принос усева су знатно мањи на заслањеном земљишту. Нека земљишта су природно слана. Настају процесом који се зове примарна салинизација или природна салинизација. Исто тако одређена земљишта су заслањена лошим управљањем, посебно неправилним наводњавањем и лошом дренажом, односно мењањем хидролошке равнотеже. Ово је познато као секундарна салинизација или салинизација изазвана антропогеним дејством. Заслањивање, природно и антропогено, може се десити у свим климатским регионима – аридним, семиаридним и влажним. У сушним и семиаридним регионима, смањен садржај воде као и мале количине падавина и висок степен евапорације не изазива испирања соли из земљишта. Штавише, постоји нето капиларни пораст воде који доводи до појаве соли на површини земљишта. У влажним подручјима, с друге стране, прекомерно наводњавање и лоша дренажа изазивају подизање нивоа подземних вода која може достићи ниво зоне корена и засолити земљиште.

Већина гајених биљака, као и земљишних микроорганизама, могу се нормално хранити само из веома разблажених раствора соли. За већину гајених биљака одговара земљишни раствор са ниским уделом соли од 0,001 до 0,01%. Од тога концентрованији земљишни раствор, посебно ако достиже вредност од 0,1% или већу, делује неповољно на биљке. Висока концентрација соли у земљишном раствору отежава усвајање хранљивих материја и воде, чак и када је хипотонична у односу на осмотски потенцијал ћелија корена. Истовремено, висока концентрација појединих јона делује токсично на биљке.

Процењено је да широм света има око 76,6 милиона ha заслањеног земљишта као последица антропогених активности. Велика подручја Индије, Кине, Пакистана и централноазијских земаља су заслањена као последица прекомерног наводњавања и недостатка дренажних система. Земљишта су постала заслањена као последица употребе слане воде за наводњавање. Два важна приступа у управљању заслањеним

земљиштом су (1) избор биљке врсте отпорне на соли и (2) уклањање вишка соли из зоне корена. Неколико култура отпорних на соли могу се гајити на оваквом земљишту. Уклањање соли наводњавањем и дренажом слане вода може бити финансијски неизводљиво у неким ситуацијама. Да ли ће рекултивација бити исплатива или не зависи од нивоа салинитета, цене воде и потребног времена, рада, итд. Рекултивација је релативно лака ако је само земљиште слано, али тешко ако је земљишни раствор заслањен.

Вода која доспева у земљиште наводњавањем разблажује земљишни раствор. Истовремено са водом унета растворљива со мења првобитну количину и састав соли земљишта. Мења се укупан садржај катјона и анјона, као и однос појединих јона. Такође, вода при инфилтрацији носи и део соли, чиме се мења њихова расподела по профилу земљишта. Између чврсте и течне фазе настаје ново равнотежно стање, мења се састав адсорбованих катјона. Стога се при наводњавању већом количином воде могу изазвати промене у количини и саставу земљишта. До заслањивања земљишта може доћи при: наводњавању водом са већим садржајем соли, преношењем соли ветром у приобалном морском појасу и прекомерном употребом минералних ђубрива. Опасност од заслањивања, нарочито је присутна у семиаридним и аридним пределима које карактерише мала количина падавина.

Управљање заслањеним земљиштем. У интензивној пољопривредној пракси примена минералних ђубрива је редовна агротехничка мера. Количине минералних ђубрива које се примењују у већини случајева су веће од онога колико биљка може искористити што доводи до накупљања соли у ризосферном слоју, односно у зони кореновог система.

Осим примене минералних ђубрива до заслањивања земљишта доводи и низ других фактора као што су: квалитет воде за наводњавање и начин наводњавања, климатски услови и тип земљишта.

Наводњавање као агротехничка мера на заслањивање земљишта утиче на два начина: директно – када се примењује вода која је минерализована, односно има већи садржај минералних материја и индиректно – када се примењују веће количине воде за наводњавање и при томе дође до подизања нивоа подземне воде која је минерализована.

Већина присутних соли у води за наводњавање су хлориди, сулфати, карбонати и бикарбонати.

Климатски услови могу значајно утицати на заслањивање земљишта и то количином и распоредом падавина и температуром. У сушим и топлим периодима у току вегетације потребе биљака за водом се повећавају, а толерантност према садржају соли се смањује. У тим условима сва вода из земљишта троши се на евапотранспирацију биљака и испаравање са површине земљишта, а соли остају наталожене у ризосферном слоју. Веће количине падавина подижу ниво подземних вода до ризосферног слоја, а самим тим повећава се и концентрација соли.

Јони који су одговорни за заслањивање земљишта су Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и Cl^- .

Со у земљишту смањује осмотски притисак тако да биљке не могу да усвајају воду. Када је у земљишту повишена концентрација соли до нивоа који је већи од концентрације у корену престаје усвајање воде из спољашње средине или је оно значајно смањено и отежано. На тај начин смањују се доступне количине воде за биљке без обзира на њен садржај у земљишту због чега биљке могу да буду изложене стресу. Со може да покаже и директну токсичност, али је њено штетно дејство првенствено везано за смањење моћи усвајања воде.

Управљање сланим земљиштем подразумева сетву култура отпорних на соли и излуживање соли испод зоне корена. Ако на површини земљишта постоји формирана заслањена покорица, уклањање ове коре може се вршити или механички или испирањем земљишта. Ефикасно испирање се може постићи плављењем и исушивањем земљишта. У неким случајевима само су земљишта слана. За биљке са плитким кореновим системом, соли се могу транспортовати испод зоне корена привременим испирањем. Ова техника ће захтевати мање количине воде него нормално испирање. Може се користити и наводњавање браздама. Наводњавање кап по кап у пределу корена такође разблажује и одваја соли. Ако је земљиште значајно заслањено, потребно је уклонити вишак растворених соли темељним испирањем. Међутим, неопходно је проценити потребну количину воде за испирањем соли. Садржај соли у земљишту, ниво заслањености до дубине до које је пожељна рекултивација и карактеристике земљишта су важни фактори за одређивање потребне количине воде. Корисно правило је да ће дубина

инфилтрације воде уклонити скоро 80% соли из дате дубине земљишта. Дакле, уколико кроз земљиште до дубине од 30 cm биће уклоњено приближно 80% присутних соли у горњем слоју од 30 cm земљишта.

За испирање растворених соли у наводњаваним земљиштима, већа количине воде у односу на потребну мора се применити да се задовољи потреба биљака за евапотранспирацијом кроз зону корена и да се излуже прекомерно растворене соли. Ово додатна количина воде за наводњавање се обично изражава као захтев излуживања (LR). Овај захтев је дефинисан као део инфилтриране воде који мора да прође кроз зону корена да заслањеност земљишта не пређе ниво који би значајно смањио принос у односу на нормално стање земљишта који је повезан са добром праксом управљања и уједначеним испирањем.

$$LR = \frac{EC_{iw}}{EC_{dw}},$$

где је LR захтев излуживања, EC_{iw} је електрична проводљивост воде за наводњавање, а EC_{dw} је електрична проводљивост дренажне воде. Неколико метода се користи за излуживање.

Однос дренажне воде и воде примењене за наводњавање који ће вратити соли у равнотежу у земљишту представља захтев излуживања, LR. Однос стварне дренажне воде и воде примењене за наводњавање представља фракцију излуживања, LF. Идеално је када је $LF = LR$, али обично је $LF > LR$, услед неуједначености у примени воде или код система наводњавања браздама.

Спреј наводњавање је ефикасније, али је опрема скупа. Наводњавање кап по кап је најефикасније и у том случају може се користити вода већег салинитета од нормалног. Сва наводњавања треба да буду изведена у складу са потрошњом воде од стране биљака.

Испирање се може постићи додатком свеже воде на површину земљишта и даље инфилтрацијом. Ефикасно испирање се може постићи када се слана дренажна вода испушта кроз подземне дренажне цеви. Испирање може смањити ниво заслањености када постоји задовољавајућа природна дренажа, односно одводњавање забарених површина без подизања водостаја. Методе излуживања је пожељно применити када је садржај влаге у земљишту низак и ниво подземне

воде дубок. Способност испирања воде кроз профил земљишта зависи од унутрашње дренаже. Укупна ефикасност система мелиорације зависи од испирања. Излуживање носи соли кроз профил земљишта и изван зоне корена. Ако је природна дренажа лоша, треба поставити одвод од плочица или цеви од стране стручних лица. Када су правилно инсталиране дренажне цеви, оне су веома ефикасне у отицању излужених соли. Систем одводи воду само ако је постављен испод зоне засићења. Неколико метода наводњавања и дренаже могу се користити за управљање заслањеном водом у сланим земљиштима. Метода кап по кап и метода распршивањем су погодне у благо заслањеним земљиштима. Поједине биљке су на пример толерантне према заслањеном земљишту. То значи да је принос сетве није смањен за више од 25%. Неке културе су благо толерантне; друге су високо толерантне. Потребно је да пољопривредници бирају културе на основу вредности салинитета њихових земљишта.

3.7 Загађење земљишта

Урбанизација, интезиван развој градова и индустрије, саобраћај и интезивна пољопривреда доводе до прекомерног загађења животне средине, које укључују и земљиште. Под појмом загађење земљишта подразумевају се процеси нагомилавања у земљиште токсичних једињења, соли, радиоактивних материјала и свих средстава која изазивају негативне ефекте на раст биљака и здравље људи и животиња. Загађење земљишта подразумева промену физичких, хемијских и биолошких својстава земљишта која даље доводе до смањења плодности, смањења нормалног процеса разлагања, а затим и поремећаја у циклусима кружења појединих елемената у природи. Загађујуће супстанце које се могу детектовати у површинским и дубинским слојевима земљишта могу бити производ природних и антропогених активности. У природне изворе загађења убрајају се: налазишта руда, минерализација, стене специфичног састава, шумски пожари, вулкани, земљотреси, олује и пешчане олује, ерозије, поплаве. У антропогене изворе загађења убрајају се: рударство, индустрија, пољопривреда, урбанизација и комуналне активности, саобраћај и транспорт, шумски пожари које су изазвали људи, поплаве, ерозије. Када загађујуће материје доспеју у земљиште на било који од наведених начина, њихова даља судбина зависи од низа физичких, хемијских и биолошких фактора, а чији се утицаји преплићу. Врло је значајан облик

једињења у коме се загађујућа материја налази, као и особине самог земљишта (вегетација, обрада земљишта, климатски услови). Највећа контаминација је обично у подручјима индустријских зона и непосредној близини саобраћајница и депонија отпада. Антропогена деградација подразумева поремећај функција земљишта у биљној производњи. Најчешће настаје као последица нерационалног коришћења земљишта. Извори загађења земљишта су:

1. интензивна пољопривреда (пестициди, ђубрива, итд),
2. комуналне и индустријске отпадне воде,
3. комунални отпад, комуналне отпадне воде, саобраћај и
4. аерозагађење (киселе кише).

Хемикалије које су најчешће присутне у земљишту су: тешки метали, нафтни угљоводоници, прекомерна примена пестициди и минералних ђубрива.

3.7.1. Судбина и понашање метала у земљишту

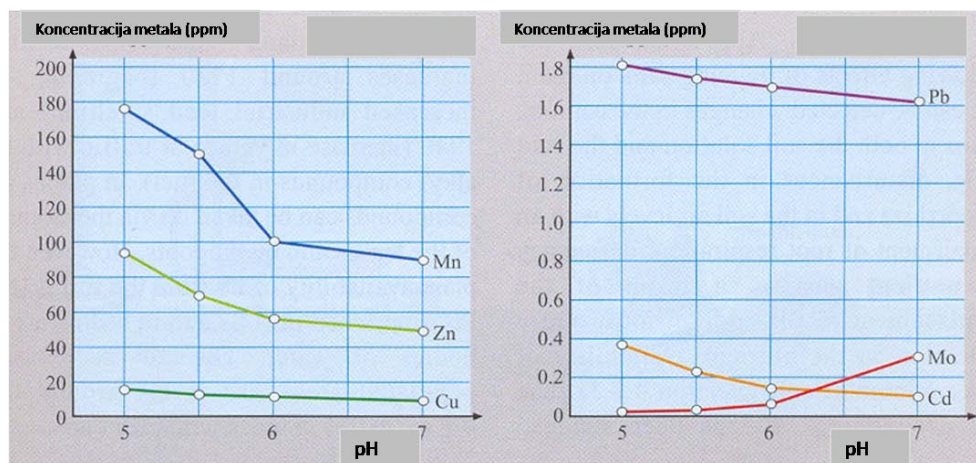
Динамика калијума је добар пример понашања метала или катјона у земљишту; у овом случају се земљиште посматра као агросистем. У биљкама, калијум има значајну улогу: јони K^+ утичу на осмотски притисак у ћелијама (садржај воде у биљкама), калијум се везује за колоиде плазме у ћелијама биљака, утиче на бубрење и активира ензиме који су значајни за фотосинтезу и дисање. У земљишту, калијум је већином везан за минерале глине. Калијум који је slabим силама везан за површину глине постаје доступан биљкама. Калијум који је везан између различитих слојева глине се назива међуслојни калијум и мање је доступан биљкама. Део калијума који је везан у кристалној решетки може бити доступан само после неког времена односно након процеса старења. Адсорпционе равнотеже се успостављају између различитих динамичких процеса везивања калијума, а као резултат равнотеже одређене концентрације калијума могу бити доступне биљкама. Тако у земљишту са ниским садржајем калијума, после примене калијумовог ђубрива сорпциона места на минералима глине су у потпуности попуњена све док су калијумови јони у земљишном раствору на располагању биљкама односно до формирања адсорпционе равнотеже.

Слични равнотежни процеси такође постоје и за друге јоне метала који су у конкуренцији са јонима калијума.

Земљишта из преиндустријског времена су имала концентрације кадмијума од 0,01 до 0,1 mg kg⁻¹ (данашњи просек је негде 0,5 mg kg⁻¹) и концентрације олова од 0,1 до 1 mg kg⁻¹ (данашњи просек је око 30 mg kg⁻¹). Повећане концентрације тешких метала детектију се у близини насеља и места рударења. Термоелектране на угљ и операције топљења метала су извори емисије, из којих се тешки метали везани за суспендоване честице емитију и транспортују ваздухом. Сувом или мокром депозицијом метали са суспендованим честицама из ваздуха доспевају до површине земљишта. Сувом депозицијом се суспендоване честице депонују брже и обично ближе извору емисије; мокром депозицијом суспендоване честице са тешким металима на својој површини прелазе веће удаљености. Суспендоване честице са тешким металима на својој површини могу се поделити у пет главних извора: J_A из атмосфере; J_B из биоцида; J_C из третираног муља који садржи тешке метале, који се може применити на пољопривредно земљиште као ђубриво; J_F метали из минералног ђубрива; J_M из стајњака. Тешки метали из земљишта даље могу бити усвојени од стране биљке J_P или се ширити жетвом, елувијацијом и ерозијом J_E или излуживањем у ниже слојеве J_V . Тако се укупан биланс може представити као:

$$J = J_A + J_B + J_C + J_F + J_M - J_P - J_E - J_V$$

Усвајање микронутријената и тешких метала који могу испољити потенцијалну токсичност као што су Cd и Cu зависи од рН вредности земљишта. Осим Мо, растворљивост и доступност за биљке се смањује са повећањем рН, што је приказано на *слици 3.7*. Уколико је пољопривредно земљиште кисело, захтева се додавање CaCO₃ како би се одржала рН земљишног раствора 6,5. Пољопривредне биљке обично не расту при рН < 5,5 због токсичности Al. Међутим, треба напоменути да се недостатак Fe и Mn може јавити када је рН земљишта висока.



Слика 3.7. Доступност тешких метала у зависности од рН вредности земљишта

Подаци о укупном садржају тешких метала не пружају јасну слику о њиховој биодоступности и токсичности у животној средини. Биљкама и животињама су најдоступније оне фракције тешких метала које су најмобилније (јонизовани, у изменљивој фракцији, лако растворни и органо-метални комплекси). Потенцијално доступне фракције метала су специфично адсорбовани и метали везани у форми карбоната, метали оклудовани на оксидима гвожђа и мангана и везани за органску материју. При промени рН, оксидационих и редукционих услова ови метали могу прећи у земљишни раствор.

Мобилност метала у чврстој фази. Растворени облици метали су они који се налазе у води (порној води) у облику ањонских и катјонских органских и неорганских (нпр. карбонатних) комплекса и хидратисаних јона чија је растворљивост већа при нижим рН. Изменљиву фракцију метала чине они који су слабо везани за колоидне честице. У овим облицима метали показују изузетну мобилност, која се може знатно повећати јонском изменом са порастом садржаја катјона. Метали асоцирани са карбонатним минералима чине карбонатну фракцију која може бити новопреципитирана у седименту. Промена рН вредности значајно утиче на мобилност метала у овом облику тако што се снижењем рН повећава растворљивост карбоната, а тиме и ослобађање адсорбованих јона тешких метала. Промена рН вредности може уследити нпр. након киселих киша. Из ове фракције се метали могу лако мобилисати, па се може описати као лако мобилна фракција. Метали

асоцирани са Fe-Mn оксидима (Fe-Mn оксидна фракција) показују средњу мобилност, а што зависи и од редокс услова средине, јер уколико средина постане аноксична може доћи до мобилизације асоцираних метала. У том случају се, међутим, метали могу адсорбовати на сулфидним минералима и таложити у облику сулфида. Промена редокс потенцијала средине се дешава у случају високог садржаја органских материја које подлежу процесу оксидације. То је један од најважнијих процеса који контролише мобилност тешких метала. Органска фракција подразумева метале који су везани за органску материју (детритус, живи организми, хуминске киселине итд.). Метали у овом облику показују средњу мобилност, али услед оксидације органских материја може доћи до повећања мобилности. Метали се могу јављати асоцирани са сулфидним минералима (сулфидна фракција) у аноксичним условима или преципитирани у облику сулфида. Мобилност овако везаних метала зависи од услова средине будући да повећање садржаја кисеоника (оксична средина) може довести до њиховог ослобађања. Ови облици су, иначе, мање растворљиви од оксидованих форми. Повећање садржаја кисеоника у седименту може уследити измештањем акватичних зона у току олуја, измуљивањем, итд. Фракција метала која подразумева оне инкапсулиране у кристалну структуру (кристална фракција) није биодоступна и не представља количину метала која има потенцијални токсични ефекат на организме. Они чине резидуалну фракцију метала. Фактори средине који утичу на депоновање метала у земљишту и њихову функцију као металних талога су:

- *Детритични минерали.* Присуство минерала у талогу fine фракције седимента резултује обогаћивањем седимента металима, путем процеса површинске адсорпције. С друге стране, кварц, фелдспат и карбонати, теже да имају супротан ефекат.
- *Сорпција.* Капацитет чврсте фазе да адсорбује тешке метале опада у низу: $MnO_2 > \text{хуминске киселине} > \text{Fe оксиди} > \text{минерали из глине}$. Сорпциони капацитет Fe оксида за метале је десет пута мањи него нпр. за MnO_2 . Од укупног капацитета везивања хуминских материја, приближно $2/3$ може бити приписано хемијској сорпцији, а $1/3$ катјонској измени.
- *Копреципитација са хидратисаним оксидима и карбонатима Fe и Mn.* Под оксидационим условима, хидратисани оксиди Fe и Mn дају високе ефекте смањења садржаја растворених метала. Копреципитација са карбонатима може бити важан механизам за депозицију Zn и Cd кад су

карбонати главна компонента, а то је кад су други супстрати, нарочито хидратисани Fe оксиди или органске супстанце присутне у мањој количини.

- *Комплексирање и флокулација са органским материјама.* У системима богатим са органским материјама, улога оксида Fe и Mn је много мање значајна због конкуренције знатно реактивније хуминске киселине, органо-глине и оксида покривених органским материјама. Органски омотач значајно доприноси капацитету адсорпције. Метали комплексирани са хуминским киселинама постају недоступни за формирање сулфида, хидроксида и карбоната и стога спречавају формирање нерастворних соли. Хемијски и електростатички процеси резултују флокулацијом Fe, Al и хумата, посебно у морским заливима.
- *Преципитација метала.* Процес флокулације метал-органског комплекса и копреципитације са хидратисаним оксидом Fe и Mn је од значаја посебно за метале доспеле у животну средину услед антропогене активности.

