

## УТИЦАЈ КОРЕНОВОГ СИСТЕМА НА НАСТАНАК УНУТРАШЊИХ ЕРОЗИОНИХ ПРОЦЕСА

ГРОЗДАНА ГАЈИЋ

**Извод:** Биолошки “армирано”, у односу на референтно лесно тло показује промене, како у физичко-механичким карактеристикама, тако и код хидро-гео-механичких показатеља унутрашње ерозије. У циљу комплекснијег сагледавања проблема унутрашње ерозије битно је анализирати и утицај присуства коренивог система у земљишту на појаву и развој процеса унутрашње ерозије.

Како код референтног, тако и код биолошки “армираног” леса анализиран је проблем формирања математичких модела, на основу експериментално добијених резултата физичких особина тла и хидро-гео-механичких параметара, због успостављања функционе зависности између појединих параметара биолошки “армираног” лесног тла.

Формирани математички модели и успостављене функционе везе између водног режима и отпорних карактеристика земљишта, омогућили су сагледавање утицаја биолошког “армирања” на физичке и механичке особине земљишта.

**Кључне речи:** гео-статистика, корелисање, физика тла, хидро-гео-механички параметри, лес, биолошко “армирање”, унутрашња ерозија.

### EFFECT OF ROOT SYSTEM ON THE OCCURRENCE OF INTERNAL EROSION PROCESSES

**Abstract:** Biologically “reinforced” soil compared to reference loess shows the changes, both in physical-mechanical characteristics, and in hydro-geo-mechanical parameters of internal erosion. The complex study of the problem of internal erosion requires the analysis of the effect of root presence in the soil on the occurrence and development of internal erosion processes.

In both reference soil and in biologically “reinforced” loess, analysed the problem of mathematical modelling based on the experimental results of the soil physical properties and hydro-geo-mechanical parameters, in order to establish the functional dependence between individual parameters of biologically “reinforced” loess.

The mathematical models and the functional relations between water regime and the soil resistance characteristics enable the understanding of the effects of biological “reinforcement” on the soil physical and mechanical properties.

**Key words:** geo-statistics, correlation, soil physics, hydro-geo-mechanical parameters, loess, biological “reinforcement”, internal erosion.

## 1. УВОД И ЦИЉ РАДА

Истраживања која су предходила испитивањима који ће бити приказани у овом раду урађена су на узорцима лесног тла без присуства кореновог система, односно референтног лесног тла. Гео статистичком обрадом резултата ових истраживања дефинисани су параметри од којих зависи интензитет унутрашњих ерозионих процеса. Показатељи настанка и интензитета унутрашњих ерозионих процеса код референтног лесног земљишта

*Др Гроздана Гајић, доцент Шумарског факултета Универзитета у Београду*

та су параметри отпорности на смицање, угао унутрашњег трења и кохезија у функцији влажности, и градијенти филтрације подземне воде у функцији сувих запреминских маса, (Гајић Г., 2005).

Присуство кореновог система, односно његов раст и развој у макропорозној зони леса утиче на промену првобитне структуре. Раст и развој кореновог система нарушава првобитну макропорозност, као и цевасту порозност и због повећане локалне збијености утиче на смањење порозности. Смањење порозности указује на промене и осталих физичко-механичких параметара билошки "армираног" леса. Из тих разлога је извршено испитивање физичко-механичких карактеристика и хидро-гео-механичких параметара код биолошки "армираног" лесног тла, као и њихов утицај у погледу појаве и развоја процеса унутрашње ерозије.

Хипотеза од које се полази је да ће присуство биолошке компоненте у геоерозионом моделу терена утицати на промене физичко-механичких карактеристика земљишта, а самим тим и на промене хидро-гео-механичких показатеља настанка унутрашњих ерозионих процеса.