Тешки метал, олово, природно је присутно у Земљиној кори просечно око 16 mg/kg у зависности од типа стена. Примарни антропогени утицај потиче од рударења и топљења оловних руда. Надаље, главни извор емисије су појединачне емисије из производних процеса као и термалних процеса као што је сагоревање угља (2-40 mg Pb/kg), док депоније представљају секундарне емисије. Главна емисија Pb почетком 1990. год. било је сагоревање горива, металуршка индустрија, пећи и производња цемента. Утицај Pb на животну средину постао је мањи у последњих 20 година. Емисија честица олова у ваздух је у опсегу 0,1-1 g/m³. Смањење садржаја Pb у гориву после доношења закона о садржају олова у гориву дала је брз и непосредан ефекат на смањење емисије Pb у облику суспендованих честица у ваздуху.

Мобилност Pb је ниска због његове мале растворљивости, тако да се олово генерално у води детектује у ниским концентрацијама (до око 10 µg/L). Испитивања леда на Гренланду показују два изразита пораста око 1750. год. (почетак индустријског топљења олова) и 1940. год. (повећање броја возила са алкил-оловом у гориву). Код биљака Pb може бити усвојено путем стома лишћа и преко корена. Међутим, доступност Pb за биљке из земљишта је мала. Pb се депонује у земљишту и у седиментима површинских вода.

Методе екстракције тешких метала. За испитивање укупне и доступне концентрације метала у земљишту педолози су изводили дуготрајне експерименте излуживања да би се одредила биодоступност Mn, Fe, Zn, и Cu у циљу процене токсичности (слика 3.8).

Данас се користе селективне екстракционе методе за разарање компонената земљишта и ослобађања елемената везаних за њих. Приликом екстракције долази до екстраховања елемената са измењивих места на површини чврсте супстанце, или елемената везаних или асоцираних са Fe или Mn хидрооксидима, или са органском материјом.

BCR (*Bureau Communautaire de Reference*) секвенцијална екстракција је једна од најчешће примењиваних процедура за анализу земљишта. У овој екстракцији постоје три фракције: измењива, водено и кисело растворна; редуцибилна и оксидациона. У BCR секвенцијалној екстракцији препоручује се четврти корак који подразумева дигестију узорака тј. одређивање псеудо укупног садржаја елемената. Прве две фазе екстракције су посебно важне за хемију животне средине, јер оне укључују промену pH.

Растварачи се могу класификовати у односу на одговарајућу компоненту у земљишту коју растварају или у односу на раскидање одговарајуће везе остварене између елемента и компоненте земљишта. Измењиви, неспецифично сорбовани елементи се могу десорбовати истискивањем катјонима K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} или NH_4^+ . Амонијумове соли јаких киселина, као нпр. NH_4Cl или NH_4NO_3 могу да сниже pH и да потпомогну хидролизу глина. Комплексирање ацетатним анјоном онемогућава и ресорпцију елемената у раствору који су у предходном кораку десорбовани. CH_3COONH_4 (1 mol/l, pH 7) је у великом броју случајева прихваћен као екстракционо средство и препоручује се од стране европских експерата за испитивање јоноизмењивих елемената под покровитељством бироа за референтни материјал.

Ekstrakcioni agens	Tip vezivanja						
	Izmena jona	Površinska adsorpcija	Precipitacija	Koprecipitacija	Organski kompleksi	Okluzija	Mineralna kristalna rešetka
Elektrolit	MgCl ₂						
Sirćetna kiselina (pufer)	CH ₃ COOH + CH ₃ COOH/CH ₃ COONa						
Sirćetna kiselina (redukcija)	CH ₃ COOH + NH ₂ OH						
Oksalna kiselina (pufer)	(COOH) ₂ + (COONH ₄) ₂						
Razblažene mineralne kiseline	HNO ₃						
Digestija: miks kiselina + HF	HCB + HNO ₃ + HF						
Akva regia	HCB						
Alkalna fuzija (ekstrakt+kiselina)	Na ₂ CO ₃						
Osnovni rastvor				NaOH			
Formiranje kompleksa	EDTA, DTPA						
	Limunska kiselina						

Слика 3.8. Доступност тешких метала применом различитих екстракционих агенаса

Специфично сорбовани елементи, елементи везани ковалентним везама, не могу се лако заменити са макро-катјонима као што су K^+ или Ca^{2+} , већ захтевају H^+ јон или „меке“ катјоне. Разлагање хуминских супстанци у земљишту јаким базама није пожељно за специјацију елемената у траговима, пошто би се многи метали сталожили на већим рН. Најчешће коришћена процедура јесте оксидација органске материје са H_2O_2 и накнадна екстракција са CH_3COONH_4 ради спречавања ресорпције или таложења десорбованих елемената. Настали CO_2^- током оксидације са H_2O_2 може да реагује са Fe и Mn хидрооксидима и да доведе до десорбовања елемената сорбованих на глинама. Оксидација базним $NaClO$ је препоручена иако је фракција органски везаних елемената различита у различитим слојевима земљишта. Ниједна од ове две оксидативне методе комплетно не разара сву органску материју.

Само драстична оксидациона процедура која укључује јаке киселине као што су HNO_3 , $HClO_4$ или смеша обе киселине, може да утиче на потпуну деструкцију органске материје.

Највише заступљен реагенс за екстракцију елемената из карбонатне фазе је 1 M CH_3COONa закишељен до рН 5 са CH_3COOH . Само присуство CH_3COOH утиче на десорбовање елемената који су сорбовани на неорганским и органским компонентама у земљишту.

Аморфни хирооксиди Fe и Mn јако сорбују елементе у траговима, на почетку у измењивом облику, док се временом трансформишу у мање мобилне, специфично адсорбоване облике. Дигестија са јаким киселинама као што су HNO_3 , HCl или са њиховом смешом (дигестија са царском водом), не разара силикатни матрикс и може да да максималну количину елемента која је потенцијално мобилна са променом услова у окружењу.

3.7.2. Кретање органских полутаната у земљишту са водом

Вода се, носећи растворене и суспендоване загађујуће супстанце, креће ка подземној води пролазећи кроз незасићену до засићене зоне земљишта. Кретање кроз незасићену зону, карактеришу испаравање, транспирација, инфилтрација и перколација. Вода, у којој су растворене загађујуће супстанце, перколира услед гравитационе силе кроз велике поре у земљишту и задржава се у мањим порама дејством капиларних сила. Ако укупна запремина пора расте, расте и брзина перколације. У зависности од величине пора и њихове дистрибуције, брзина перколације може да износи пар центиметара на сат или на годину. Физичка и хемијска својства воде (густина, вискозност, површински напон, и др.), не утичу битно на брзину перколације, ако је садржај загађујућих супстанци у води висок, онда се мењају својства воде и земљишта, што утиче и на брзину перколације. У води су најчешће присутни катјони калцијума, магнезијума и натријума и њихов утицај расте са порастом садржаја колоидних честица у земљишту. Бубрење земљишта, проузроковано порастом салинитета, смањује хидрауличку проводљивост. Глинени материјали бубре и шире се на рачун пора, чиме се смањује проводљивост.

Земљиште обично садржи поре различите површине. Међутим, у земљишту постоје и слојеви фине глине са ситним порама, окружени грубим песком са великим порама. У таквим случајевима, слојеви са малим порама успоравају брзину перколације. Кад раствор загађујућих супстанци доспе до подземне воде, он наставља кретање у смеру кретања подземне воде, формирајући „ток загађене воде“ или „струју загађеног раствора“ унутар слојева подземне воде.

Неводену течну фазу (енг. *NAPLs – Nonaqueous Phase Liquids*) чине углавном угљоводоници, који се јављају као загађујуће супстанце немешљиве са водом и/или ваздухом, тако да на месту загађења чине

четврту фазу. То су обично мултикомпоненте смеше једињења различитих по хемијском саставу, растворљивости у води и различите густине. Слично води, неводена течна фаза испуштена на површину земљишта, продире кроз површину путевима са најмањим отпором. Ова фаза може привремено да се задржи на површини ширећи се најпре у свим правцима као филм константне дебљине, нарочито уколико земљиште има већи садржај глине и малу пропустљивост. Неводена течна фаза се затим инфилтрира надоле кроз незасићену зону земљишта под дејством гравитације и капиларних сила уз засићавање свих пора на свом путу. На песковитим земљиштима инфилтрација је углавном брза. Вискозност неводене течне фазе такође утиче на брзину инфилтрације: тежи угљоводоници се инфилтрирају спорије у односу на бензин и керозин. После испуштања, неводена течна фаза се креће вертикално надоле под дејством гравитације. Мале, испуштене количине се задржавају у порама и пукотинама незасићене зоне. Приликом инфилтрације, вода раствара остатке течне неводене фазе и носи их до подземне воде, формирајући загађени ток, који се креће заједно са подземном водом. Приликом инфилтрације неводене течне фазе кроз незасићену зону земљишта се издвајају паре испарљивих једињења, које се крећу под правим углом у односу на ток течности кроз слојеве који имају већу пропустљивост. Ако се ради о већем извору течне неводене фазе, она инфилтрацијом стиже до воденог огледала подземне воде, пролази кроз капиларни слој раствара се у подземној води и ток загађене воде наставља да се креће заједно са водом. Нерастворени део неводене течне фазе, као лакши од воде плива по води и креће се заједно са њом разарујући капиларни слој.

Основни принципи који се користе за тумачење миграције лаке неводене течне фазе у незасићеној зони земљишта, примењују се и на миграцији тешке неводене течне фазе. Тешка неводена течна фаза ће се кретати надоле под дејством гравитационих и капиларних сила, растварајући се, попуњавајући поре, адсорбоваће се и испарити, али кад доспе до водене површине подземне воде, продреће кроз њу и кретаће се кроз засићену зону док нестигне до непропустљивог слоја. Овде се неводена фаза најпре скупља, делимично раствара, а затим почиње да се креће према нагибу непропустљивог слоја, што не мора да буде и у смеру кретања подземне воде, док се „ток растворене фазе“ креће заједно са подземном водом. Непропустљиви слој на који наиђе

неводена течна фаза може да буде непропустљив за воду, али за неводену течну фазу, која тада може да прође кроз слој до следећег непропустљивог слоја који ће је задржати.

Транспорт загађујућих супстанци у гасовитој фази. Транспорт гасова и загађујућих супстанци кроз незасићену зону може да буде од великог значаја за неке конкретне локалитете. Неке органске супстанце растворене у води, могу се у складу са Хенријевим законом да испаре из течне и да пређу у гасовиту фазу која се креће кроз незасићену зону и да дифундују у атмосферу. На кретање ових гасова утичу процеси дифузије и адвекције, при чему је значај дифузије много већи. Овоме доприноси велики дифузиони коефицијент гасова ($10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) у односу на дифузиони коефицијент раствора загађујућих супстанци ($10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$).

Нека испарљива органска једињења могу да повећају густину гасовите фазе, тако да се овакве гасне смеше крећу ка засићеној зони и задржавају се изнад капиларног слоја. Поред физичких процеса, гасови који се транспортују подлежу и хемијским процесима, посебно адсорпцији и биодеградацији, којима може да се смањи садржај гасова испод границе детекције.

Кад се течна неводена фаза креће кроз геолошку формацију она у њој може да замени воду и ваздух. Вода у оваквом систему представља квасећу фазу те се повлачи превлачећи површине зрна и пора. Неводена фаза, као хидрофобна, тежи да се креће кроз централни део пора, ни једна од ових фаза, ни вода, ни неводена фаза, не попуњавају потпуно поре. Због тога је пропустљивост слоја различита у односу на исти слој чије су поре попуњене комплетно једном од ових фаза.

Релативна пропустљивост за неводену течну фазу понаша се на сличан начин. При 100% засићењу неводеном течном фазом релативна пропустљивост је 1, а са опадањем процента засићења опада и релативна пропустљивост. Када се количина течне неводене фазе сведе на непокретан остатак, заостало засићење (C_m), релативна пропустљивост за ову фазу је 0. Са аспекта ремедијације, ова заостала, непокретна, неводена течна фаза се веома тешко уклања из пора изузев растварањем у води приликом њеног протицања, са којом растворене супстанце доспевају до подземне воде. Зато течна неводена фаза, кад уђе у подповршински слој земљишта, може у њему да се задржи деценијама, да дуго представља извор загађивања и може да загади велике количине подземне воде.

3.7.3. Судбина и понашање органских загађујућих супстанци у земљишту

Проценат и састав органске материје земљишта утичу на судбину и понашање органских загађујућих супстанци. Органска материја присутна у земљишту јавља се у 2 различите фазе. Фаза 1, описана као аморфни регион „меког“ угљеника (гумена фаза), је састављена од флексибилних структура са хуминским и фулвинским киселинама, као кључним компонентама са којима загађујуће супстанце ступају у реверзибилну сорпцију. Фаза 2 представља кондезовани регион „тврдог“ угљеника (стаклени), крута структура хумина, керогена и пирогених угљеника (продукованих као резултат интензивне топлоте). Сорпција угљоводоника у региону стакластог угљеника је неповратна. Загађујуће супстанце у земљишту могу бити у чврстом, течном и гасовитом стању. Оне могу бити везане за чврсту фазу земљишта, растворене у земљишном раствору или бити део гасовите фазе у порама земљишта.

Биодоступност и биоприступачност загађујућих материја у земљишту. Термин „биодоступност“ односи се на фракцију хемикалија која доступна да прође кроз мембрану организма из земљишног раствора, а која се може усвојити или трансформисати у живим организмима. Такође, биодоступност се може дефинисати и као степен до кога једињења могу слободно да се крећу у односно на организму. Ова дефиниција односи се на специфични организм због тога што је познато да се биодоступност разликује између организама истих врста. Одређује се као однос трансфера масе и интринстичке активности биоте у земљишту.

Термин “биоприступачност” односи се на фракцију хемикалија која је слободно доступна да пређе мембрану организма из средине у којој се налази, уколико организм има приступ тој хемикалији, међутим, ова хемикалија се може или физички уклонити из организма или може бити биодоступна након одређеног временског периода.

Два важна фактора одређују количину загађујуће материје која је биодоступна:

1. брзина трансфера посматраног једињења до живе ћелије (трансфер масе) и

2. брзина усвајања и метаболизам (интристичка активност ћелија).

Одређивање биодоступности контаминанта у земљишту од есенцијалне је важности за разумевање ризика и за одређивање потребних мера за успешну ремедијацију земљишта. Особине загађујућих материја које утичу на њихово понашање у земљишту су:

- Поларност
- Растворљивост у води
- Хидрофобност
- Липофилност
- Напон паре
- Молекулска структура.

Судбина и понашање загађујућих супстанци у земљишту зависе од физичко хемијских карактеристика земљишта и физичко хемијских карактеристика загађујућих супстанци и средине као што је рН и температура.

Количина загађујућих супстанци која се расподељује између земљишне органске материје и земљишног раствора може се описати коефицијентом K_{oc} (коефицијент расподеле земљиште/вода нормализован на садржај органског угљеника), али се такође може описати и коефицијентом K_{ow} (коефицијент расподеле октанол-вода). K_{ow} се дефинише као расподела концентрације органске супстанце између две фазе које се не мешају (органске и водене фазе) у стању равнотеже при одређеној температури. K_{ow} је мера хидрофобности органског једињења и користи се за предвиђање понашања органских супстанци у животној средини. K_{ow} обично корелира са растворљивошћу у води - што је мања растворљивост органског једињења у води већа је њена K_{ow} вредност. У недостатку експерименталних података K_{ow} вредности за велики број једињења, ова вредност може бити процењена применом различитих емпиријских регресија. Хидрофобна једињења имају тенденцију да реагују са неполарним течностима (нпр., уљима) и чврстом фазом (као што је органска материја) и имају $K_{ow} > 10000$. Хидрофилна једињења имају тенденцију да се растварају у води (формирањем водоничних и јонских веза) и вредност $K_{ow} < 10$.

Алифатични угљоводоници који садрже 14-20 атома угљеника представљају неполарне компоненте и имају малу растворљивост у води, са тачкама топљења и кључања које расту како расте број атома

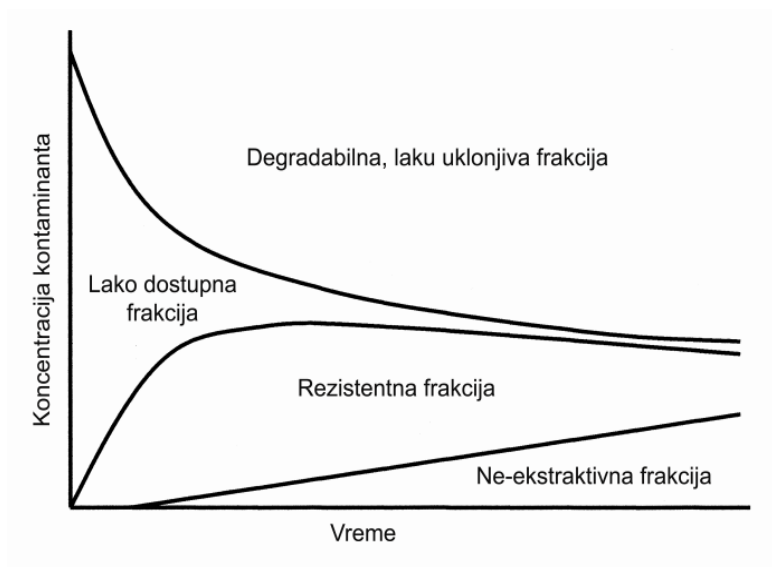
угљеника у структури. Ове физичко-хемијске особине указују да такве алифатичне структуре углавном не подлежу волатилизацији или излуживању из земљишта. Ове компоненте се снажно вежу за органску материју чврсте фазе и дифундују кроз тродимензионалну структуру земљишта.

Одређена органска једињења могу ступати у хидрофилне и хидрофобне интеракције (јонизована органска једињења). Њихова биодоступност примарно зависи од рН вредности. Тако на пример код хербицида 2,4-D (дихлорофеноксиацетатна киселина) са смањењем рН вредности, K_{ow} вредност за ово једињење расте, тако постаје мање растворно и мање биодоступно.

Ефекат времена (старење). Како се повећава време контакта између контаминантата и земљишта, опада хемијска и биолошка доступност, овај процес се често назива „старење”. Током времена лако доступна фракција (лако екстрактабилна или биодступна фракција) се смањује на бифазан начин, тј., нешто се деградира или губи из земљишта, а нешто се трансформише у резистентну фракцију (слика 3.9). Садржај резистентне фракције расте, она се може ослободити само специфичним и понекад агресивним екстракцијама, то је праћено спорим порастом неекстрактивне фракције. На интеракцију између земљишта и органских супстанци утиче органска материја из земљишта (њена количина и њена структура); неоргански конституенти, а нарочито дистрибуција пора и структура; микробиолошка активност и концентрација контаминанта. Главни механизми старења су сорпција и дифузија (колективно назване секвестрација), које представљају интеракцију између контаминантата и чврсте фракције у земљишту, углавном минералне и органске фракције. Ово заједно са физичко хемијским особинама контаминанта, у великој мери одређује брзину и степен старења у земљишту. Органски контаминанти генерално пролазе кроз две кинетичке фазе у земљишту. Иницијално, део контаминанта може бити сорбован брзо (реда величине минута или неколико сати), док се преостала фракција сорбује знатно спорије током недеља или месеци.

Иницијална, брза сорпција је генерално последица везивања водоничним везама и Van der Waals-овим силама, механизмима који се одвијају моментално након контакта органских супстанци са

површином земљишта. Органски контаминанти се у земљишту најчешће везују ковалентним везама, што резултује стварањем скоро иреверзибилне инкорпорације у земљиште. Међутим, с обзиром да је сорпција органских супстанци вођена расподелом између растворне фазе и фазе органске материје, специфичне интеракције између сорбата и сорбента доводе до тога да је утицај хемисорпције на ове контаминанте минималан.



Слика 3.9. Утицај времена на судбину органске супстанце

Биодеградибилном фракцијом органске супстанце се обично сматра фракција која се може лако десорбовати. У току ремедијације земљишта, не деградира се целокупна фракција загађења већ само биодоступна. Што више времена прође, то се већи део органске супстанце преводи у небидоступну и резистентну фракцију. Укупна концентрација загађујућих супстанци је слаб индикатор фракције доступне за биодеградацију. Два концепта су предложена за описивање секвестрације хидрофобних органских супстанци у земљишту: (1) дифузија кроз органску материју и (2) сорпционо-успорена дифузија у поре.

Дифузија у органску материју земљишта. За земљишну органску материју се сматра да садржи гумену и стакласту фазу и обе ове фазе садрже места за растварање. За стакласту фазу се сматра да садржи круте поре где контаминанти могу интерреаговати са органском

материјом. Контаминант на тај начин дифундује у комплексну структуру, тј. долази до секвестрације у органској материји.

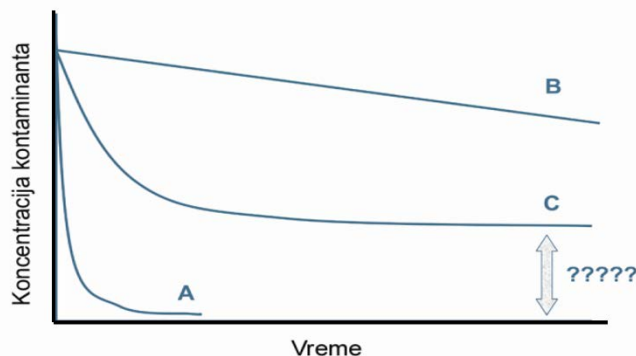
Сорпционо-успорена дифузија. Дифузија контаминанта кроз порну воду у земљишту је успорена сорпцијом на површини нано-, мезо- и микропора у земљишту које садрже мало органске материје. Брзина дифузије зависи од величине честица земљишта, порозности и стерних сметњу унутар пора. Већина земљишта садрже мноштво пора са дијаметрима 20 nm и мањим. Овакве поре су исувише мале да би омогућиле најмањим бактеријама (1 μm), вишим организмима (протозое 10 μm), или власима корења (7 μm) да продру до њих. Из тог разлога је контаминант смештен у овако финим порама заштићен је од „напада“ биоте из земљишта, тј. контаминант није биодоступан.

Секвестрација и старење органских контаминаната у земљишту редукује биодоступност органских једињења што резултује ставрањем недеградабилног резидуала у земљишту. Контаминанти који подлежу процесу секвестрације и старења нису доступни за биодеградацију у земљишту чак иако су свеже додата једињења још увек биодеграбилна. Сорпција је главни фактор који спречава комплетну биоремедијацију угљоводоника у земљишту. Спора сорпција доводи до тога да фракција хидрофобних органских једињења постаје резистентна на десорпцију и расте њена презистентност у органском матриксу земљишта. Следеће хипотезе су предложене као објашењење ефекта старења: (1) остарела фракција доводи до споре дифузије органског једињења у чврсту фракцију органске материје у земљишту и (2) контаминант споро дифундује кроз земљиште и постаје сорбован и заробљен у нано- и микропорама земљишта.

Судбина хидрофобних органских загађујућих супстанци у земљишту. Хидрофобне органске супстанце или контаминанти доспевају на земљиште углавном њиховом немарном применом, просипањем и цурењем, као и атмосферском депозицијом. Као резултат ових процеса, земљиште се може посматрати „филтер“ за ове контаминанте. Део хидрофобних органских супстанци (*енг. hydrophobic organic compounds, НОС*) се губи у земљишту (деградацијом, испаравањем), док значајан део ових контаминаната заостаје у земљишту (слика 3.10). Из овог разлога, судбина и понашање органских контаминаната у земљишту је предмет интензивног истраживања, са акцентом на биодоступност

контаминанта у земљишту. НОС обухватају широк опсег једињења органских ксенобиотика који доспевају у животну средину, при чему су ова једињења обично слабо растворна у води.

Судбина и понашање НОС у земљишту зависе од типа земљишта (садржај минералне и органске материје) и физичко-хемијских особина ових једињења (нпр., растворљивост у води, поларност, хидрофобност и молекулске структуре контаминаната). На слици 3.14 дате су теоријске криве губитка три различита типа контаминанта: А представља водорастворне компоненте, веома мобилне и лако биодеградабилне контаминанте; Б представља спори губитак јако интерактивних хемикалија; Ц представља бифазно понашање већине контаминаната у земљишту, где се губитак јавља, али нестаје са временом. Ако органске компоненте које су доспеле на земљиште нису комплетно уклоњене спирањем, волатилизацијом или деградацијом, онда се њихова интеракција са компонентама земљишта мора размотрити, као што је то приказано стрелицом испод криве Ц.



Слика 3.10. Теоријске криве губитка за три различита типа контаминанта

Судбина и понашање пестицида у земљишту. Пестициди могу доспети у земљиште на два начина директним путем (непосредно) или индиректним путем (посредно). Директним путем пестициди доспевају у земљиште као резултат контролисане примене за сузбијање штетних организама (глодара, земљишних инсеката, нематода, корова) који се налазе у земљишту или на површини. На овај начин доспева највећа количина пестицида у земљиште. На овај начин доспевају у

земљиште пестициди приликом сетве, сетвеним материјалом, минералним ђубривима, током вегетације.

Индиректним путем пестициди доспевају у земљиште таложењем пестицида из атмосфере, заливањем или наводњавањем водом која је загађена пестицидима, спирањем са третираних биљака или околних површина на нагнутим теренима, с остацима угинулих третираних животиња и биљака, површинским и подземним водама, као и приком третирања биљака.

Поред пестицида који су намењени биљкама за сузбијање штетоћина и проузроковача биљних болести, на површину земљишта доспевају и пестициди метаболисани у биљкама, делом разграђени, затим одбачени пестициди при третирању суседних површина, авиотретирањем случајно, задесно и злонамерно. Са површине земљишта, примењени пестициди механичким путем или падавинама доспевају у дубље слојеве земљишта одакле се премештају у зону кореновог система. Пестициди који су доспели у дубље слојеве земљишта вежу се за адсорптивни комплекс земљишта, а мањи део се задржава у течной или прелази у гасовиту фазу земљишта. Премештање пестицида из једне у другу фазу земљишта је реверзибилан процес. Биљке су способне да усвајају само онај део пестицида који се налази у земљишном раствору.

Судбина пестицида у земљишту зависи од:

- хемијских и физичких особина пестицида и земљишта (K_{ow} , K_{oc})
- биогености земљишта и других процеса који доводе до разградње и кретања пестицида.

Ови процеси могу трансформисати пестициде од основног једињења преко серије процеса деградације у једињење мање или веће токсичности и тиме одредити њихово понашање у земљишту.

На хидрофобној фракцији земљишта могу се адсорбовати хидрофобне органске супстанце. Процес адсорпције је сложен с обзиром на разноврсност компонената земљишта (микроорганизми, мезофауна) које имају афинитет везивања и усвајања хидрофобних органских супстанци.

Земљиште може да функционише као филтер када адсорбује заостале резиде, које потом постају недоступне за биосферу. С друге стране

једињења која имају низак афинитет адсорпције постају биодоступна. Земљиште може да функционише као филтер или као извор загађења што зависи од врсте земљишта и физичко-хемијских особина загађујуће супстанце.

Десна страна слике показује захтеве које треба да испуњава пестицид – да се брзо разлаже, поред специфичне активности. Све док се пестицид не деградира, треба да буде у стању да делује на циљне организме (вирусе, бактерије, алге, гљиве, корове и др.). Целокупна примењена доза пестицида је биодоступна одмах након примене. У току неколико дана долази до реверзибилне адсорпције на чврстој фази земљишта, чији се максимум у овом случају достиже након 14 дана; тада је још биодоступно само око 10% у земљишном раствору. Биоминерализација се одвија у фази раствора, што може довести до десорпције и до метаболисања адсорбованог пестицида. Временом заостаје максимална концентрација везаног пестицида.

Понашање и активност јона у земљишту. Процењује се да је од 1970. год., посипање соли у зимском периоду у циљу смањења клизавости износило око 1,3 милиона тона на годишњем нивоу. 50% од примењене количине буде спрано што у случају примене 20 kg соли по метру аутопута у току само једне зимске сезоне резултира у додатном уношењу соли стране пута у просеку од око 1 kg NaCl/m². Хлоридни јон који је посебно штетан за биљке, бива даље спира падавинама. Међутим, Na⁺ јон се везује за компоненте глине и хумуса у земљишту и доводи до јонске измене, при чему се истискују елементи који су важни за исхрану биљака и за структуру земљишта. Ово делује негетивно на физичке особине земљишта као што су порозност и стабилност агрегата. Као последица истискивања Ca²⁺, колоиди глине бивају диспеговани и zasiћени Na⁺ јоном и агрегати земљишта се распршују. Присутна со такође повећава рН вредност, све до 11, због јонске измене и процеса излуживања. Резултат овога је промена облика компоненти присутних у земљишту и у активности организама земљишта. Осим утицаја на земљиште, други ефекти прекомерне употребе соли су: промене у осмотском односу како у земљишном раствору тако и у ћелијама корена, поремећаји у формирању микориза (симбиозе виших биљака и гљива), као и у садржају ваздуха у земљишту, што отежава респирацију, утиче на садржај хранљивих материја. Ово је последица истискивања јонима натријума и смањене расположивости других микронутријената.

Примена посипања соли данас је значајно смањена, тако да се Cl^- јон не спира више са површина дуж путева и не накупља у дубљим слојевима земљишта.

3.7.5 Утицај киселих киша на процесе у земљишту

Високи димњаци доводе до транспорта загађења на велика растојања и према томе до њиховог таложења далеко од места њихове емисије. Мокра депозиција оксида сумпора и азота назива се кисела киша. У исто време, мора се узети у обзир и сува депозиција: приближно једна половина укупно емитованог SO_2 се таложи сувом депозицијом. Поред тога, десорпција SO_2 је 5-6 пута већа на шумским подручјима у поређењу са другим површинама, с обзиром да је то део преципитације који се прво задржава вегетацијом.

Киселе кише настају као резултат загађења ваздуха и рН вредности кишнице је око 4,1, док у екстремним случајевима рН може бити око 2,3. Нормална вредност рН кише је око 5,6 услед присуства CO_2 у атмосфери. Главни узрочници настанка киселих киша су саобраћај и термоелектране које користе фосилна горива (нафту, угаљ) за сагоревање. H_2SO_3 која настаје реакцијом између воде и SO_2 , оксидује се и гради H_2SO_4 . H_2SO_4 и HNO_3 (настала реакцијама између оксида азота и воде) мокром депозицијом стижу до површине земљишта и ступају у реакцију са пуферским системом земљишта. Ако су пуферски системи прекомерно оптерећени јавља се прекомерна киселост. Киселе кише, могу садржати и тешке метале у раствореном стању, су повезане са уношењем киселина и акумулирањем тешких метала. Закишељавање земљишта делује на организме у земљишту и инхибирају природне процесе микорбиолошког распадања. У погледу нивоа нутријената у земљишту, присуство киселина доводи до испирања минерала као што су Са и Mg (минерали глине) и на крају до недостатка нутријената. Разлагање минерала глине се такође одвија као резултат прекомерног закишељавања земљишта, при чему се ослобађају Al^{3+} јони који имају токсично дејство. Ово доводи до оштећења кореновог система и затим до поремећаја у физиологији биљака. Чак и када рН земљишта порасте ($>4,3$) додавањем креча, Al^{3+} јони се не могу поново заузети на своја места у силикатима; уместо тога они се везују за површину минерала глине. Ако се рН опет смањи, они поново прелазе у раствор као слободни (хидратисани) јони.

Поред киселих киша морају се узети у обзир и процеси природног закишељавања земљишта које потиче од распадања биомасе преко хумификације до респирације уз ослобађање CO_2 .

Јони водоника утичу на распадање (старење) материјала камена. Хранљиви катјони се усвајају кореновим системом када су у вишку, док се јони водоника ослобађају. У земљишту се успоставља динамичка равнотежа између генерисаних и искоришћених водоникових јона, која се лако помера депозицијом киселог атмосферског талога.

Четинари губе велики проценат својих иглица од доле према, док се код листопадног дрвећа рано мења боја лишћа и у неким случајевима долази до раног опадања лишћа, чак у јулу. Учестала појава некротичке болести (смеђе мрље) су такође детектоване. Вертикални раст стагнира, нарочито код четинара; смола се излучује из грана и стабла у деловима покривеним иглицама. Дрво оморике губи своје иглице при чему гране висе, врхови јела умиру уз појаву бочних изданака (што се назива “родино гнездо”).

Крајњи резултат овога је разарање целокупне еколошке равнотеже: биолошка заједница земљишта се разара, нутријенти бивају излужени, а тешки метали из структуре земљишта ће бити у раствореном стању и усвојени од стране биљака, при чему делују негативно на ензиме и улазе у ланац исхране. Ако постоји истовремено смањење концентрације калцијума и магнезијума, јони алуминијума ослобођени из минерала глине оштећују fine системе корена биљака.

3.7.6 Загађење земљишта радуионуклидима

Радиоактивни елементи (радионуклиди) се налазе свуда око нас у ваздуху, води и земљишту. Чине саставне делове стена, мора и океана, као и грађевинских материјала. У нормалним условима преко 70% укупне годишње дозе радиоактивности коју прима становништво потиче од природних звора јонизујућег зрачења. Због тога је неопходно вршити њихов мониторинг и регистровати потенцијално повишене вредности њихове активности, која би могла да угрози човеково здравље. У природи стално постоји радиоактивно зрачење. Оно је у већини случајева веома слабо. Организми су се прилагодити природном зрачењу и захваљујући томе оно не изазива штетне последице на њихово здравље. На разне начине вештачки изазвано радиоактивно зрачење постепено при већим дозама утиче веома разорно на сва жива бића. Технолошке, произведене изворе јонизујућег зрачења створио је човек.

Међу њима најзначајније место заузимају вештачки створени радиоактивни изотопи. До контаминације биосфере радионуклидима, а самим тим и земљишта, може доћи услед: испитивања нуклеарног оружја, као последица хаварије у реакторима, примене радиоактивних изотопа у привреди, у медицини, научно-истраживачком раду, при транспорту и складиштењу радиоактивног отпада и др. Данас највећу потенцијалну опасност представљају хаварије на нуклеарним енергетским реакторима. Таложење радионуклида из стратосфере представља извор глобалне контаминације земљишта дугоживећим фисионим производима. Најважнији радионуклиди из овог извора су ^{137}Cs и ^{90}Sr . Распоред радионуклида у биосфери увелико зависи од метеоролошких прилика. Тако, садржина радионуклида у земљишту, осим од географског положаја, зависи и од количина падавине. У одређеним условима и конфигурацијама земљишта и правац ветрова могу такође да утичу на ниво контаминације земљишта. Утврђена је зависност између количине падавина и контаминације земљишта. Међутим, не траба очекивати директну пропорционалност између та два фактора.

Радионуклиди ^{90}Sr и ^{137}Cs доспевају на земљу у облику растворљивом у води, а ^{238}U и ^{239}Pu у нерастворљивој форми. Радионуклиди у земљишту могу да се налазе у виду хидроксида, оксида, комплекса са органским киселинама, као хелатни комплекси, апсорбовани на колоиде глине и уграђени у органска једињења. Радионуклиди који доспевају на површину Земље у виду чврстих честица механички се задржавају на њеној површини. Они који су растворени у падавинама, процесом филтрације улазе у земљиште и највећим делом се вежу у површинском слоју. Миграција појединих радионуклида у земљиште је различита. На пример: укупне количине ^{90}Sr у слоју земљишта од 0 до 5 cm вежу од 70 до 93%; од 5 до 10 cm 12%; а од 10 до 25 cm 3%. Ови подаци показују да се стронцијум веже у горњим слојевима земљишта. ^{137}Cs везује се за површински слој земљишта слично стронцијуму.

Радионуклиди у земљишту могу да се налазе у замењивом и незамењивом облику. Њихов однос донекле зависи од минералског састава земљишта. Они се нарочито чврсто вежу за минерале из групе монтморилонита који има висок капацитет сорпције (од 80 до 120 meq на 100 g). Његова решеткаста структура обезбеђује велику унутрашњу активну површину (од 700 до 800 m² g⁻¹), те и висок капацитет сорпције. На земљиштима која имају већу заступљеност монтморилонитске глине концентрација радионуклида у земљишном раствору је мала, што смањује могућност усвајања од стране биљака.

У новије време пронађене су биљне врсте које се одликују изразито великом способношћу да усвајају и накопљају јоне појединих елемената тзв. суперакумулатори. Њиховим гајењем могуће је смањити присуство појединих радионуклида у земљишту. На овом концепту се интензивно ради и у циљу деконтаминације земљишта од тешких метала. Ова поступак се назива фиторемедијација.

Применом одговарајућих агротехничких мера, употребом минералних и органских ђубрива, калцификацијом киселих земљишта и др, могуће је такође ублажити контаминацију биљака радионуклидима и тиме смањити њихово присуство у ланцу исхране.

У околини Чернобила за деконтаминацију земљишта од ^{137}Cs коришћен је поступак ризофилтрације у комбинацији са фитоекстракцијом. Највећи акумулациони и транслокациони коефицијенти добијени су применом сунцокрета. Деконтаминација земљишта од радионуклида је веома сложен проблем који још није решен. Само веома компликованим и скупим мелиоративним и агротехничким мерама је могуће, у зависности од низа чинилаца, у мањој или већој мери смањити загађеност земљишта радионуклидима.

4. Мониторинг квалитета земљишта

Земљиште је фундаментални ресурс за живот и животну околину. Из тог разлога се његове функције и квалитет морају контролисати мониторингом, чувати и очувати у одрживом стању. При томе, мониторинг земљишта подразумева систематску контролу и праћење карактеристика земљишта и евидентирање привремених или трајних промена у њему. Тај процес је битан за рано откривање промена квалитета земљишта, у функцији процеса који су повезани са његовом заштитом, одрживим коришћењем и свеопштом контролом животне околине. Стога, главни задатак савременог мониторинга земљишта је његова улога као инструмента за управљање земљиштем у одрживом развоју. Тај задатак је заједнички за све државе света. Међутим, упркос томе, још увек постоје велике разлике у методологијама мониторинга, које произилазе из националних приоритета, с тим што је у многим државама мониторинг земљишта признат као значајан инструмент дугорочног развоја људског друштва. Зато треба створити свеобухватни систем мониторинга, који обезбеђује одговарајућу интерпретацију резултата и доприноси развоју методологије за ограничавање деградације земљишног простора, као и примену стандарда одрживе пољопривреде у развоју стратегије заштите и конзервације земљишта. Поред тога, мониторингом се може побољшати провера нових аналитичких метода, пратити промена у земљишним карактеристикама и обезбедити подаци за карту мониторинга.

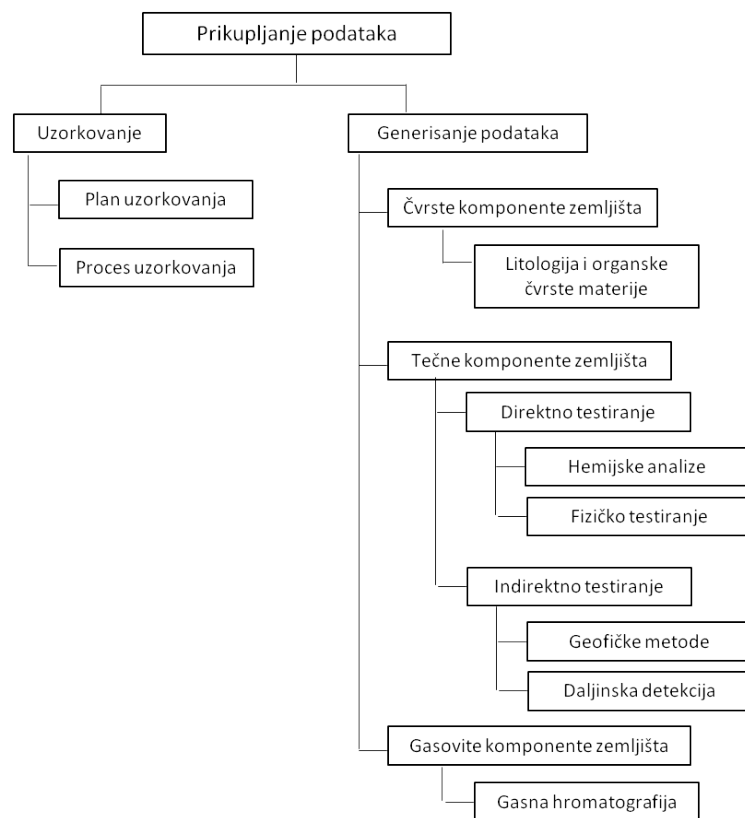
Пре него што се осмисли било који програм узорковања, као и мониторинга земљишта, важно је да се исправно успоставе циљеви узорковања, односно мониторинга.