Основни циљ истраживања је дефинисање физичко-механичких особина код земљишта у ком је присутна биолошка компонента, односно у зони кореновог система. По дефинисању ових особина земљишта анализирани су критеријуми за настанак унутрашње ерозије код биолошки "армираног" лесног земљишта. Поред испитивања физичко-механичких и филтрационих особина тла, испитани су и градијенти филтрације подземне воде, као показатељи настанка унутрашње ерозије и течења тла. Механизам настанка унутрашње ерозије условљен је различитим чиниоцима који делују на промену: напонског стања, физичко-механичких карактеристика и водног режима, ерозијом ангажованог земљишта, (Тодоровић, Т.; Гајић Г., 1997). У зависности од промена ових параметара, зависи степен и облик унутрашње ерозије код леса. Потврда ових зависности код биолошки "армираног" лесног земљишта биће дефинисана кроз приказане резултате у овом раду.

## **2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДА РАДА**

### **2.1. Порекло материјала**

Лесно земљиште које је испитивано и анализирано у овом раду је са подручја познатог под називом "земунски лесни плато"- горњи Земун. Земунски лесни плато просторно обухвата горњи Земун, Батајницу, Сурчин, Добановце, Угриновце и укупне је површине око 20 000 хектара. Земунски лесни плато има благо заталасану површину чије се апсолутне коте крећу од 75÷114 m. Ободни делови платоа према Дунаву и Сави завршавају одсецима висине 20÷30 m, (Гајић Г., 2005). Површински слој је хумифициран и обрастао дрвенастим и жбунастим врстама. На неким деловима при ободу платоа према Дунаву и Сави почело је природно успостављање биоценоза неких аутохтоних жбунастих врста, (слика 1). Све ово је омогућило узимање узорака из зоне кореновог система, за даља лабораторијска испитивања.



Слика 1- Лесни одсек на десној сїрани Дунава код Земун  
Figure 1 - Loess section on the right bank of the Danube near Zemun

Лесну серију чине пет хоризоната леса, који су међусобно раздвојени са четири хоризонта погребене земље. Дебљина лесних наслага је најчешће  $15 \div 20$  m а у ободним деловима платоа и до 35 метара. У комплексу лесних наслага формирана је сложена издан етажног типа. Сложеност се огледа у условима формирања, дубини појављивања и начину прихрањивања изданске зоне. Лесне насlage, испитиваног терена одликују се сложеним типом порозности: цеваста, међузрнска и пукотинска. Овако сложена структура порозности лесног комплекса омогућава формирање издани. Надизданска зона је веома променљиве дебљине и директно зависи од конфигурације терена и висине зоне колебања издани. Осим “лебдећих” издани у надизданској зони, после падавина постоји и “лутајућа” слободна вода, која се веома брзо процеђује у издан. На контакту са издани постоји изражен појас капиларног пењања (Гајић Г., 2005).

## 2.2. Метод рада

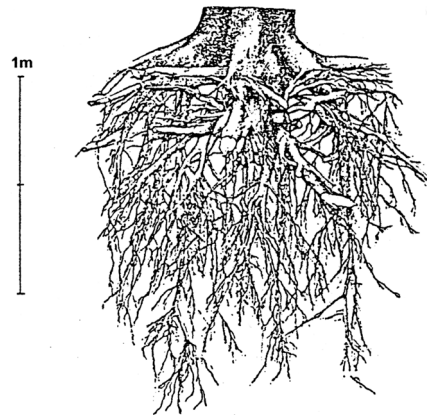
Циљ истраживања биолошки "армираног" лесног тла и приказ резултата овог рада је да се кроз анализу добијених резултата дође до количине утицаја кореновог система на промене физичко-механичких и хидро-геомеханичких параметара земљишта, а самим тим, и настанка унутрашње ерозије и течења тла. Анализирање унутрашње ерозионе стабилности извршиће се увођењем градијената филтрације подземне воде, сувих запреминских маса, влажности и параметара отпорности на смицање код биолошки "армираног" лесног земљишта.

Утицај биолошке компоненте на настанак унутрашњих ерозионих процеса, који се приказује у овом раду, односи се на утицај кореновог система у геоерозионом моделу терена. У циљу тачнијих и свеобухватнијих анализа количине утицаја кореновог система на побољшање геоерозионих карактеристика тла, неопходно је уважавање морфолошких и физичких особина коренових система. Формирање кореновог система, већа или мања маса главних, скелетних, секундарних, и фиброзних жила зависи у

великој мери од земљишних услова (дубина, механички састав, аерација, плодност, влажност и сл.). Критеријум на основу којег је извршена анализа количине утицаја кореновог система на унутрашње ерозионе процесе је основни критеријум морфолошке поделе кореновог система код дрвенастих и жбунастих врста на основу формирања главног корена. Поштујући ову поделу извршена је и анализа утицаја плитког површинског кореновог система, срцастог кореновог система и дубоких срчаница на настанак ерозионих процеса. Наведена три основна морфолошка облика кореновог система, се појављују на истраживаном геоерозионом моделу терена и сваки од њих даје допринос повећању фактора стабилности у погледу настанка и развоја унутрашњих ерозионих процеса.



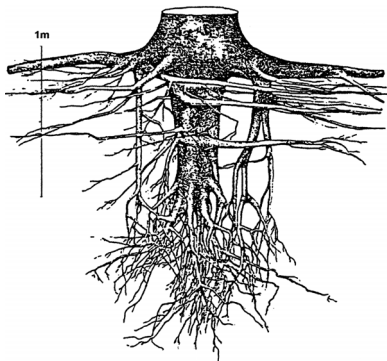
Слика 2



Слика 3

**Плитким** - тањурастим кореновим системом постиже се, најчешће, “мрежно био-армирање” (слика 2), плитког површинског дела профила (нпр. *Fraxinus excelsior*), При избору дрвенастих врста са плитким кореновим системом треба узети у обзир утицај дејства ветра на њихово изваљивање (*Picea abies*), као и могуће последице ветро-извала на падинама. Код заштитних појасева, дрвеће као и жбуње са плитким кореновим системом углавном треба користити у зонама међу простора дубоких коренових система, односно “био-шипова”. На овај начин, биолошки “армирано” земљиште постаје компактна маса у зони између “био-шипова” (дубоких коренових система са израженом срчаницом), чиме се постиже већи степен стабилности падина, (Гајић Г. 1994).

**Срцаст коренов систем** - његово присуство на гео-ерозионом профилу, (нпр. *Pseudotsuga taxifolia*), чини да тло буде густо прожето испреплетаним скелетним, секундарним и фиброзним жилама, на већој дубини и да се понаша попут армиране масе (слика 3). Срцастим кореновим системом се, у ствари, постиже својеврсно “био-армирања” на већој дубини. “Био-армирање”, срцастим кореновим системом, знатно утиче на смањење, па чак и елиминисање процеса унутрашње ерозије код лесног земљишта, стварајући при том, специфичну, кохерентну биолошки армирану масу (Гајић Г. 1994).



Слика 4

срчанице који има разгранату морфологију развоја (*нпр. Abies alba*), у анализи стабилности и отпорности на ерозију се представља анкерисана група “био-шипова” (Гајић Г. 1994).



Слика 5 Биолошки “армирано”  
лесно земљиште

Figure 5 Biologically “reinforced”  
loess soil

**Коренив систем са израженом срчаницим** - посматрано са ерозионо геотехничких услова, модел терена на коме се налази стабло са израженом срчаницом (*нпр. Pinus silvestris*), може се анализирати, са аспекта стабилности и отпорности конкретног модела на ерозију, као ламела ерозионе масе са појединачним шипом, односно анкерисаним “био-шипом”, (слика 4). Присутни појединачни “био-шипови”, уз одређен распоред у зони утицаја преузимају одређене хоризонталне силе активног земљиног притиска. Они на тај начин мењају укупно напонско стање на падини и утичу на повећање отпорних карактеристика тла. Коренов систем

Испитивање физичко-механичких особина земљишта са присуством кореновог система је, због лабораторијских услова испитивања, ограничен на узорке земљишта са секундарним и фиброзним жилама. За испитивање физичко-механичких карактеристика земљишта на узорцима са присутном биолошком компонентом - кореновим системом, формирану су узорци који имају сплет кореновог система. Маса кореновог система у узорку, у односу на укупну масу узорка, је у границама 10 ÷ 20%. Експериментално добијене вредности параметара на основу изложеног критеријума и њихов утицај на унутрашњу ерозију тестирали су кроз комплетну регресиону анализу. Резултати регресионе анализе и оцена практичности утицаја биолошке компоненте приказана је у овом раду.