Прикупљени узорци треба да буду што репрезентативнији и све мере предострожности треба предузети како би се обезбедило да, колико је то могуће, узорци не трпе никакве промене у интервалу између узорковања и анализе.

4.1. Прикупљање података

Након прелиминарне припреме и карактеризације подручја, требало би започети основни корак у плану мониторинга, који се састоји од

прикупљања и генерисања података. Ова фаза укључује припрему плана узорковања и одређивање хемијске и физичке карактеризације локалитета. *Слика 4.1* приказује релације које повезују све процесе потребне за прикупљање и генерисање података. За овај циљ су неопходна два главна корака – припрема плана узорковања и планирање свих хемијских и физичких истраживања која ће чинити оквир за прикупљање података.



Слика 4.1. Основни кораци у мониторингу земљишта

4.2. Узорковање - планирање и реализација

У свим врстама мониторинга, узорковање чини основни корак у свим процесима потребним за разграничење и карактеризацију параметара квалитета животне средине подручја које се истражује. Помаже у лоцирању места контаминације и пружа информације о временским и просторним обрасцима у вези са дистрибуцијом загађујућих материја. Узорци се прикупљају и испитују првенствено да би се утврдила њихова физичка, хемијска, биолошка и радиолошка својства. Ово поглавље

описује најважније факторе које треба узети у обзир при осмишљавању узорковања и мониторинга земљишта. Узорковање земљишта представља изазов у смислу да земљиште садржи воду и друге течности, гасове, биолошки материјал, радионуклиде или друге чврсте материје који природно не припадају земљишту (нпр. отпадни материјали). Поред тога, одређивање неких физичких параметара тла може захтевати такозване непоремећене узорке земљишта за правилно извођење релевантних мерења. Узорковање подразумева селектовање из укупне популације подскупа индивида (узорак) на којима ће се мерење вршити; мерење извршено на подскупу популације (узорку) ће се користити за процену особина целе популације. Узорковање је нераздвојиви део било ког посла истраживања из области наука о земљишту, због тога што је мерење укупне популације немогуће за било које реално испитивање.

Најчешће се узорковање земљишта ради у сврху одређивања квалитета земљишта, за сврху карактеризације и припрему земљишних мапа, у циљу подршке законским и регулаторним активностима (нпр. природне вредности у сврху даље процене антропогеног утицаја) или као део процене ризика у циљу одређивања присуства загађујућих материја и поређења са постојећом законском регулативом и/или у циљу одабира технике ремедијације земљишта. Специфични циљеви узорковања зависе од природе, концентрације и дистрибуције природних супстанци; природе, концентрације и дистрибуције контаминаната; физичких особина и варијација и присуства и дистрибуције биолошких врста од интереса. Испитивања земљишта се састоје из теренског и лабораторијског испитивања о чему ће бити речи у даљем тексту. Главни циљ испитивања загађених локалитета је квантитативно одређивање нивоа загађења земљишта, сакупљањем узорака за хемијску анализу земљишта.

Пре самог узорковања потребно је размотрити следеће:

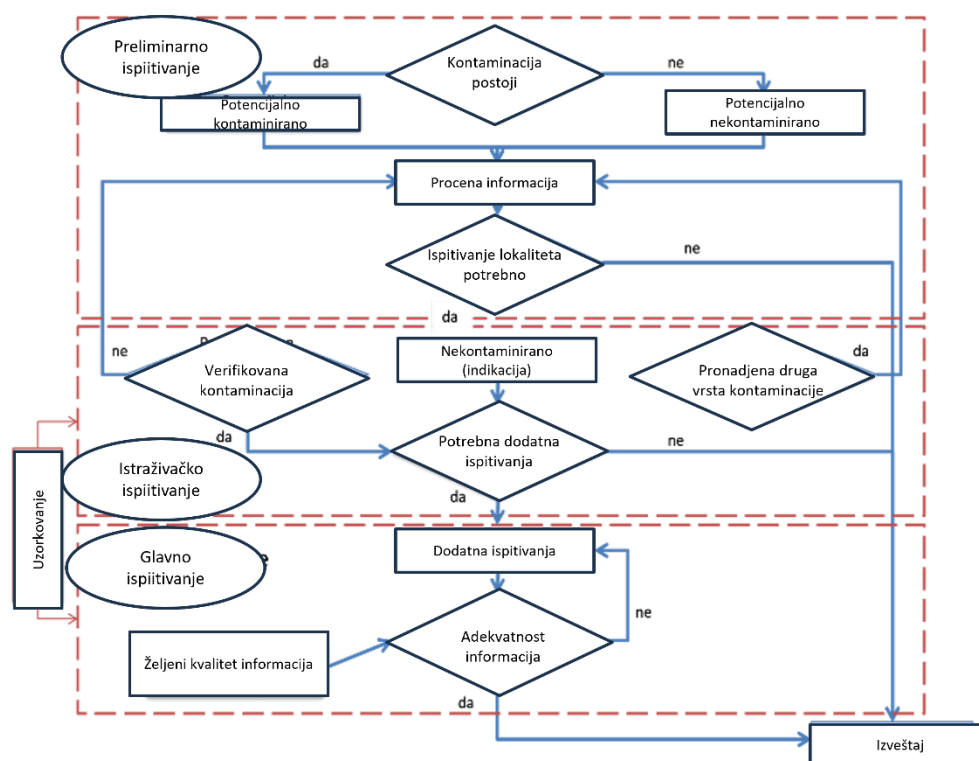
- План узорковања;
- Методологија (начини) узорковања земљишта – мрежа узорковања;
- Број потребних узорака земљишта; и
- Статистичка интерпретација резултата узорковања.

Како би се адекватно организовао дизајн мониторинга потребно је одговорити на низ питања:

1. Да ли је потребно применити исту стратегију узорковања на целом локалитету или специфичне стратегије треба да буду примењене на одређеним подручјима и зонама?
2. Да ли узорковање треба да буде изведено у фазама током одређеног временског периода или одједном?
3. Које супстанце треба одређивати и које друге параметре треба одређивати?
4. Где и колико локација узорковања треба да буде испланирано?
5. На којој дубини треба да буду узети и анализирани узорци?
6. Који тип и колико узорка треба узети и на који начин се са њима рукује?
7. Која фреквенција узорковања треба да буде спроведена?
8. Које теренске технике треба да буду примењене за узорковање и тестирање?
9. Које лабораторијске технике треба да се користе за анализу узорака?

Приликом дефинисања циљева узорковања потребно је размотрити следеће аспекте: (1) подела простора који се испитује; (2) успостављање циљева целокупног истраживања; (3) листа параметара која треба да се мери; (4) листа других параметара неопходних за тумачење резултата; (5) садржај извештаја о узорку, као и (6) одлуке које ће се доносити на основу узорковања.

На основу дефинисаног циља узорковања дизајнира се програм узорковања при чему се морају дефинисати процедуре потребне за лоцирање тачака са којих ће бити узети узорци за анализу, колико је узорака потребно и на који начин, тј. којом методом ће они бити узети, као и дефинисати методе за чување, складиштење и транспорт узорака. Фазе испитивања потенцијално контаминираних локалитета дате су на слици 4.2.



Слика 4.2. Фазе испитивања потенцијално контаминираних локалитета

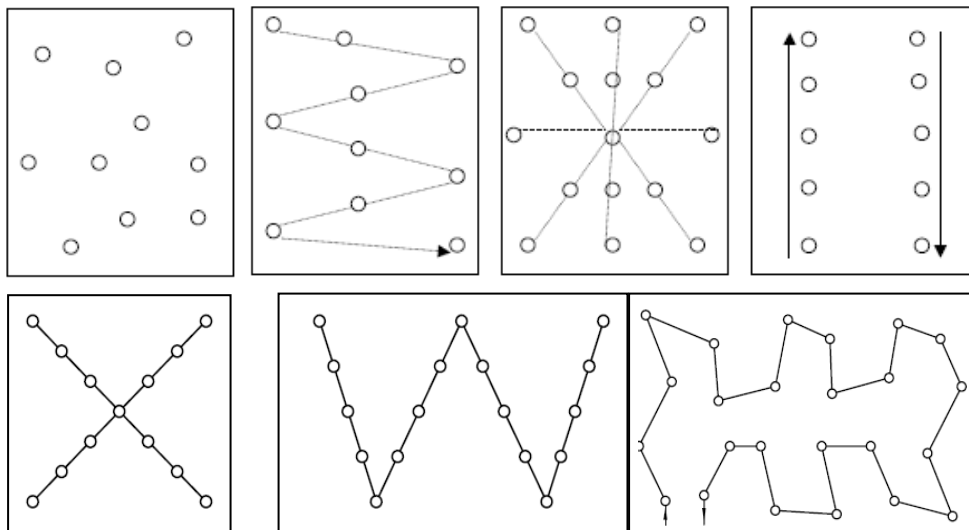
4.2.1. Методологија узорковања земљишта

Приликом израде плана узорковања, локација тачака узорковања ће у великој мери зависити од сврхе мониторинга, као и од топографије и геолошких услова подручја. План праћења детекције, или план праћења процене, на пример, подразумева густу мрежу места за узорковање које су мање-више систематски распоређене по целом подручју истраживања, док ће евалуациони мониторинг захтевати концентрацију локација за узорковање у окружењу места загађења. Такође се мора нагласити да је добро познавање геологије и хидрологије подручја веома значајно за избор локација за узорковање. Избор методе узорковања мора бити прилагођен локалним условима и подложен је модификацијама.

Просторни обрасци узорковања прате два основна модела који чине основу за све типове које помињу различити аутори (слика 4.3):

1. Циљано узорковање земљишта подразумева субјективну селекцију заснована на професионалном суду на основу знања истраживача у смислу познавања прелиминарних информација на основу историјских података, визуелних информација добијених обиласком локалитета, искуства тима за узорковање. Овај приступ омогућава брз одговор у хитним ситуацијама, преферира се у случају ограничених буџета, за фазе раног испитивања локалитета, скрининга присуства или одсуства загађујућих материја, као и у ситуацијама када на локалитету постоји познати концентрисани извор загађивања

2. Не циљано узорковање земљишта, коришћењем мреже/обрасца узорковања, који се примењује тамо где је расподела супстанци у земљишту равномерна, углавном за пољопривредне сврхе и за незагађена земљишта. Узорци се могу мешати и комбиновати - композитно узорковање.



Слика 4.3. Просторни обрасци узорковања

У насумичном узорковању, тачке се бирају не пратећи топографске, геолошке или геофизичке податке. Еколошки и геохемијски подаци познати о овој области су одлучујући за правац и густину тачака узорка. Узорци дуж ових квадрата се такође могу узимати систематски (у једнаким интервалима) или на насумичним растојањима. Међутим, праволинијски обрасци узорковања су популарнији због лакоће организације теренског рада и цртања података. Поузданост узорака, као репрезентативних за услове животне средине у истраживаном подручју, зависи пре свега од фактора као што су учесталост

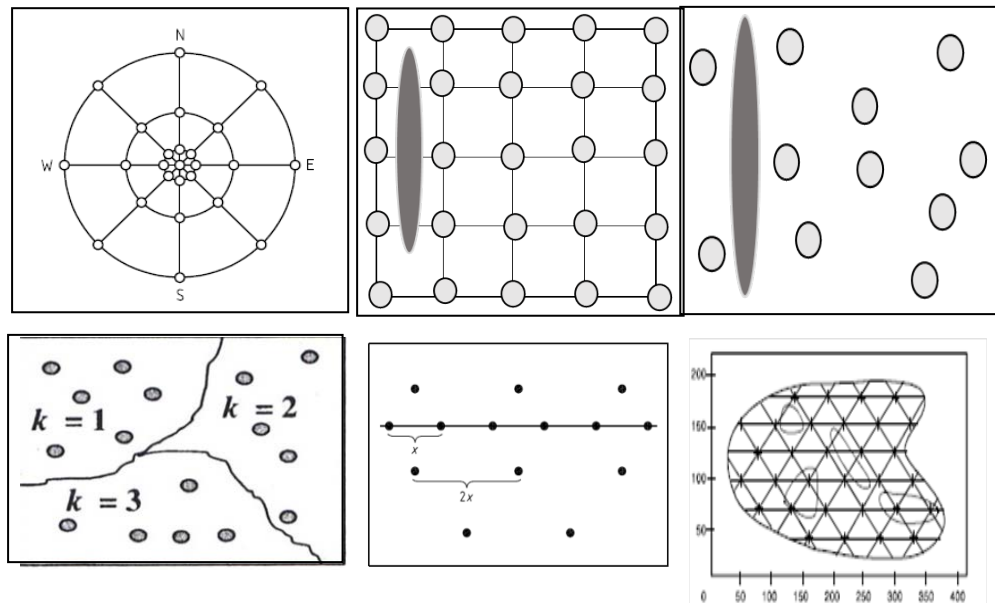
узорковања, технички поступци прикупљања узорака, објективне и техничке грешке оператера, као и складиштење, руковање и третман узорака у току њиховог сакупљања и транспорта у лабораторију. Генерално, међутим, тачке узорковања треба да буду концентрисане око жаришта, тј. око тачака где се очекује контаминација или у близини области за које се сумња да су контаминирани. Минималан број узорака зависи од комплексности загађења и знања истраживача о специфичним карактеристикама локалитета и других специфичних захтева, нпр. детектовање “хот-спот” тачака (места концентрисаног загађења) одређене величине и облика. Број потребних узорака требало би да буде одређен на основу специфичних захтева локалитета. Додатно, у пракси се користе још неке методе узорковања, које су дате у наставку текста:

Кружна мрежа узорковања (слика 4.4.(а)) је корисна за визуелно представљање области локализоване контаминације (нпр. код танкова за складиштење), као и за индиковање утицаја локалног извора загађења на околину. Генерално даје информације о концентрацији супстанци у центру мреже (максимална вредност), о дистрибуцији контаминанта (димензије подручја са повећаном контаминацијом) и облик дистрибуције контаминације. Недостаци ове методе су следећи: однос између тачака узорковања у центру и на ободу није оптималан – ако се жели утврдити величина контаминираних зона потребно је више тачака у спољој кружници; имплицира униформну екстензију дистрибуције контаминанта; раздаљина између узорака није увек оптимална и није погодна за композитне узорке.

Систематско узорковање земљишта – правилна мрежа (слика 4.4(б)). Код овог типа узорковања постоји директна веза између тачака узорковања и (процењених) димензија контаминације. Растојање тачака не би требало да буде веће од највећих (процењених) размера контаминације и у свакој зони се узима само један узорак. Величина мреже у којој ће се узорковање вршити зависи од просечног нивоа концентрације, локализација изолованих извора контаминације и размера контаминираних зона (водоравно и усправно).

Случајно (насумично) узорковање (слика 4.4(в)) се врши у случају када постоји претпоставка да се зона контаминације појављује неправилно. Тачке узорковања унутар подручја одређују се коришћењем случајних бројева из табела приручника за статистику, а свака локација унутар

посматраног локалитета има исту вероватноћу да буде селектована као место узорковања. Ограничене су могућности детектовања “хот спот” тачака, тј. локализованог подручја, где је ниво концентрације контамината унутар подручја значајно већи од околног подручја, и добијање целокупне слике дистрибуције контамината.



Слика 4.4. Различити типови узорковања

Случајно стратификовано узорковање (слика 4.4(г)). У случају овог типа узорковања локалитет је подељен на одређени број ћелија, које чине мрежу, и одређени број тачака узорковања се бира из сваке ћелије која је хомогена у односу на цео локалитет. Ћелије се одређују у односу на: дубину узорковања, ниво концентрације загађујућих материја, врсте загађујућих материја и извора контаминације.

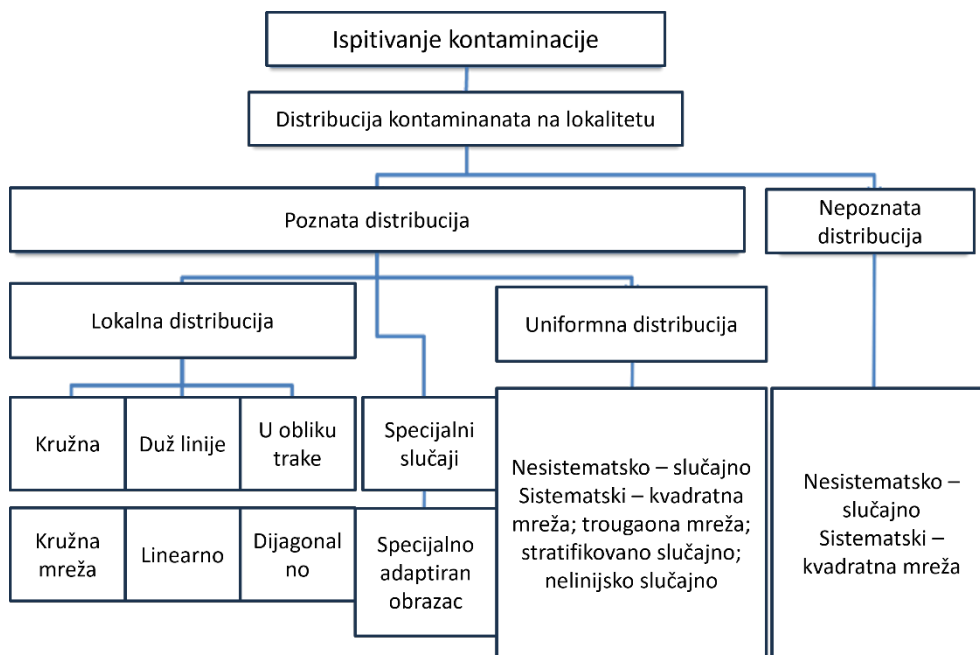
Узорковање дуж линијског извора (слика 4.4(д)). У случају контаминације дуж линије, као што је нпр. цурење из цевовода, тачке узорковања могу да се распореде по земљишту које директно изнад покрива цевовод или да, уколико ово из одређених разлога није изводљиво, буду близу цевовода.

Истраживачко узорковање (слика 4.4(ђ)). Користи се метод систематске мреже или систематског насумичног узорковања у циљу одређивања “хот спот” тачака. Густина мреже се поставља на основу

прихватљиве грешке да се промаши “хот спот”. Овакав приступ захтева претпоставку облика, дубине и величине “хот спот” локације.

Композитно узорковање се често користи за редуковање трошкова хемијских анализа земљишта. Индивидуални узорци који се прикупе у подручју од 20 метара се мешају у циљу формирања једног узорка. Концентрација композитног узорка представља просечну концентрацију суб-узорака. Главни недостатак оваквог начина узорковања је да суб-узорци са високом концентрацијом контаминаната остају недетектовани због тога што се они практично разблажују мешањем са другим суб-узорцима. Ако тај суб-узорак представља “хот-спот” тачку, она на овај начин неће бити детектована. Проблем разблаживања “хот-спот” тачака може бити решен на неколико начина. Овај тип узорака се може користити за већину неорганских анализа који нису летљиви, с обзиром да летљиве компоненте нису погодне за овај тип узорковања. Узорци земљишта од којих се прави композитни узорак морају бити узети са истог хоризонта, водећи рачуна о садржају глине у тим узорцима. Земљишта са високим садржајем глине нису погодна за композитно узорковање због немогућности потпуног мешања узорка. Приликом узимања суб-узорака треба водити рачуна да су они једнаке величине, да представљају суседне тачке узорковања, да су једнако удаљени једни од других и да су распоређени латерално.