### 2.3. Тип испитивања и меродавни распони испитиваних параметара земљишта

Тип испитивања и одређивања вредности физичко-механичких параметара и хидро-гео-механичких показатеља код биолошки “армираног” лесног тла, поштујући описану методологију, извршено је истим поступком као код референтног, (без присуства кореновог система), лесног тла.

Утицај биолошке компоненте је регистрован код вредности порозности, запреминских маса, водопропустљивости и параметара отпорности на смицање. Односно, код наведених физичко-механичких карактеристика су добијени повољнији резултати, тј. регистрована је смањена порозност и водопропустљивост, а повећане су вредности запреминских маса и параметара отпорности на смицање. С обзиром да су вредности физичко-механичких карактеристика референтног леса већ приказане (Гајић Г., 2005) у оквиру овог рада биће приказане само физичко-механичке карактеристике где су регистроване промене због присуства кореновог система.

### Порозност

Укупна порозност макропорозне зоне леса се креће у границама од  $34 \div 53\%$  (46,96), док је коефицијент порозности  $0.56 \div 1.35$ , са средњом вредности од 0.875 (Гајић Г., 2005). Присуство кореновог система, односно његов раст и развој, у површинској зони лесног земљишта утиче на промену првобитне структуре. Раст и развој кореновог система нарушава првобитну порозност, и због повећане локалне збијености утиче и на смањење цевасте порозности и макро порозности. Испитиване вредности укупне порозности код биолошки “армираног” лесног тла су  $30 \div 43\%$  (41,71), са коефицијентом порозности од  $0.46 \div 1.1$ .

### Запреминске масе

Како код референтног, тако и код биолошки “армираног” лесног тла веома битан показатељ промене физичких особина су запреминске масе. Вредности запреминских маса, код референтног лесног тла су у распону од ~~15,80~~  $kN/m^3$  (17,85), односно ~~14,60~~  $kN/m^3$  (14,60), (Гајић Г., 2005). Испитивани биолошки “армирани” лес, у односу на референтни, је показао веће вредности запреминске масе природно влажног узорка које су у распону од ~~15,80~~  $kN/m^3$ , односно, сувог ~~14,60~~  $kN/m^3$ .

### Водопропустљивост

Водопропустљивост прашинастих пескова у директној је зависности од сопствених физичких карактеристика и од вискозитета течности и других хидрофизичких показатеља. Физичке карактеристике које условљавају, како количину, тако и тип и карактер водопропустљивост у лесним земљиштима су: порозност, збијеност и гранулометријски састав са степеном неравномерности (Гајић Г., 2005). С обзиром на већ приказане промене порозности и запреминских маса референтног и биолошки “армираног” лесног тла, логично је очекивати и промене у водопропустљивости код биолошки “армираног” у односу на референтно тло. Одређивање водопропустљивости код узорака са присутним деловима кореновог система урађени су лабораторијским поступком као и за референтно тло. Добијени су коефицијенти филтрације  $2.1^{-06} \div 4.9^{-04}$  cm/sec., док је средња вредност коефицијента филтрације  $3.68^{-04}$  cm/sec.