Како и на који начин се одлучити за методу узорковања зависиће од испитиваног локалитета, његових особина и контаминираности. Шематски приказ доношења и разматрања одлуке о узорковању дат је на *слици 4.5*.



Слика 4.5. Одабир одговарајућег обрасца узорковања

4.2.2. Процедуре узорковања

4.2.2.1. Узимање узорака чврсте материје тла

Узорци земљишта се узимају или на фиксним дубинама или одвојено од сваког педогеног хоризонта. *UN/ECE ICP Forests programme (UN/ECE ICP Forests 1994)* препоручује следеће дубине: 0–5 cm, 5–10 cm, 10–20 cm и 40–80 cm. Узорци са малих дубина (до 30 или 60 cm) се сакупљају из малих јама. Дубљи узорци се обично сакупљају помоћу сврдла за земљу. Утврђено је да су једноставни пужни узоркивачи за земљиште, тзв. аугери, сврдло, задовољавајући на дубинама узорковања од 1 до 2 метра. Примењује се за све типове земљишта и омогућава узимање довољне количине узорка за већину потреба. Ова техника узорковања се сматра чистом техником где нема потребе за додавањем течности за хлађење и сл. Може служити за инсталирање бушотина за инсталацију опреме за мониторинг подземне воде и гаса.

Загађујуће материје могу бити лоциране на било којој дубини земљишног профила те се стога приликом одабира дубине узорковања морају узети у обзир следеће особине: варирање физичких и хемијских особина земљишта са дубином; извори контаминације (чврст, течан, гас

или пара), који могу бити лоцирани на било којој дубини; релевантна дубина експозиције, која може бити било која дубина земљишног профила (пројекти реконструкције, и слично); миграција гасова и течности по вертикалном профилу, која је одређена физичким особинама земљишта. Узорковање по дубини је потребно урадити у складу са ситуацијом на терену: (1) сваки хоризонт се узима посебно; (2) појава боје и мириса у слојевима, као и других материјала и њихових промена; (3) присуство подземних цеви, темеља, танкова и др; (4) појава подручја са очигледним оштећењима, нпр., остаци грађевинског материјала и слично. По правилу индивидуални узорци се узимају у одговарајућем опсегу дубине 0,1-0,5 метара, међутим, у зависности од сврхе узорковања дубина се може мењати (табела 4.1.).

Табела 4.1. Сврха узорковања у зависности од дубине узорковања

Дубина узорковања	Сврха
0-0,5 m	Усвајање од стране људи/животиња преко дермалног контакта. Потенцијал за разношење путем ветра, што може довести до инхалације. Ерозија у површинске воде. Усвајање од стране биљака са плитким кореновим системом. Површинско отицање до површинских вода.
>0,5 m	Усвајање инхалацијом/ингестијом/путем коже приликом ископавања. Усвајање од стране биљака са дубоким кореновим системом, као што је дрвеће. Усвајање од стране животиња које живе под земљом. Усвајање које потиче од зграда или инсталација (темељи, цеви за воду, телекомуникације, канализациони системи). Лоцирање подземних вода. Потврђивање дубине вештачких наслага земљишта и лоцирања могућих путева миграције течности и гасова у овом земљишту. Одређивање било каквог цурења (лужења) са површинског земљишта. Детектовање “дубоких” загађујућих метерија. За добијање информација о природним карактеристикама земљишта (<i>eng. background</i>) Детектовање природних путева миграције загађења.

Пужни узоркивачи за земљиште се обично користе за узорковање иловаче. За каменита земљишта, посебно ако се узимају дубоки узорци, препоручују се пужни узоркивачи са набијачем. Узорци тресета се сакупљају помоћу узоркивача кутијастог типа или помоћу специјалних пужева, као што је *Hillier* тресетна бушилица. Ударно бушење се користи углавном за мека земљишта. На овај начин се могу узети велике количине узорка, релативно прецизно се може измерити са које је дубине узет узорак и може служити за инсталирање бушотина за инсталацију опреме за мониторинг подземне воде и гаса. Најчешће коришћене теренске технике дате су у *табели 4.2.*

Табела 4.2. Теренске технике за узорковање земљишта

Тип узорка	Техника
Мали поремећени узорци земљишта	Сврдло (за мале дубине), испитне јаме, бушотине, сонде
Велики поремећени узорци земљишта	Испитне јаме, бушотине, ровови
Велики непоремећени узорци	Бушотине
Неводене течне фазе	Узорковањем коришћењем контејнера и делова опрема за једнократну употребу
Опрема за узорковање хемикалија у земљишти	Специфично за сваку супстанцу
<i>In situ</i> тестирање гасова и пара: Земљишни гасови Органске паре Други гасови и паре	Портабл инструменти Комбинована IR /електрохемијска ћелија Мерачи запаљивих гасова (инкорпорирају каталитичку оксидацију/ термалну проводљивост/ електрохемијске ћелије) Мерачи притиска/протока гаса Фото јонизациони детектори са одговарајућом лампом Анализа органских пара (метод пламене јонизације) Цевчице са активним угљем Цевчице за колориметријску детекцију

Посебну пажњу треба посветити узимању узорака, јер грешке које се учине приликом узимања узорака земљишта могу утицати на вредности добијених резултата. Потребно је одговорити на следећа питања: (1) Које карактеристике земљишта су од интереса? (2) Који тип узорка се захтева? (3) Која количина узорка је потребна? (4) Која прецизност резултата се захтева? (5) Каква је приступачност локалитету за узорковање? (6) Која дубина узорковања је потребна? (7) Које су основне физичке карактеристике локалитета?

За потребе испитивања се узимају два типа узорака: (1) у нарушеном стању – не чува се природна структура (слојеви) земљишта, (2) у природном - ненарушеном стању - методе које приликом узорковања могу да очувају структуру (слојеве земљишта), користи се специјална опрема (корери, цилиндри и слично).

Узимање узорака у нарушеном стању се користи за одређивање хемијских својстава земљишта. При узорковању се морају поштовати правила да се пре узимања узорака истраживана страна профила очисти од горе на доле и да се узорци у нарушеном стању узимају од доњих ка горњим хоризонтима. Такође, потребно је водити рачуна да у узорак не упада земљиште из суседних хоризоната. Количина узорка треба да буде довољна да се на узорку изврше све анализе (обично око 1 до 1,5 килограма). Узорци у нарушеном стању се стављају у платнене или најлонске кесе и сваки узорак се обележава посебном етикетом, на којој су уписани основни подаци о узорку: локалитет, број профила, ознака хоризонта, дубина са које је узет узорак, датум и потпис узимаоца узорка.

Узорци у полунарушеном стању се користе за анализу структурности земљишта. Узимају се при влажности блиској пољском водном капацитету. За анализу се обично узима 2 - 2,5 килограма земљишта (за неке анализе структурности земљишта узорци се користе у влажном, а за неке у ваздушно сувом стању).

Узорци земљишта у природно-ненарушеном стању се користе за одређивање неких физичких и водно-физичких својстава земљишта, као што су на пример запреминска маса, водопропустљивост, садржај загађујућих материја у вертикалном профилу земљишта. Узорковање се обавља помоћу цилиндара ваљкастог облика различите запремине, при влажности блиској пољском водном капацитету. За разлику од узимања

узорака у нарушеном стању, узорци у природно-ненарушеном стању узимају се најпре из површинских хоризоната, а затим из дубљих (из сваког хоризонта најмање 6 понављања).

4.2.2. Фазе теренског испитивања земљишта

Истраживања земљишта се састоје из теренског и лабораторијског испитивања. Пре самог почетка рада на неком локалитету, потребно је приступити првој фази теренског испитивања, а то је **припремна фаза** која подразумева проучавање педогенетских фактора и документације која се односи на дато подручје испитивања. Проучавају се педолошке, геолошке, топографске и хидролошке карте, затим карте биљног покривача, климатске карактеристике подручја и ранија педолошка истраживања. За теренско испитивање земљишта потребна је следећа опрема: GPS апарат, топографске карте, фотоапарат, сонде, алат за отварање профила, прибор за испитивање профила, метарска трака, врећице за узорке земљишта, прибор за узимање узорака земљишта у природно ненарушеном стању, прибор за узимање земљишта за микробиолошке анализе, прибор за узимање монолита и филм-лак отисака земљишта, свеска, оловка у боји за означавање одређених целина, теренско возило.

Рекогносцирање терена је друга фаза у испитивању земљишта. Обухвата препознавање карактеристика проучаваног подручја при изласку на терен и њихово упоређивање са уоченим у припремној фази. Рекогносцирањем терена уочавају се разлике у морфолошким својствима земљишта предмета подручја на основу којих се на топографској карти, одговарајуће размере, могу приближно означити границе простирања једног или више типова земљишта који су заступљени на испитиваном подручју.

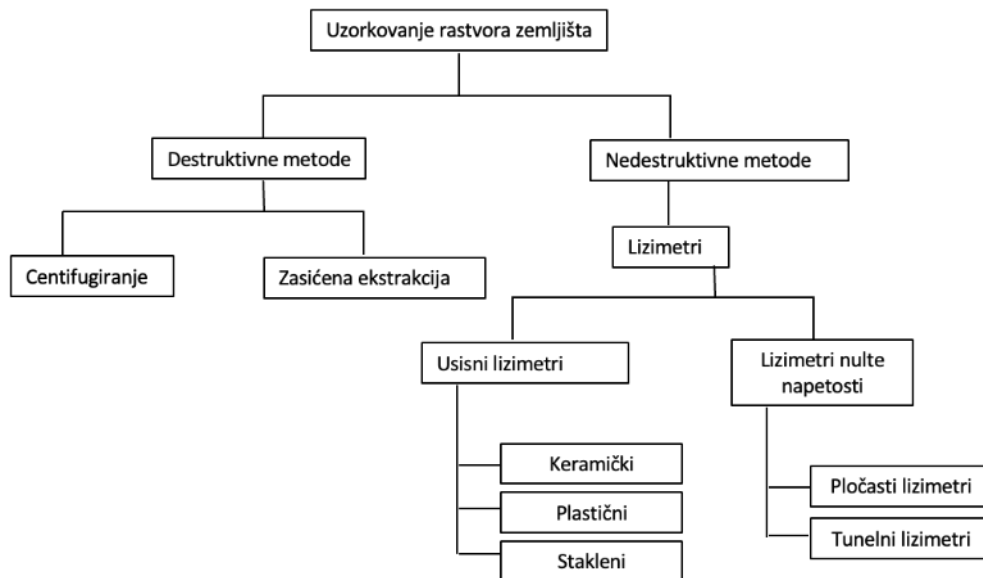
Сондирање. Будући да су педолошке карте ограничене прецизности, за детаљније утврђивање границе простирања појединих систематских јединица земљишта на терену се користе и сондажне бушотине. Сондирањем се тачно утврђује број, редослед и моћност хоризоната тј. ендоморфолошка својства земљишта. Извађено земљиште се слаже у хоризонталном низу редоследом којим се вади из сондажне бушотине, тако да се из низа прикупљених узорака сондом јасно види број, моћност и прелаз између хоризоната. Сондирање може често да замени отварање профила.

Испитне јаме се праве или ручно или уз помоћ механичке опреме. Овај корак у истраживањима омогућава узимање веће количине узорка, а дубина, дужина и ширина јаме зависи од примењене опреме. Није погодно за нестабилна земљишта (са великим садржајем песка и шљунка) због урушавања. Нарушава се пејзаж, који је најчешће немогуће вратити у претходно стање.

Отварање педолошког профила. Педолошки профил се отвара у циљу детаљног увида у унутрашњу морфологију земљишта и ради узимања узорака за анализу његових физичких, хемијских и биолошких својстава. Копа се до дубине дејства педогенетских фактора, односно до појаве подземне воде или чврсте матичне стене и то на репрезентативном месту, приликом чега је потребно избегавати близину путева, пруга, канала и других места на које је човек вршио утицај. Након отварања профила приступа се његовом опису тј. уносу података о локалитету и опису унутрашње морфологије. У оквиру унутрашње морфологије се описују видљива и на терену мерљива својства земљишта: склоп профила (број, редослед, моћност и прелаз између хоризоната), влажност, боја (употребом атласа боја), механички састав, садржај скелета минералних фрагмената (скелет), структура, конзистенција, присуство кореновог система, порозност, присуство јако збијеног слоја или хоризонта, присуство карбоната и водорастворљивих соли, реакција земљишта (pH), итд. Такође важно је евидентирати специфичне педолошке творевине. Оне могу бити хемијског (кречни талози, конкреције калцијум карбоната, талози лако растворљивих соли) и биолошког порекла (остаци биљног и животињског порекла и друго).

4.2.3. Узорковање раствора земљишта

Узорковање раствора, ради праћења стања земљишта, као и других фактора који доводе до контаминације у земљишној средини, може се вршити различитим техникама, од којих су неке деструктивне, а друге недеструктивне. Избор метода ће примарно зависити од стратегије и циља прикупљања. Методе сакупљања воде из тла се могу табеларно приказати као што је приказано на слици 4.6.



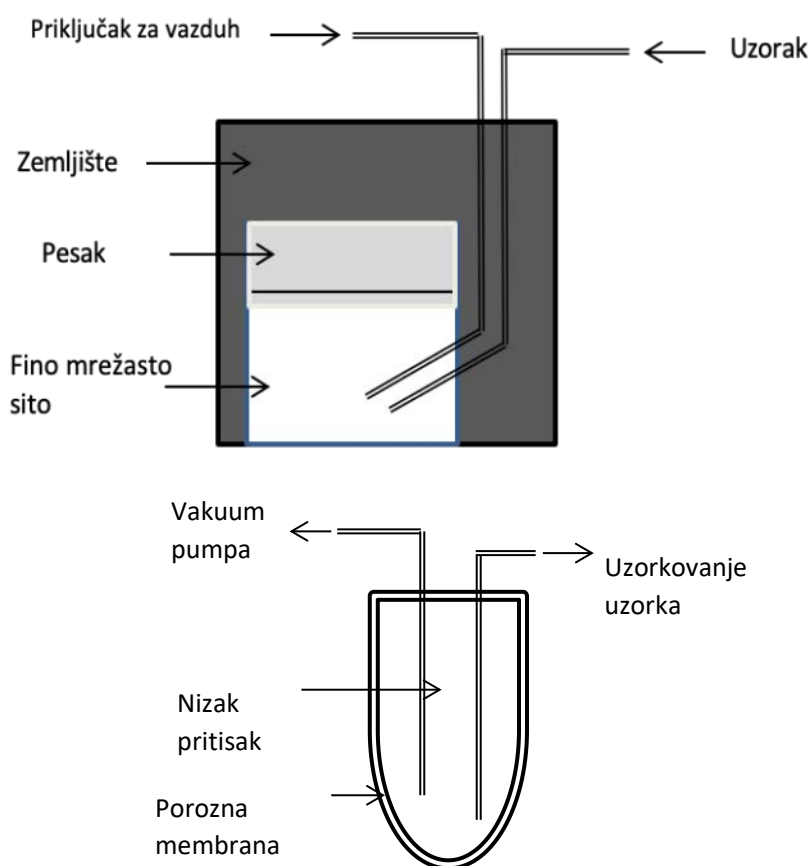
Слика 4.6 Недеструктивне методе узорковања раствора земљишта

Недеструктивне методе (углавном лизиметријске методе) зависе од два физичка феномена струјања воде у тлу, било да флуиди теку под нормалним притиском у земљишту, без употребе других средстава (нулта напетост) или се вакуум пумпе користе за прикупљање узорака у посудама које се налазе на или близу површине земље. Посуде за сакупљање, опште познате као лизиметри, састоје се од два главна типа:

1. Лизиметри нулте напетости (енг. *Zero-tension lysimeters (ЗТЛ)*) или гравитациони лизиметри (слика 4.7) се обично користе за узорковање воде у земљишту док се креће кроз засићено земљиште. Лизиметар овог типа састоји се од цилиндра постављеног испод непоремећеног слоја земљишта, које је првобитно уклоњено клипним узоркивачем. Две флексибилне везе су причвршћене за цеви на површини тла. Једна од повезаних цеви служи као цев за пуштање ваздуха, док друга може бити причвршћена за пумпу за сакупљање узорака. ЗТЛ могу бити различитих облика и типова, а најпознатији су плочасти тип и тип левка. Утврђено је да су ЗТЛ корисни у праћењу воде у тлу током и након *in situ* санације. Ово помаже да се прати варијабилност воде и да се направи поређење својстава воде током читавог процеса ремедијације. Треба, међутим, приметити да се ЗТЛ типа плоча могу инсталирати само

близу површине тла како се не би изазвало веће нарушавање профила земљишта.

2. Усисни лизиметар (слика 4.7). Ово је уређај који се користи за узорковање воде у незасићеним земљиштима. Делујући као континуирани вакуум, увлачи воду у лизиметар кроз порозну мембрану. Узорци воде се изводе на површину усисавањем кроз цев која је уроњена дубоко у уређај. Искуство показује да је тензиона лизиметрија техника која се најчешће користи за узорковање раствора.



Слика 4.7. Типови лизиметара, принцип рада

Инсталационе дубине за лизиметре. Препоручена дубина инсталирања лизиметара је најмање на две дубине, тј. унутар зоне корења (10–20 cm) и испод зоне корења (40–80 cm), како би се омогућило прикупљање узорака који могу пружити информације о нутријентима и токсичним елементима унутар ове зоне.

Деструктивне методе узорковања раствора земљишта. У овим методама, појединачни узорци или мешани композитни узорци се преносе у лабораторију, где се вода из земљишта може екстраховати за испитивање или центрифугирањем или екстракцијом. Применом центрифугалних сила (око 10 000 обртаја у трајању од око 30 минута), узорци воде из земљишног раствора се могу сакупљати у доњем делу посуде за центрифугирање. Метода екстракције захтева додатак воде, како би се променила концентрација неких анјона, као што су хлориди и нитрати. Почетне концентрације се могу поново израчунати ако су познати садржај воде у узорку земљишта и количина додате воде. Ова метода није веома популарна, али се користи за нека земљишта где друге методе нису успешне, као што су каменита и глиненa тла.

4.2.4. Узорковање ваздуха из тла

Иако истраживање гасова у земљишту може бити од помоћи у праћењу различитих параметара животне средине, најчешће се користи за испитивање полутаната као што су бензол и толуен. Такође је користан за откривање контаминације хлорованим растварачима и другим органским загађујућим материјама. Узорковање земљишног гаса се може обавити једноставним методама, као што је извлачење ваздуха из рупа избушених сврдлом помоћу ручне усисне пумпе, или релативно напредним методама, где се ваздух из земље усисава кроз сонду, забијену у тло до дубине од око 1 m, пумпама постављеним на возило опремљено одговарајућим аналитичким уређајима. Ако се користе ручне пумпе, прикупљене узорке треба чувати у херметички затвореним контејнерима од нерђајућег челика или стакла пре него што се пошаљу у лабораторију. Други метод узорковања земљишног гаса је такозвано пасивно узорковање. Ова техника, која се углавном користи за откривање испарљивих органских материја, користи активни угаљ постављен у земљиште као *in situ* адсорбент за VOC. После неколико дана или недеља, угаљ се извлачи и анализира гасном хроматографијом или било којом другом погодном аналитичком методом.

Методе испитивања сакупљених узорака, било чврстих, течних или гасних, зависиће од сврхе праћења као и од жељеног степена прецизности. Методе скрининга или теренске методе ће понекад бити довољне за прву процену степена контаминације. У другим случајевима, међутим, неопходна су детаљна лабораторијска испитивања да би се одредили следећи кораци потребни за пројекат.

Лабораторијска истраживања. Припрема узорка земљишта за анализу обухвата низ операција:

1. Сушење узорака
2. Издвајање средње пробе
3. Ситњење узорака
4. Просејавање узорака
5. Чување узорака

Сушење узорака земљишта. Узорак седимента се суши од тренутка када губитак масе није већи од 5% масеног удела за 24 часа. Сушење се може вршити на више начина:

(а) На ваздуху - Материјал се распростире у слоју не дебљем од 15 милиметара, на подлози која је инертна и не упија влагу из земљишта, приликом чега је важно да узорак не буде изложен директној сунчевој светлости.

(б) У електричној сушилици - Материјал се шири у слоју који није дебљи од 15 милиметара на подлози која је инертна и не апсорбује влагу из тла. Узорак се поставља у сушилицу и суши се на температури не већој од 40 °C.

Мрвљење и уклањање грубих материјала. Уколико су узорци земљишта осушени у груменима, мрвљење је неопходно. Пре мрвљења, руком се уклони камење, комади стакла и други отпадни материјали који не припадају седименту, а који су већи од отвора на сити од 2 mm. При томе се води рачуна да се количина финог материјала слепљеног за издвојено камење сведе на најмању меру. После уклањања страних материја врши се просејавање материјала мањег од 2 mm уз записивање масе материјала који је већи и мањи од 2 mm, затим мрвљење материјала већег од 2 mm и мешање те фракције. Сврви се осушени седимент у честице које нису веће од 2 mm употребом одговарајућег прибора – авана са тучком или у специјалним млиновима.

Просејавање. Просеје се осушен и смрвљен узорак ручно или уз употребу механичке трескалице. Из фракције која заостаје на сити уклони се и измери камење и свежи биљни остаци, стакло, итд. Заостало грумење на сити посебно се смрви и врати у узорак. Прикупи се сав

материјал или део материјала који заостаје на сити и обрађује одвојено ако је потребно.

Подузорковање. Узимање подузорка је неопходно када узорак због своје величине не може да се чува или користи у целости. За припрему узорака за испитивање подели се лабораторијски узорак у репрезентативне делове док се не постигне одговарајућа величина узорака. Метода четвртања: пажљиво се измеша узорак седимента и рашири у танком слоју на подлогу која неће утицати на састав узорака. Подели се седимент на 4 једнака дела и споје се 2 дијагонална дела уз одбацивање друга два.

Особље које узима узорке обично прегледа литологију тла на терену визуелном проценом. Ово је релативно лак задатак који могу да ураде радници који имају одређену обуку из геологије. У случају да су потребне детаљније информације и ако зрна не могу да се идентификују помоћу цепне лупе, микроскопски преглед у лабораторији може да обави геолог. У неким случајевима може бити потребна XRD анализа (X-ray Diffraction). Визуелном проценом на терену се такође може утврдити присуство одређених загађујућих материја. Примери неких загађујућих материја су уље, катран и други обојени материјали. За нафту, на пример, данас је у широкој употреби метода UV-флуоресценције која се успешно користи у истраживању нафте. Ако теренске процене не дају довољно информација, спроводе се лабораторијска испитивања коришћењем IR (инфрацрвена спектроскопија), GC (гасне хроматографије), AAS (атомске апсорпционе спектроскопије) или било које друге методе.

4.2.5. Испитивање земљишног раствора

Директне методе. Узорке прикупљене на терену претходно поменутих методама потребно је анализирати одмах по доношењу у лабораторију. Време између узимања узорака и анализе увек треба да буде минимално. Физичке параметре, као што су pH, електропроводљивост и салинитет, треба одредити на почетку анализе. Одређивању садржаја метала обично претходи додавање киселине у узорке (0,5 ml cHNO_3) да би се обезбедила десорпција метала са зидова боца за складиштење. Ако се узорци сакупљају лизиметрима, филтрирање можда неће бити потребно, јер порозне мембране, или пак песак у случају лизиметара нулте напетости, делују као филтери.

Међутим, детектоване концентрације могу бити погрешне због чињенице да узорци прикупљени претходним методама узорковања обично потичу из грубих и средњих пора земљишта, које често имају концентрације загађујућих материја које одступају од оних у финијим порама. Да би се утврдио бољи квалитет података, узорци тла са различитих дубина и локација могу се центрифугирати у лабораторији. Прикупљени земљишти раствор се може анализирати да би се обезбедила контрола за податке добијене анализом узорака лизиметра.

Индиректне методе. Индиректне методе које могу да обезбеде податке о земљишном раствору без нарушавања површине земљишта обухватају површинске геофизичке методе, као и технике даљинског истраживања. Оба начина користе мерење варијација физичких параметара као што су гравитација, електрична проводљивост или Земљино магнетно поље. Методе даљинске детекције зависе од мерења одговора на специфичне делове електромагнетног спектра, као што су гама зраци, видљива светлост или микроталаси.

Површинске геофизичке методе. Класичне методе које се успешно користе у овој категорији су оне које зависе од мерења отпорности или сопствених потенцијала земљишта. Међутим, електрогеофизичке методе које се користе у истраживањима животне средине зависе од мерења варијација два параметра који су кључни за проводљивост електричне струје унутар земљаних материјала. То су отпорност и проводљивост.

Електрична отпорност (ознака ρ), тј. специфични електрични отпор, је физичка величина која описује својство материје да се опире протицању електричне струје. Електрична отпорност је реципрочна електричној проводљивости. Може се одредити мерењем електричног отпора R , дужине електричног проводника у смеру електричне струје l и површине његовог попречног пресека S , то јест:

$$R = (\rho \times l) / S$$

где је R – електрични отпор (Ωm); l – дужина; S – површина и ρ – отпорност

У земљаним материјалима, порозност и хемијски састав флуида који испуњавају поре су примарни фактори који одређују отпорност тела стене или тла. Због тога, салинитет земљишних течности игра главну

улогу у одређивању проводљивости електричне струје у земљишту на малим дубинама. Користећи ову важну чињеницу, расподела отпора на малим дубинама тла утврђује се површинским мерењима и тако добијени резултати се користе за лоцирање загађујућих материја на месту истраживања. Ово се ради на терену преносом једносмерне електричне струје кроз земљиште, након чега следи мерење индукованог потенцијала. На површини се користе два пара електрода. Један пар електрода (струјне електроде, "А" и "В" на слици 4.8) служи за увођење струје у земљиште, док други пар (потенцијалне електроде, "С" и "D" на слици 4.8) служи за мерење потенцијала повезаног са струјом.

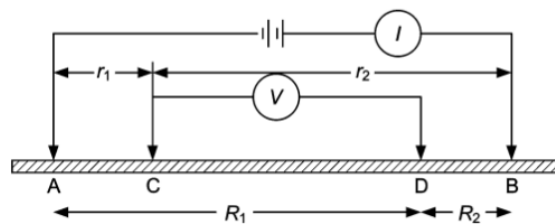
Потенцијал у тачки "С" је дат са:

$$V_c = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

где је r_1 растојање између електрода "С" и "А", док је r_2 растојање између "В" и "С". Потенцијал у тачки "D" изражен је једначином:

$$V_D = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

где је " R_1 " растојање од "D" до "А", док је " R_2 " растојање од "D" до "В". У оба случаја отпор ρ се може израчунати из једначине, пошто је " V " познато из мерења.



Слика 4.8. Распоред електрода

Методe даљинског откривања. Даљинска детекција је термин који се користи за описивање метода добијања информација о објекту помоћу сензора који је физички одвојен од објекта. Сензори се могу монтирати на различите платформе, у распону од земаљских статива до авиона и балона. Међутим, углавном се користе авиони опремљени фотографским уређајима. Већина метода даљинског откривања користи

мерење одговора на специфичне делове електромагнетног спектра као што су гама зраци, IR, видљива светлост, микроталаси или радио таласи. Они такође користе мерење промена у потенцијалним пољима која могу да укажу на аномалије подземља, као што су гравитација и Земљино магнетно поље. Веома добри резултати су постигнути у лоцирању закопаног отпада и одређивању дубине до подземних вода помоћу радарских таласа који продиру у земљу (*енг. Ground Penetrating Radar waves (GPR)*). Ова техника се такође успешно користи за мерење органских загађујућих материја у подземним водама. Мери депресију капиларне зоне, која настаје услед присуства угљоводоничних филмова на површини подземних вода.

4.2.6. Мониторинг токова подземних вода

Као што је раније поменуто, загађујуће материје које се инфилтрирају у земљиште могу се транспортовати или апсорбовати на површинама зрна у незасићеној зони. Они такође могу продрети до засићене зоне, где се даље транспортују и шире у широком обиму. Проучавање динамичких својстава подземних вода и механизма протока може бити веома важно у планирању и пројектовању пројеката санације. Праћење брзина и праваца струјања је стога суштински део целог плана мониторинга. Да би се разумела динамика подземних вода, укратко ће бити објашњена карактеризација нивоа концентрација воде и степен промене њихових динамичких својстава у складу са преовлађујућим геолошким условима.

Различите зоне подземних вода. Подземне воде су концентрисане испод површине у две главне зоне које представљају два различита стања концентрације (или притиска). Почевши од површине, незасићена зона је онај слој који сеже до нивоа подземне воде. Такође је позната као аерирана зона. Она може, под неким условима, бити повремено засићена. У подножју незасићене зоне налази се област у којој се подземна вода подиже капиларним силама, чија висина зависи од величине пора седимената. Пратећи принципе капиларног подизања слој достиже максималну висину при најмањој величини пора у водоносном слоју. Капиларни слој формира прелазну зону између трајно засићене фреатичне зоне и незасићене зоне.

Праћење смерова тока подземних вода. Правци тока подземних вода могу се грубо закључити из топографије локације или консултовањем

хидрогеолошке карте; међутим, ради тачности на локалној скали, ово се ради систематским мерењем висине подземних вода изнад стандардног нивоа (обично нивоа мора) и учртавањем резултата на основну мапу која приказује дистрибуцију хидролошких падова. У ту сврху буше се осматрачки бунари који сежу испод нивоа воде на неколико (што је више могуће) локација истражног места. Треба их обложити цевима једнаких пречника ($\sim 4''$). Мерења дубине до нивоа воде систематски се врше у једнаким периодима и израчунава се висина изнад нивоа мора. Локација испитних бунара зависи од два услова, без којих би се могли постићи погрешни резултати. То су:

(i) Све испитне рупе треба да буду потопљене на дубину која не иде даље од истог водоносног слоја.

(ii) Требало би да имају добру хидрауличку проводљивост у односу један на други.

За испуњење првог услова потребно је основно познавање геологије поземља у датој области, тако да сви осматрачки бунари треба да буду избушени на дубинама и позицијама које остају унутар граница истог водоносног слоја.

Међутим, да бисмо били сигурни у добру хидрауличку проводљивост између испитних бунара, потребни су експерименти са испумпавањем. Према правилу које је 1962. године успоставио Натерман (*Nattermann*) за експерименте је потребно утврђивање подобности неког места као систематске мерне станице за праћење нивоа воде. По овом правилу, добра хидрауличка проводљивост се доказује у испитној бушотини ако следећа релација има бројчану вредност већу од 0,0115:

$$\varepsilon = \frac{2}{t} \left(\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2} \right)$$

где је h_1 пад нивоа воде пумпањем у односу на првобитни ниво; h_2 је повратак нивоа воде након времена t ; t је време у мин.

Да би се ово илустровало, може се узети у обзир следећи пример: У експерименту са испумпавањем, ниво воде је опао за 45 cm. После 5 минута, међутим, повратни ток је проузроковао да се ниво поврати на висину за 28 cm већу од најнижег нивоа постигнутог испумпавањем. Да ли је локација погодна да буде изабрана као станица за праћење нивоа воде?

$$h_1 \text{ (ниво пада)} = 45 \text{ cm}$$

$$h_2 \text{ (повратак нивоа)} = 28 \text{ cm за } t = 5 \text{ мин}$$

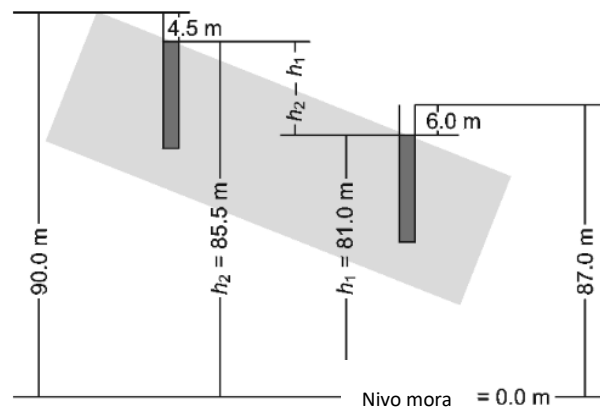
Дакле,

$$\varepsilon = \frac{2}{5} \left(\frac{45 - 28}{45 + 28} \right) = 0,093$$

што је више од 0,0115, односно локација је погодна као контролна станица за мерење висине воде. Поседује добру хидролошку проводљивост унутар водоносног слоја. Подаци прикупљени током дужег времена касније се користе за цртање мапа подземних вода, на којима се цртају потенциометријске контуре да би се приказали правци токова подземних вода.

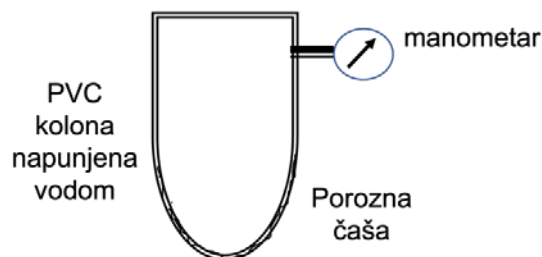
Праћење нивоа подземних вода. Мерење висине подземне воде у различитим бунарима за осматрање није само корисно за одређивање правца тока, већ такође може да пружи информације које ће се користити у Дарсијевој једначини за одређивање многих других параметара, као што је брзина протока подземне воде, транспорт загађујућих материја у подземним водама, или време потребно да одређена количина загађујућих материја стигне до одређене тачке у области.

Практично, ниво подземне воде у бунару за осматрање се мери одузимањем дубине до нивоа воде у бунару за посматрање од топографске висине његовог врха кућишта изнад референтног нивоа (обично нивоа мора). Дакле (*слика 4.9*) ако врх кућишта осматрачког бунара лежи на висини од 87,0 m надморске висине и дубина до нивоа воде мерено од врха кућишта износи 6,0 m, ниво подземних вода је $87,0 - 6,0 = 81,0 \text{ m}$.



Слика 4.9. Праћење хидрауличних глава у два бунара

Мерење нивоа подземних вода у незасићеној зони. Ниво подземних вода у незасићеној зони, тј. садржај влаге, се мери помоћу тензиометра. Стандардни тензиометар се састоји од провидне пластичне цеви са порозном керамичком купом на доњем делу и манометром на врху (види слику 4.10). Тензиометар се пуни дегазираном водом и ставља у земљу на потребну дубину. Преко порозне купе успоставља се хидраулички контакт између воде у земљишту и тензиометра и систем достиже динамичку равнотежу када су се изједначили токови у оба смера.



Слика 4.10. Тензиометар

Очитавања тензиометра дају такозвани тензиометарски потенцијал (ψ_t), који је повезан са степеном засићености земљишта. Његова вредност при пуној засићености тла (где нема размене између тла и инструмента) је једнака 0. Обично се тензиометри различитих дужина укопавају на

одређеним дубинама, где се могу очитати градијенти потенцијала потенциометра.

4.3. Биолошки мониторинг

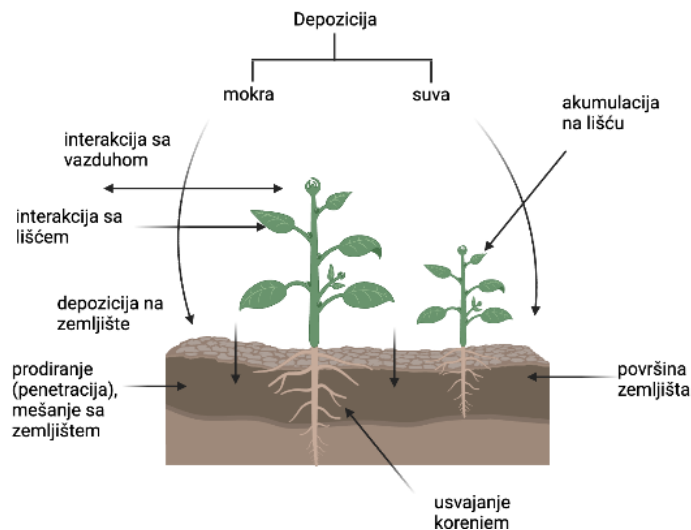
Биолошки мониторинг или биомониторинг је организован систем праћења биолошких промена у времену и простору, који на најбољи начин одсликава комплекс природних и антропогених појава, утицаја и процеса. Биљке су се показале као одлични индикатори хемијских услова који владају у њиховим супстратима – својство које сада налази широку примену у мониторингу земљишта. Треба, међутим, напоменути да запажања која повезују биљне врсте са хемијским условима у земљишту нису нова. У прошлости рудари су одувек знали за индикаторска својства појединих биљних врста за проналажење рудних лежишта. Брукс (1979) извештава о употреби *Lychnis alpine* од стране скандинавских рудара у потрази за бакром у средњем веку. Такође, у јужном Тунису и на Синају (Египат) номадска племена су одувек користила биљке као индикаторе сланих супстрата. У средњој Анадолији (Турска) становници идентификују слане подлоге кроз мале грмове сланке – *Salsola nitraria*, због своје прелепе ружичасте боје.

Мартин и Котри (*Martin and Coughtrey (1982)*) класификују индикаторске биљне врсте у две главне групе: универзални индикатори, који искључиво расту на земљиштима са високим концентрацијама метала на које указују; и локални индикатори, који су повезани са металоносним супстратима у одређеним географским областима, али који такође расту у неминерализованим подручјима. То значи да су универзални индикатори најкориснији типови ових индикатора. Међутим, ова класификација није тако крута као што може изгледати на први поглед. Неки универзални индикатори могу повремено расти у областима са ниским концентрацијама метала који карактеришу њихове типичне супstrate, као што је *Crotalaria cobaltica*, која се иначе сматра универзалним индикатором за кобалт.

Биљке указују на стање својих супстрата кроз два својства: географску распрострањеност или формирање одређених скупова, као и појаву абнормалних морфолошких промена услед стреса или метаболичких проблема који су резултат усвајања метала (патуљастост, гигантизам, хлороза листова, изобличење плодова или промена боје цветова).

За студије животне средине, међутим, сви делови биљке се узимају у обзир у процесу праћења. Ово је посебно значајно у случају лишћа, које је способно да пружи широке информације, не само о хемијском саставу земљишта, већ и о свим атмосферским влажним или сувим наслагама (киселе кише, честице и гасови) које могу да утичу на екосистем (слика 4.11). Суве насlage се могу акумулирати на површинама листова, што доводи до интеракције са ткивима или једноставно до промене хемијског окружења на овим површинама. Влажне насlage на листовима могу пореметити размену гасова са атмосфером (слика 4.11) или је чак зауставити, што доводи до промена које се могу појавити као патолошки симптоми. Влажне насlage такође могу директно да нападну површине листова изазивајући озбиљне промене. Део влажних наслага се, међутим, може транспортовати у земљиште стабљиком или падањем директно на површину земљишта.

Директно наталожени материјал на површини земљишта, заједно са материјалом који се раније акумулирао на површини лишћа, највише доприноси квалитету земљишта. Ово се дешава испирањем стеље (простирке) и процеђивањем површинских вода и продирањем насталих раствора у незасићену зону.



Слика 4.11. Интеракције између вегетације, земљишта и атмосфере

4.3.1. Планирање и спровођење биолошког мониторинга

Планирање биолошког мониторинга треба да почне у раној фази пројекта мониторинга. Он чини интегрални део плана почевши од фазе карактеризације локације. Припрема мапа локације треба да обухвати, поред земљишне, геолошке и хидролошке карте, одвојене карте које приказују дистрибуцију биљних заједница и састојина дрвећа и карте које приказују дистрибуцију вегетације и које указују на било какве посебне морфолошке промене.

4.3.2. Узорковање и испитивање лишћа

Лишће треба узорковати, у сврху праћења, сваке године у одређеним периодима. На пример, лишће листопадних врста се узоркује крајем лета, док се лишће зимзелених обично узоркује у време мировања. Приликом одабира узорка дрвећа треба узети она стабла која се налазе у близини локација на којима су узети узорци земљишта (под условом да им корен није оштећен током узорковања земљишта). Узорак дрвећа треба да представља доминантну врсту на парцели. Њихов број мора покривати и представљати област истраживања. Не би требало да буде мањи од 10% од броја преовлађујућих врста.