### Отпорне карактеристике

Један од најважнијих механичких параметара тла је чврстоћа на смицање. Елементи унутрашњег отпора земљишта, односно параметри отпорности на смицање су угао унутрашњег трења и кохезија. На вредности параметра отпорности на смицање, код лесног земљишта, утичу хетерогеност састава, садржај глине и прашине, порозност и збијеност, као и његов садржај воде. Обзиром да се у условима повећане влажности и водозасићења могу очекивати промене у наведеним физичким особинама, долази и до промене параметара отпорности на смицање, а поготово у условима водозасићења и деловања филтрационо струјног тока, референтног тла (Гајић Г., 2005). Биолошки “армирано” лесно тло је карактеристично по мањој порозности, већим запреминским масама и повећаној збијености, у односу на референтно, што доводи и до већих вредности параметара отпорности на смицање. Добијени резултати се крећу у границама:  $\sigma_B = 19^\circ$ , и  $c_B = 18,2$  kN/m<sup>3</sup> (18,2).

### 3. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И ЊИХОВА АНАЛИЗА

Идентично референтном лесу, и код биолошки “армираног” леса испитивање је ишло у два правца. Један правац је био испитивање осетљивости промена физичких и отпорних карактеристика биолошки “армираног” лесног тла са променом влажности, односно садржајем воде у тлу. Други правац је испитивање хидро-гео-механичких параметара унутрашње ерозије и њихова промена у односу на промену сувих запреминских маса биолошки “армираног” лесног тла. Комплексна лабораторијска испитивања су извршена на 48 узорка са присутним деловима кореновог система. Практични значај резултата ових испитивања је омогућила примена геостатистичких метода у коначној анализи. Геостатистичке методе и компаративна анализа су омогућили приказ ефеката биолошког “армирања” на појаву и развој процеса унутрашње ерозије.

Обзиром да раст и развој кореновог система у лесном тлу проузрокује нарушавање структуре и смањење порозности, односно повећање локалне збијености логично је очекивати и промене параметара отпорности на смицање. Како је угао унутрашњег трења и кохезија један од основних показатеља отпорности тла извршена су експериментална испитивања промене ових параметара у функцији промене влажности (Гајић Г., 2000). Испитано је укупно 48 узорка биолошки “армираног” леса, а резултати ових испитивања су приказани у табели 1. Циљ приказаних експериментално добијених резултата је процена меродавних вредности и успостављање функционе везе  $\sigma_B = f(\psi)$  и  $c_B = f(\psi)$ .

На 48 узорка биолошки “армираног” лесног тла извршена су мерења почетне - иницијалне унутрашње ерозије и преласка у стање течења у моменту слома услед прекорачења граничних услова отпорности тла при деловању филтрационо струјног тока. Параметри који су на овај начин добијени јесу критични градијент  $J_{\mu_B}$  у моменту почетка померања честица - унутрашње ерозије, и критични градијент  $J_{t_B}$  при пластичном течењу макпорозног лесног тла. У табели 2 дате су вредности резултата добијених експерименталним испитивањем лесног земљишта са присутним деловима кореновог система.

Табела 1 Експериментално добијене вредности отпорних карактеристика биолошки "армираног" лесног гла  
 Table 1 Experimental values of resistance characteristics of biologically "reinforced" loess

Н°	$\gamma_d$ (кН/м <sup>3</sup> )	W (%)	$n_B$ (%)	$\angle\phi_B$ (°)	$c_B$ (кН/м <sup>2</sup> )	Н°	$\gamma_d$ (кН/м <sup>3</sup> )	W (%)	$n_B$ (%)	$\angle\phi_B$ (°)	$c_B$ (кН/м <sup>2</sup> )	Н°	$\gamma_d$ (кН/м <sup>3</sup> )	W (%)	$n_B$ (%)	$\angle\phi_B$ (°)	$c_B$ (кН/м <sup>2</sup> )
1	15.8	9.5	39.2	22	21.0	17	15.3	17.6	41.1	21	19.9	33	14.5	25.0	44.2	19	18.5
2	15.9	10.0	38.8	24	18.6	18	15.0	20.2	42.3	20	19.8	34	12.8	25.5	50.7	15	13.8
3	14.8	11.2	43.1	20	23.3	19	14.8	18.9	43.1	19	17.9	35	16.8	12.0	35.4	25	24.0
4	15.5	11.8	40.4	22	20.4	20	14.6	22.0	43.8	19	18.0	36	15.6	6.6	40.0	21	20.6
5	15.4	13.0	40.7	21	20.8	21	14.2	21.5	45.4	18	16.8	37	16.4	14.0	36.9	24	18.6
6	15.7	14.2	39.6	22	20.3	22	14.2	23.6	45.4	18	17.0	38	16.5	11.0	36.5	23	18.0
7	14.8	15.5	43.1	21	19.8	23	13.9	23.0	46.5	17	16.0	39	14.3	9.0	45.0	19	22.5
8	15.2	18.2	41.5	20	19	24	13.8	26.2	46.9	17	16.2	40	16.0	16.4	38.4	22	21.2
9	14.5	20.6	44.2	19	17.8	25	13.3	27.0	48.8	15	14.0	41	15.9	19.0	38.8	22	21.6
10	13.05	22.8	44.9	18	16.7	26	13.5	30.0	48.1	15	13.5	42	14.1	16.4	45.7	18	16.8
11	14.0	24.7	46.1	17	16	27	13.0	32.0	50.0	13	14.0	43	14.0	28.4	46.1	17	16.2
12	13.4	26.9	48.4	16	15.2	28	15.0	13.5	42.3	23	20.0	44	14.5	18.0	44.7	18	17.0
13	13.5	28.4	48.1	15	14.5	29	14.4	15.5	44.6	18	17.5	45	13.2	28.4	49.2	13	13.0
14	13.3	29.6	48.8	14	14.0	30	15.5	20.4	40.4	21	20.5	46	13.6	24.0	47.7	16	18.2
15	12.6	34.2	51.5	13	13.2	31	14.7	14.4	43.5	20	22.5	47	14.6	13.0	43.8	19	22.0
16	15.3	16.0	41.1	20	19.4	32	13.5	20.6	48.1	16	15.0	48	16.9	16.6	35.0	24	22.5

ЛЕГЕНДА

$\gamma_d$  - сува запреминаска маса  $n_B$  - укупна порозност  $c_B$  - кохезија  $W$  - природна влажност  $\angle\phi_B$  - угао унутрашњег трења



Табела 2. Експериментално добијене вредности показатеља унутрашње ерозије код биолошки "армираног" лесног земљишта  
 Table 2. Experimental values of internal erosion parameters in biologically "reinforced" loess