За све узорке лишћа, листови треба да представљају текућу годину, односно последње три године у случају бора. Треба их сакупљати са горње трећине дрвета.

Хемијско испитивање лишћа. Након што се узорци сакупе и донесу у лабораторију, треба их припремити за хемијску анализу. Обично их није потребно прати, али, у случају да су сакупљени у областима са високим степеном загађености ваздуха, може се препоручити систематско прање. Касније их треба сушити у рерни на 80 °C 24 сата, а затим самлети до хомогеног праха. За саму хемијску анализу узорци праха се дигестирају мокрим или сувим техникама дигестије. Ако се одаберу методе влажне дигестије, узорци би се дигестирали врућим минералним киселинама или мешавином киселине и оксидационог агенса као што је водоник пероксид. У методама суве дигестије, спаљивање узорака се одвија у пећи на високој температури (500–600 °C), након чега следи растварање пепела у води или разблаженим киселинама. Аналитичке технике могу зависити од елемената који се одређују и мере.

4.3.3. Узорковање и испитивање биљног отпада

Узимање узорака и анализа одбаченог лишћа може пружити корисне информације о концентрацијама хранљивих и загађујућих материја у вегетацији, до којих долази услед уноса из земљишта или услед атмосферског таложења.

Узорковање биљног отпада врши се месечно или у фиксним периодима како би се обезбедила регистрација свих временских промена. То се ради дистрибуцијом џакова на дубину од око 0,5 m испод дрвећа, како би се обезбедило сакупљање стеље, тј. лишћа и других остатака дрвета пре него што га их ветар однесе. Џакови треба да буду направљени од инертног материјала. Њихово постављање у јарке треба да буде тако да не додирују тло. Ово осигурава да се влага из земљишта не меша са сакупљеним материјалом, јер би то убрзало разлагање.

Након сушења узорака на 40 °C, спроводе се хемијске анализе сличне анализи лисног материјала. Резултати оба процеса се касније упоређују да би се донели закључци о статусу исхране и транспорту загађујућих материја.

5 Ремедијација земљишта

Ремедијација представља процес санације коме се приступа након што се утврди да је подручје истраживања загађено до нивоа ризика који захтева интервенцију. Циљ је, на првом месту, да се ризик од токсичних полутаната у земљишту сведе на минимум употребом хемијских, физичких или биолошких третмана. Технике санације се могу применити на самом месту где је полутант идентификован (*in situ*) или након вађења и транспорта земљишта на одређену локацију (*ex situ*).

Оно о чему посебно треба водити рачуна јесте да ремедијација представља последњи корак у плану очувања земљишта, ком се приступа на основу систематске дијагностике укључујући праћење и моделовање стварног стања земљишта. Међутим, уколико је тај корак неопходан посебну пажњу треба посветити плану ремедијације где је потребно узети у обзир низ фактора као што су нпр. карактеристике локалитета, специфичности пројекта и/или специфичности и карактеристике земљишта)

План ремедијације мора бити у складу са планом коришћења земљишта. Пре имплементације законом обавезујућег плана употребе земљишта потребно је у обзир узети и доступне технике ремедијације, као и могућност њихове примене. Територије које су по просторном плану предвиђене за дечија игралишта и вртиће захтевају интензивну и комплетну ремедијацију. Из овог разлога, није препоручљиво користити земљиште у ове сврхе уколико је то земљиште под великим притисцима тј. високим утицајем загађења. Локације где ће бити стамбена насеља не би требале да буду изложене високим концентрацијама полутаната, док је, с друге стране, индустријска насеља могуће лоцирати на местима која су под високим притисцима полутаната. Посебна пажња, поред економског фактора, треба да буде усмерена на време које је потребно за потпуни опоравак локалитета. Почетни скрининг, карактеристике испитиваног земљишта и ниво контаминације, као и будућа употреба

земљишта, морају бити узети у обзир приликом планирања ремедијационих активности. У плану је такође потребно навести основне карактеристике процеса који је одабран, заштита на раду, као и контрола емисије, мониторинг програм, време које је предвиђено за ремедијационе активности, као и оперативне трошкове.

Термин “место опасног отпада” се користи да се опише дефинисано подручје или његов део за који постоји сумња или доказ да представља опасност по животну средину и здравље људи. Разликују се напуштена места, напуштене депоније и места са потенцијално опасним отпадом, укључујући и места са опасном муницијом. Да би се могли испитивати локалитети са опасним отпадом потребно је утврдити (i) историју коришћења земљишта и (ii) путеве емисије. Напуштена места представљају чак значајнију опасност за подземне воде него што је опасност по земљиште. Полутанти растворени у перколационој води се крећу кроз пропустљиве слојеве земљишта и на крају доспевају у подземну воду. На напуштеним местима обраслим вегетацијом полутанти могу бити такође усвојени од стране корена биљака и тако доспети у ланац исхране. Додатни еколошки утицај се може очекивати у случају издувних гасова и прашине. Процена опасности коју представља неко напуштено место треба да укључи све потенцијалне путеве и активности, а такође и све аспекте који треба да буду очувани (здравље људи, вода, земљиште, ваздух, биљке, материјални објекти као што су грађевине или линије снабдевања/уклањања). Због великог броја могућих контаминаната, процена потенцијалне опасности ће бити ограничена само на неколико супстанци које угрожавају животну средину. Критеријуми избора (ако постоје довољне информације о типу загађења) укључују покретљивост, токсичност, биоакумулацију и деградабилност супстанци.

5.1. Планирање и реализација ремедијације земљишта

Успешан план ремедијације мора да се заснива на информацијама добијеним током прелиминарних дијагностичких резултата и радова, који се обављају пре доношења одлуке о почетку пројекта ремедијације. Следећу контролну листу треба израдити и пажљиво проучити пре него што се почне са стварним дизајном техничког решења:

1. Које су врсте и хемијска природа загађујућих материја утврђене на локацији?

-
- Органске материје
 - Неорганске супстанце
2. Које су димензије и мере загађења?
- Да ли је загађење локализовано?
 - Да ли је дисперзионог типа?
 - Колико је хитан план санације?
3. Који је ниво ризика?
- Низак ниво ризика
 - Средњи ниво
 - Висок ниво ризика
4. Које техничке мере се сматрају најпогоднијим за овај пројекат?
- *in situ*
 - *ex situ* (приликом разматрања ове технике у обзир треба узети и транспорт и складиштење земљишта)
5. Да ли постоје финансијска ограничења у избору техничког начина санације?
6. Који метод је технички погодан и финансијски се уклапа у економски оквир пројекта?

5.2. Врста и хемијска природа загађујућих материја

Полутантом се сматра било која супстанца штетна по животну средину која је случајно или намерно испуштена на земљиште. У циљу разматрања потенцијалних ремедијационих техника приступа се поједностављивању класификације полутаната који могу изазвати проблем у животној средини, који имају слична хемијска и физичка својства, а у већини случајева, имају и упоредиве степене одговора на дати процес ремедијације. Потребно је размотрити следећа питања:

- (1) Да ли су полутанти у датом случају хемијски окарактерисани и идентификовани? Да ли припадају групи чврстих или течних материја или се ради о процедурним водама?

- (2) Да ли су органски или неоргански полутанти у питању? Ако су органски, да ли су алифатични или ароматични? Ако су ароматични, да ли су халогенисани?
- (3) Колико су високе/ниске њихове молекулске масе? (из литературе)
- (4) Да ли су испарљиви?
- (5) Да ли су (за органске материје) поларни или неполарни? Колики је њихов степен растворљивости (висок, низак)?
- (6) Има ли информација о њиховој биоразградивости?
- (7) Ако су неоргански, које категорије су: метали, катјони метала, отпад – киселине/алкалије?
- (8) Да ли су једињења која се лако оксидују? Има ли неорганских цијанида?

Пажљиво коришћење ове контролне листе веома је важан корак да се на прави начин изабере одговарајућа техника ремедијације. Други фактори, као што су на пример размера загађења и/или финансијска ограничења, могу наметнути ревизију одлука.

5.2.1. Размера контаминираности

Резултати узорковања и хемијског испитивања пружају довољно информација о просторним димензијама контаминираности локалитета који треба третирати. Случајеви загађења могу се, према својим просторним димензијама, сврстати у следеће две главне врсте:

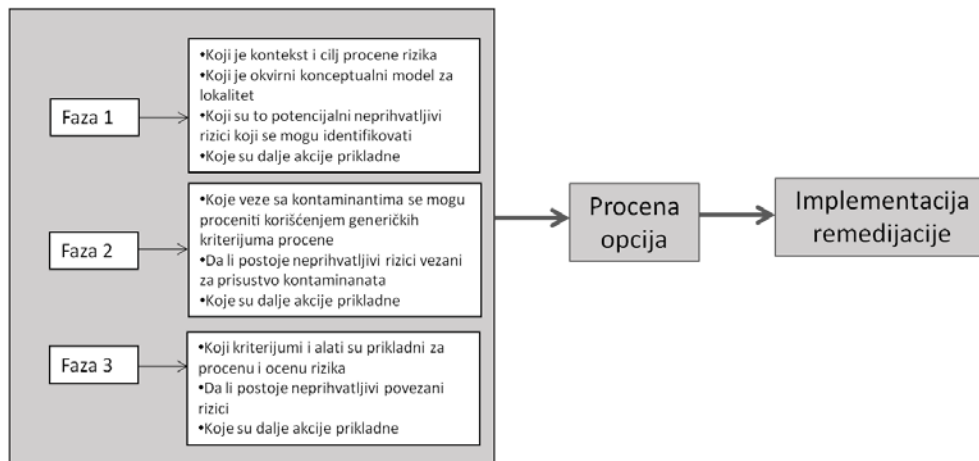
1. Локализовани случајеви загађења. То су случајеви који настају услед несрећа са изливањем, где су просути материјали познати и ризик је минималан када се предузму брзе мере. У овим случајевима санација се углавном спроводи на лицу места. Потребно је поседовати лист о безбедности и информацијама о загађивачу или опасном материјалу који се формира изливањем, тако да се могу предузети хитне радње. Говори се и о локализованом загађењу када је извор загађења познат, као што су резервоари који цуре, депоније или стари индустријски објекти. У таквим случајевима, загађење би се ширило из извора током који је мање-више локализован и концентрација се смањује са повећање удаљености од извора загађења. Шема протока и брзина смањења концентрације загађивача са повећањем удаљености од извора, могу бити праћене пажљивим узорковањем, истраживањем и мапирањем резултата.

2. *Случајеви дифузног загађења.* Полутанти који улазе у земљиште могу се транспортовати и у хоризонталном и у вертикалном правцу, при чему ће димензије транспорта и дифузије зависити од засићености земљишта и од његових хидрауличких и литолошких карактеристика. Када загађујуће материје доспеју у подземне воде, њихов даљи транспорт ће зависити од литолошких карактеристика водоносног слоја (аквифера). Неки аквифери, због својих карактеристика, могу селективно транспортовати полутанте до зоне засићења. Као пример, може се узети случај доспевања нитрата до засићене зоне аквифера од ситнозрног кречњака (микрит, креда). У овом окружењу нитрати могу да постигну веома високе концентрације акумулацијом. Заштићени су од денитрификације и од денитрификационих бактерија јер креда ситног зрна има веома мале величине пора, те омета продор денитрификационих бактерија у аквифер. Иста појава је такође одговорна за акумулацију многих материја у подземним водама. Такви полутанти, који су се цедили и акумулирали у земљишту током дугог низа година, достижу огромне концентрације које се могу просторно веома проширити. Акумулација полутаната истих размера може се јавити и када се полутанти који су били комплексирани са хумусним супстанцама ослобађају услед промене хемијске средине, а затим распршују у земљишту. Овакви случајеви широких просторних димензија загађења, који нису локализовани или дефинисани извором загађења и правцима тока подземних вода, обично се описују као дифузни случајеви загађења. Њихова карактеризација, мапирање и санација захтевају детаљније планирање и комплексније техничке инсталације у односу на локализоване случајеве.

5.2.2. *Ниво ризика*

Нивое ризика од полутанта треба одредити према прикупљеним информацијама о хемијским и физичким својствима потенцијално токсичног материјала и његовог степен дисперзије у испитиваној области (слика 5.1). Информације о биодоступности и покретљивости полутаната могу указивати на низак ниво ризика, ако је токсични материјал у непокретном облику или у недоступном облику, без утицаја на услове животне средине. Међутим, континуирано праћење је важно у таквим случајевима, где не постоји непосредан ризик, али се очекују могући проблеми при промени хемијских или физичких услова. У

случајевима када постоји непосредан ризик, као што су несреће након изливања или откривање старих токсичних наслага насталих са старих депонија, војних или индустријских локација, мере за ремедијацију/санацију треба започети или спровести у кратком року.



Слика 5.1. Шематски приказ процене ризика

Када се утврди потреба за проценом ризика, неопходно је извршити прелиминарну процену ризика. Међутим, у зависности од околности и исхода, можда неће бити потребно вршити даљу процену ризика, или ће можда бити прикладно користити само један од два приступа квантитативној процени ризика уместо оба. Када су ризици процењени, и ако се сматра да је неопходна акција за смањење или контролу ризика, следећи део процеса је процена опција за суочавање са ризицима, након чега следи спровођење одговарајућих акција. Слика 5.1 илуструје однос између процене ризика и каснијих фаза, као и кључне одлуке у процени ризика које доприносе укупном процесу управљања ризиком.

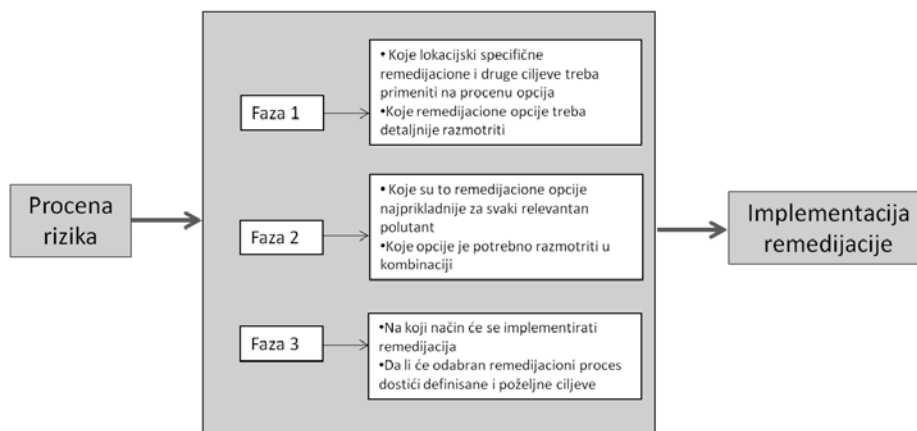
5.2.2.1. Процена опција

Процена опција је друга фаза укупног процеса управљања ризиком. То долази у обзир само ако процена ризика покаже да су неприхватљиви ризици повезани са локацијом и њима треба управљати. У пракси, може постојати више начина да се смање или контролишу неприхватљиви ризици, од којих сви имају предности и ограничења у сваком конкретном случају. Улога процене опција је да утврди, узимајући у обзир све околности локације, које опције (појединачно или у

комбинацији) нуде најбољи општи приступ санацији за локацију као целину. Постоје три главне фазе процене опција:

1. Идентификација изводљивих опција санације за сваку релевантну везу загађења и рецептора
2. Спровођење детаљне процене изводљивих опција санације како би се идентификовала најприкладнија опција за било коју конкретну везу загађења и рецептора;
3. Израда стратегије санације која се бави свим релевантним везама загађења и рецептора, по потреби комбиновањем опција санације. Када се идентификује и усагласи стратегија санације, процес управљања ризиком се наставља са детаљним планирањем и дизајном потребним да би се стратегија спровела у пракси и показала да је била ефикасна.

Слика 5.2 приказује кључне одлуке у свакој фази процене опција, као и однос између процене опција и процеса процене ризика и имплементације стратегије санације.



Слика 5.2. Кључне одлуке у процени опција ремедијације

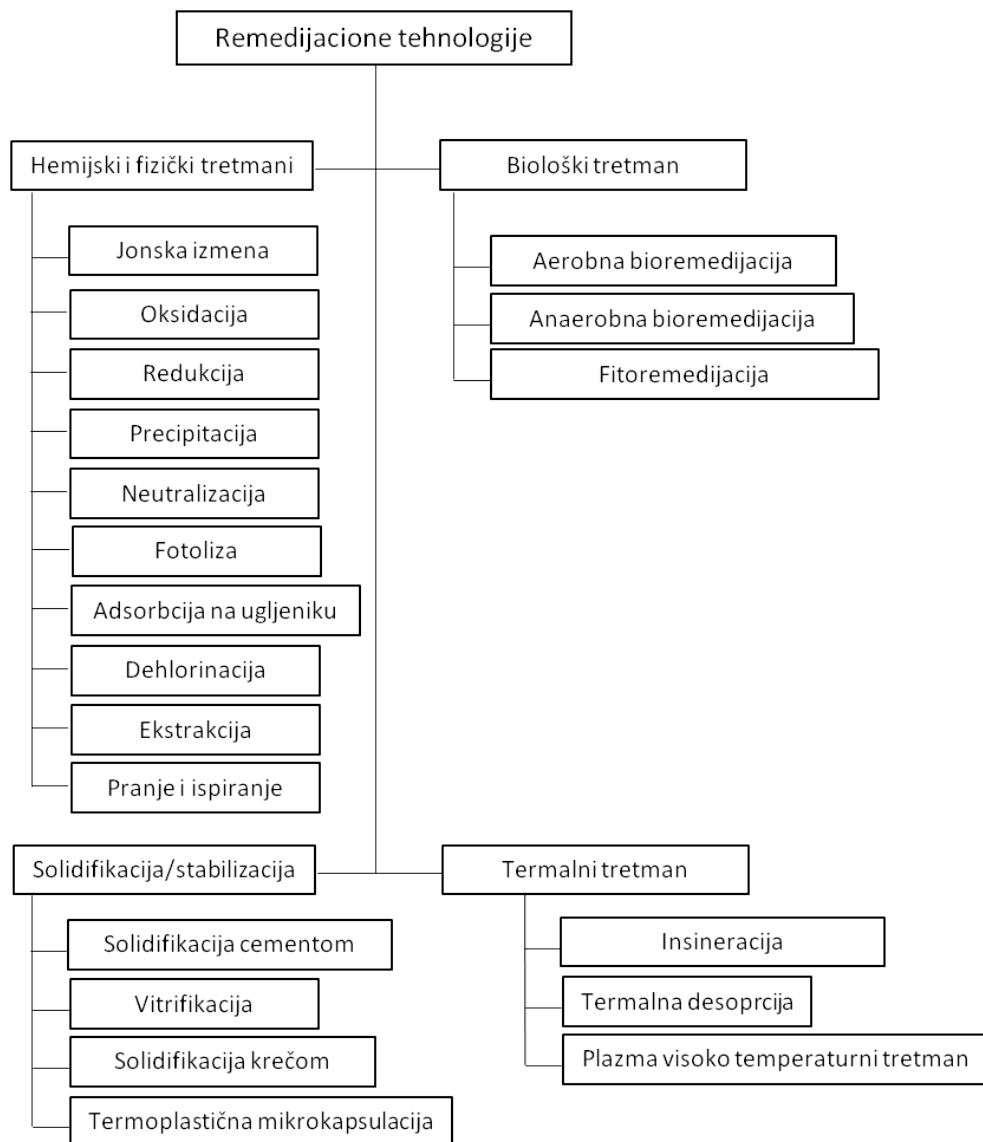
5.3. Ремедијационе технологије

Према скали загађења, степену ризика и финансијским и временским ограничењима на пројекту ремедијације, третман земљишта се може извршити одмах на месту изливања полутанта (*in situ*), или се земљиште може транспортовати до посебних објеката, који су посебно пројектовани за ову сврху, где се може извршити ремедијација. Пример

оваквог процеса је прање високо контаминираног земљишта у специјалним резервоарима. Загађено земљиште се такође може транспортовати и ширити по површини припремљеној да спречи ширење контаминације у бочним и вертикалним правцима. Ова метода је посебно погодна за земљишта контаминирана нафтним производима. Уопштено говорећи, постоје четири класе технологија ремедијације (слика 5.3):

- Хемијске и физичке методе
- Биолошке методе
- Методе фиксације (солидификација/стабилизација)
- Методе термичке деструкције

Неке од горе наведених техника могу захтевати посебне техничке инсталације, друге могу бити погодне за употребу на лицу места (*in situ*), док треће могу бити погодне за сва три оперативна начина санације. Табела 5.1 приказује одређени радни режим погодан за сваку од горе наведених техника. Из табеле се јасно види да се технологије попут вакуумске екстракције и испирања земљишта углавном примењују на лицу места, док су све методе биоремедијације погодне за све режиме рада. Ова чињеница игра улогу у финансијском планирању пројекта ремедијације. Главну, одлучујућу улогу, међутим, игра ефикасност методе у односу на врсту загађења на коју се примењује. У наставку ће укратко бити описана свака од горе наведених технологија.



Слика 5.3. Подела ремедијационих технологија

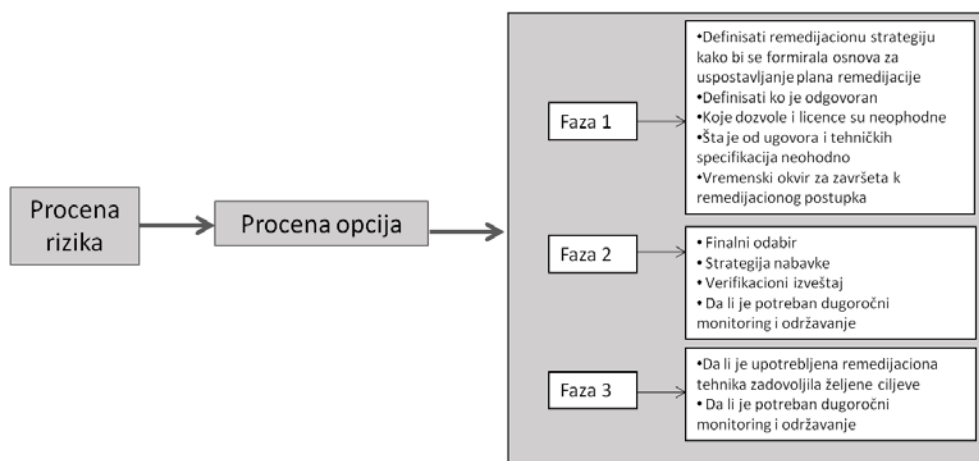
Табела 5.1. Различити операциони модови и одговарајуће ремедијационе технологије

Операциони модови	Одговарајуће ремедијационе технологије
In situ	Екстракција вакумом, прање земљишта
In situ или физичко хемијски процеси	Адсорпција угљеником, јонска измена
In situ или у танковима	Стрипинг, дехлоринација, солидификација цементом, витрификација, солидификација кречом, термопластична микроенкапсулација
Све горе наведене (In situ или физичко хемијски процеси или у танковима)	Неутрализација, оксидација, биоремедијација
Физичко хемијски процеси	Фотолиза
Физичко хемијски процеси или у танковима	Преципитација, редукција, адсорпција угљеника, јонска измена
У танковима	Пиролиза, прање земљишта, флуидизовани слој

5.3.1. Имплементација и стратегије санације

Горе описане компоненте управљања ризиком омогућавају идентификацију неприхватљивих ризика и избор најприкладније стратегије санације. Стратегија ремедијације може се састојати од низа активности санације и/или дугорочног програма праћења за управљање релевантним везама загађења и рецептора идентификованим у оквиру концептуалног модела. Међутим, да би се завршио процес управљања ризиком, треба да се примени стратегија санације (слика 5.4). То може укључивати извођење санације као независног пројекта или комбиновање са другим радовима планираним за локацију. Важан први задатак је израда плана имплементације, који се бави свим аспектима пројектовања, припреме, имплементације, верификације и дугорочног праћења и одржавања санације. Имплементација стратегије мора бити у потпуности евидентирана, користећи одговарајући систем управљања квалитетом, тако да постоји трајна евиденција (извјештај о верификацији) о обављеном раду. Тамо где је потребно, санацију треба

пратити и одржавати. Мониторинг се може користити као средство за демонстрирање усклађености са договореним циљевима и као рано упозорење на негативне трендове.

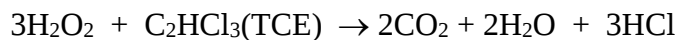


Слика 5.4. Шема имплементације стратегије ремедијације

5.3.2. Хемијске и физичке технике ремедијације

Главни циљ ремедијационих процеса је да се спречи ширење загађења услед продирања у подземну воду, улажења опасних и потенцијално опасних материја у ланац исхране и слично. У даљем тексту су наведене неке од најчешће коришћених хемијских и физичких метода ремедијације.

Хемијска оксидација као процес ремедијације земљишта укључује примену хемијских оксидирајућих средстава који трансформишу, деградирају и имобилишу загађујуће супстанце (посебно ако се ради о органским полутантима и цијанидима). Најчешће коришћени оксидирајући агенси су озон, водоник пероксид, калијум перманганат, калцијум нитрат и кисеоник. Сви ови агенси могу да се користе у комбинацији са UV зрачењем које појачава њихов ефекат. Оксидација се сматра изузетно ефикасном методом са стопом ефикасности преко 90% након кратког времена излагања земљишта оксидационим агенсима. Реакција, ако је водоник-пероксид коришћени оксидациони агенс, одвија се према следећој једначини:



*ТСЕ - трихлоретилен

Уколико се као оксидујући агенс користи озон реакција је следећа:



Уколико се користи калијум-перманганат као оксидационо средство за уклањање трихлоретилена реакција тече по следећој једначини:



Оксидација је метода која се веома успешно користи *in situ*, на месту настанка загађења. Посебно је ефикасна за третирање земљишта загађених бенzenом, етилбенzenом, толуеном, ксиленом, као и полицикличним ароматичним угљоводонцима, фенолима и алкенима.

Јонска измена, хелирање и преципитација. Земљиште са високом СЕС вредношћу могу везати за себе позитивно наелектрисане органске полутанте и метале тако да они постану имобилисани и да се смањи њихов негативан утицај на животну средину. Додавањем различитих кондиционера у земљиште, као што су синтетичке смоле, зеолити или глине може се повећати СЕС третираног земљишта, при чему долази до побољшаног везивања позитивно наелектрисаних полутаната на негативно наелектрисане функционалне групе земљишта. Новоразвијене смоле се сада користе за локације контаминиране сложеним материјалима, као што су токсични метали у комбинацији са органском материјом или чак радиоактивним загађујућим материјама. Такве вишенаменске смоле су способне да изведу процес у једном кораку. Процес хелирања се може сматрати као имобилизациони процес пошто везивање катјона метала спречава његову даљу реакцију у хемијским и биолошким системима. Предности ове методе су релативно ниска цена и могућност уклањања метала из оцедне воде седимента. Мана ове методе је да је потпуно неефикасна за уклањање органских загађујућих једињења.

Фотокатализа. Фотокаталитичка деградација је метода која зависи од способности деградације органских полутаната у присуству ултраљубичастог зрачења. Ово се може постићи излагањем контаминираног земљишта UV светлу које потиче из вештачког извора или пак директним излагањем земљишта Сунчевим зрацима, што може

бити довољно уколико се ради о површинској контаминацији органским полутантима. Процес може бити изведен и као *in situ* и као *ex situ*.

Коришћење UV технологија се сматра изузетно ефикасном методом, захваљујући чињеници да UV зраци уништавају полутанте, при чему се мора водити рачуна о резидуама које се потенцијално могу јавити. UV фотони се користе за деструкцију хемијских веза у летљивим органским полутантима (VOC), као што су трихлоретилен (TCE), толуен, бензен, итд. Одабир UV извора треба вршити у складу са опсегом апсорпције циљног органског полутанта, пошто сваки органски полутант има оптималну таласну дужину за фотодисоцијацију, нпр. бензол 184 nm; ацетон 220 nm и 318 nm и TCE 280 nm. У случају сложених органских супстанци, које могу дисоцирати у друга токсична једињења која имају различите опсеге апсорпције, процес треба поновити са одговарајућим лампама све док на крају процеса не остану само нетоксичне супстанце.

Адсорпција на гранулисаном активном угљу (GAU). Ова технологија је заснована на тенденцији већине органских полутаната да се адсорбују на површину активног угља. Тенденција адсорпције расте са молекулском тежином и тачком кључања органског полутанта. Ова метода се сматра добрим избором за третирање земљишта контаминираних са испарљивим органским једињењима, угљоводоницима велике молекулске тежине, халогенованим испарљивим органским једињењима (VOC) и њиховим халогенизованим облицима, као и неким пестицидима. Ремедијација путем адсорпције на активном угљу је метода која се може спровести у течном фази (као код третмана подземних вода) или у гасној фази (као код третмана отпадних гасова из ремедијационих метода екстракције земљишне паре). Адсорпција на активном угљу је процес који се спроводи *ex situ* у специјалним резервоарима и то углавном за третирање гасова, растварача и органских мириса. Међутим, импрегнација активног угља додатним хемикалијама може бити од помоћи у контроли неких неорганских полутаната као што су водоник-сулфид, жива или радон.

Дехлоринација. Процес дехлоринације укључује деструкцију или трансформацију ароматичних органских загађујућих једињења применом хемијских реагенса у алкалној средини и при повишеној

температури. Предност коришћења ове методе су ниски трошкови и висока ефикасност.

Екстракција растварачима. Техника екстракције растварачима се заснива на мешању загађеног земљишта са растварачима у реактору који може бити континуирани или у шаржама. Растварачи растварају загађујуће супстанце присутне у земљишту и ослобађају их у течну фазу. Чврста фаза се одваја гравитацијом или се течна фаза преводи у гасну фазу а потом се вишестепено дестилује. Због принципа супротног тока и ситних честица, количина растварача може бити мала. Растварач се одваја термички и регенирише у хладњаку. Главна количина растварача се одваја из загађења у испаривачу дестилационог процеса. Растварач и остаци загађења се уклањају као посебан чврсти отпад (нпр. термички). Екстрагенс се може вратити у процес после његовог ослобађања. Овај процес екстракције, који се може изводити на лицу места или изван њега зове се “рибање” (енг. *scrubbing*) земљишта, може бити примењено за уклањање како органских тако и неорганских загађења. Међутим, његове лоше стране леже у чињеници да трошкови и ефикасност у великој мери зависе од типа земљишта и концентрације загађења, да се заостали екстракциони агенс може задржати у земљишту, да се мења структура земљишта и да је потребно уклонити загађење из растварача и уклонити сам растварач. Код екстракције *in situ* постоји и ризик од неконтролисаног ослобађања хемикалија у земљиште и подземне воде.

Испирање. Процес је базиран на чињеници да је већи део загађујућих супстанци везан за најситније честице седимента (песак или глину) тако да се из седимента испирају песак/глина који се касније третирају, док се остатак седимента води као пречишћена фракција.

Солидификација/стабилизација. Ова технологија укључује мешање везивних материјала са контаминираним материјалом ради имобилизације загађења. Везивни материјал хемијски реагује са водом из материјала који је третиран, изазивајући промене у физичким и хемијским особинама и стабилише штетне конституенте спречавајући њихов даљи транспорт у животној средини.

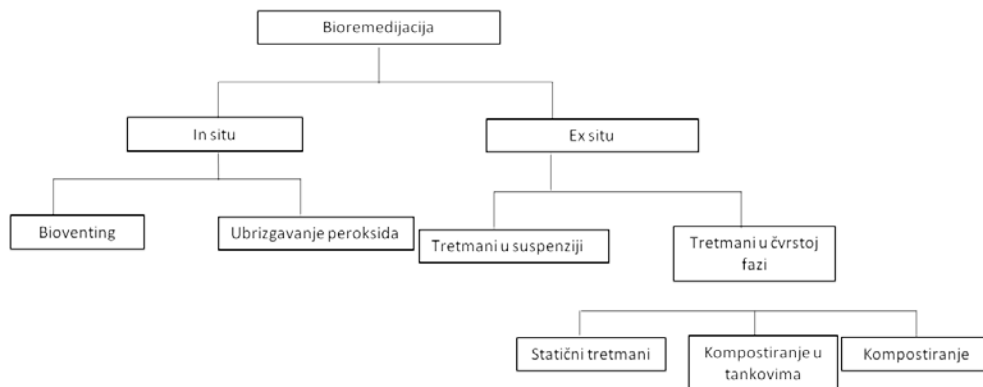
5.3.3. Термичка ремедијација места са опасним отпадом

У термичким поступцима загађење из земљишног материјала се уклања уз помоћ дестилације, пиролизе или спаљивања. Као пример третмана

приказан је низ поступака припреме, третмана у пећи и процеса петостепеног пречишћавања насталих гасова. Након третмана очишћено земљиште се враћа на место одакле је било узето. Примењује се и фаза сушења пре стварне термичке обраде. У приказаном уређају се користе три ротационе бубњасте пећи при чему је капацитет обраде 5 t h^{-1} земљишта. Пошто се екстрахована земља измрви до честица од 30-60 mm, материјал се суши у бубњу за сушење на $200\text{--}400^\circ\text{C}$, а спаљивање се одвија на температурама до 1200°C . Време задржавања у бубњевима за сушење и жарење је од 30 до 45 минута; бубањ за хлађење је такође укључен при чему се врши искоришћавање топлоте. Петостепена обрада отпадних гасова се одвија по следећем редоследу: уклањање честица прашине (уз помоћ циклона и филтер-врећа); термичко накнадно спаљивање (разарање органских супстанци које су још присутне у отпадном гасу – 2 s изнад 1200°C); поступак сушења за везивање киселих гасних компоненти (додавање $\text{Ca}(\text{OH})_2$); уређај за филтрирање са финим филтер-касетама (за уклањање финих честица са везаним тешким металима); филтер са активним угљем за адсорпцију најмањих количина загађења. Ако је земљишни материјал загађен са РСВ, гасови који излазе из ротационе цеви морају да се накнадно спале на температури изнад 1200°C . Земљишни материјал се може обрадити на блажи начин него у описаној ротационој пећи ако се примени метода пиролизе. У том случају ротациона пећ се загрева индиректно споља до температуре око 500°C , примењујући максимално 750°C . Обрадом на овај начин се већином очува минерална структура. Више од 99% РАН се може уклонити при времену задржавања од око 1 сата.

5.3.4. Биоремедијација

Биоремедијација је комплексан процес (слика 5.5). Биолошка деградација се обавља у ћелијама микроорганизама, који ресорбују неке загађујуће материје, па у случају да поседују одговарајуће ензиме долази до њихове разградње у одговарајуће метаболите. Угљоводоници из нафте служе као извор нутријената и енергије за раст и развој микроорганизама, који их разграђују до нафтенских киселина, алкохола, фенола, хидропероксида, карбонилних једињења (алдехиди и кетони), естара и на крају до угљеник (IV)-оксида и воде.

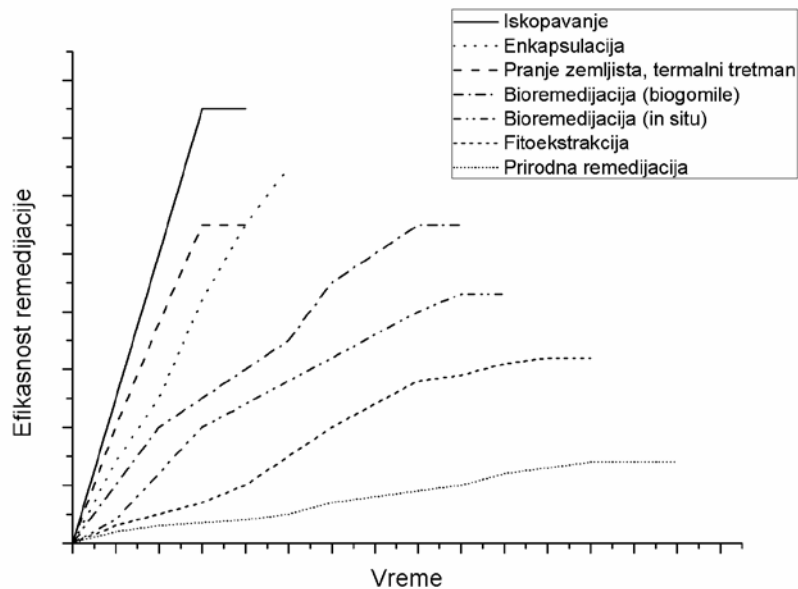


Слика 5.5. Шематски приказ биоремедијационих техника

Приликом дизајнирања биоремедијационог процеса мора се спречити да се загађење шири даље због продирања у подземну воду. Која варијанта чишћења ће се применити зависи од врсте загађења, природе терена и др. Може се применити техничка, спонтана биоремедијација, комбинација обе, или мешавина биоремедијације са небиолошким третманом. Пошто је обично концентрација загађујућих материја у подземној води мања него у зони извора загађења, онда се могу применити другачије процедуре за изворну зону и за раширену мрљу. Фактори који утичу на дизајнирање биоремедијационог процеса су: циљеви који се желе постићи приликом третмана земљишта, ширење загађујућих материја (врста, концентрација и локација), врста биолошког процеса који ефикасно трансформише загађујуће материје, транспортна динамика земљишта. Према месту извођења биоремедијација може бити *in situ* и *ex situ*.

5.4. Цена и дужина трајања ремедијације

На слици 5.6 приказан је однос између времена санације и ефективности санације. На пример, ископавање контаминираног материјала се оцењује као најбржи поступак од свих, јер локација постаје незагађена одмах након процеса ископавања. Насупрот томе, *ex situ* прање и спаљивање захтева више времена због комбинованог ископавања, транспорта, третмана и повратног пуњења. Штавише, ефективност ремедијације је мања, јер се део контаминираног материјала не може третирати (нпр. фина фракција током прања земљишта) или се неке загађујуће материје генерално не елиминишу (нпр. тешки метали током термичке обраде).



Слика 5.6 Однос између времена санације и ефикасности санације

Успостављање технички амбициозних операција имобилизације, као што је инкапсулација, може потрајати више времена од ископавања или испирања земљишта због сложености самог процеса. Ипак, дуже време ремедијације је повезано углавном са *in situ* операцијама биоремедијације и посебно фиторемедијације (фитоекстракције). Ефективност биолошких мера се сматра мањом, пошто се метали, на пример, не могу третирати на овај начин. На крају крајева, природну ремедијацију карактерише веома дуго трајање и ограничена ефикасност.

Литература:

1. Osman KT. *Soil degradation, conservation and remediation*. Springer, 2014; ISBN 978-94-007-7590-9.
2. Mirsal IA. *Soil pollution*. Springer; 2008; ISBN 978-36-620-5401-7.
3. Meuser H. *Soil Remediation and Rehabilitation*. Springer, 2013; ISBN 978-94-007-5751-6.
4. Carter MR, Gregorich EG. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. CRC Press 2007, ISBN 978-04-291-2622-2.
5. Sara MN. *Site Assessment and Remediation Handbook*. CRC Press 2003; ISBN 978-1566705776.
6. Margesin R, Schinner F. *Manual for Soil Analysis - Monitoring and Assessing Soil Bioremediation*. Springer 2005; ISBN 9783540289043.
7. Weeraratna S. *Understanding Land Degradation An Overview*. Springer 2022 ISBN 978-30-311-2138-8.
8. Lavrishchev A, Saljnikov E, Eulenstein F, Mueller L. *Advances in Understanding Soil Degradation*. Springer 2021; ISBN 978-30-308-5682-3
9. Sun B, Liu M, Chen Y. *Soil Degradation, Soil Pollution and Ecological Restoration*. MDPI AG 2023; ISBN 978-30-365-8959-6.
10. Randall JE. *Soil Protection and Soil Improvement*. Creative Media Partners, LLC 2023; ISBN 978-10-219-3328-7