H°	$\gamma_d$ ( $\text{gH/m}^3$ )	$n_B$ (%)	$Kf_B$ ( $\text{cm/g}$ )	$Jm_B$ (/)	$Ite_B$ (/)	H°	$\gamma_d$ ( $\text{gH/m}^3$ )	$n_B$ (%)	$Kf_B$ ( $\text{cm/g}$ )	$Jm_B$ (/)	$Ite_B$ (/)	H°	$\gamma_d$ ( $\text{gH/m}^3$ )	$n_B$ (%)	$Kf_B$ ( $\text{cm/g}$ )	$Jm_B$ (/)	$Ite_B$ (/)	H°	$\gamma_d$ ( $\text{gH/m}^3$ )	$n_B$ (%)	$Kf_B$ ( $\text{cm/g}$ )	$Jm_B$ (/)	$Ite_B$ (/)
1	15.8	39.2	$1.5 \times 10^{-5}$	0.01	8.7	13.0	17	15.3	41.1	$4.4 \times 10^{-5}$	0.012	7.6	33	14.5	44.2	$1.1 \times 10^{-4}$	0.015	7.5	9.3				
2	15.9	38.8	$2.5 \times 10^{-5}$	0.009	9.8	14.1	18	15.0	42.3	$8 \times 10^{-5}$	0.013	8.3	34	12.8	50.7	$9.6 \times 10^{-4}$	0.022	5.2	7.7				
3	14.8	43.1	$1.2 \times 10^{-4}$	0.014	9.5	12.0	19	14.8	43.1	$9.2 \times 10^{-5}$	0.014	7.8	35	16.8	35.4	$5 \times 10^{-6}$	0.005	11.9	16.8				
4	15.5	40.4	$3.5 \times 10^{-5}$	0.011	8.7	13.5	20	14.6	43.8	$1.7 \times 10^{-4}$	0.015	8.0	36	15.6	40.0	$4 \times 10^{-5}$	0.011	9.5	13.3				
5	15.4	40.7	$5 \times 10^{-5}$	0.011	8.0	12.7	21	14.2	45.4	$2.3 \times 10^{-4}$	0.016	6.3	37	16.4	36.9	$1.6 \times 10^{-6}$	0.007	10.7	15.1				
6	15.7	39.6	$2.7 \times 10^{-5}$	0.01	9.1	12.7	22	14.2	45.4	$9 \times 10^{-4}$	0.016	6.8	38	16.5	36.5	$4.5 \times 10^{-6}$	0.008	10.9	15.0				
7	14.8	43.1	$5.5 \times 10^{-4}$	0.014	7.1	11.0	23	13.9	46.5	$3.5 \times 10^{-4}$	0.017	5.6	39	14.3	45.0	$1.5 \times 10^{-4}$	0.016	7.6	10.1				
8	15.2	41.5	$6.2 \times 10^{-5}$	0.012	7.0	11.3	24	13.8	46.9	$1 \times 10^{-4}$	0.019	6.0	40	16.0	38.4	$1 \times 10^{-5}$	0.009	11.1	13.7				
9	14.5	44.2	$1.5 \times 10^{-4}$	0.015	6.7	10.0	25	13.3	48.8	$6 \times 10^{-3}$	0.02	5.5	41	15.9	38.8	$1.5 \times 10^{-5}$	0.01	8.2	12.8				
10	13.05	44.9	$4 \times 10^{-4}$	0.022	5.0	7.6	26	13.5	48.1	$5.1 \times 10^{-4}$	0.021	5.4	42	14.1	45.7	$2 \times 10^{-4}$	0.016	6.5	9.3				
11	14.0	46.1	$1.4 \times 10^{-4}$	0.017	6.9	9.9	27	13.0	50.0	$1 \times 10^{-3}$	0.022	4.0	43	14.0	46.1	$2.5 \times 10^{-4}$	0.017	8.0	11.5				
12	13.4	48.4	$7.1 \times 10^{-4}$	0.02	6.0	8.5	28	15.0	42.3	$3 \times 10^{-5}$	0.013	8.0	44	14.5	44.7	$1 \times 10^{-4}$	0.015	5.5	8.4				
13	13.5	48.1	$8.5 \times 10^{-4}$	0.02	6.0	8.9	29	14.4	44.6	$1.1 \times 10^{-4}$	0.015	7.0	45	13.2	49.2	$7.3 \times 10^{-4}$	0.021	6.4	7.3				
14	13.3	48.8	$7.3 \times 10^{-4}$	0.02	4.7	7.0	30	15.5	40.4	$5 \times 10^{-4}$	0.011	8.9	46	13.6	47.7	$6.9 \times 10^{-4}$	0.019	7.0	9.8				
15	12.6	51.5	$1 \times 10^{-3}$	0.024	4.2	6.8	31	14.7	43.5	$8.5 \times 10^{-5}$	0.014	6.0	47	14.6	43.8	$9 \times 10^{-5}$	0.015	7.2	10.8				
16	15.3	41.1	$4.5 \times 10^{-5}$	0.012	8.5	12.0	32	13.5	48.1	$8 \times 10^{-4}$	0.02	4.3	48	16.9	35.0	$1.2 \times 10^{-6}$	0.005	12.4	17.8				

ЛЕГЕНДА

$\gamma_d$  - сува запреминаска маса

$n_B$  - укупна порозност

$Kf_B$  - коефицијент филтрације

$Jm_B$  - индекс точева

$Ite_B$  - градијент при настанку унутрашње ерозије

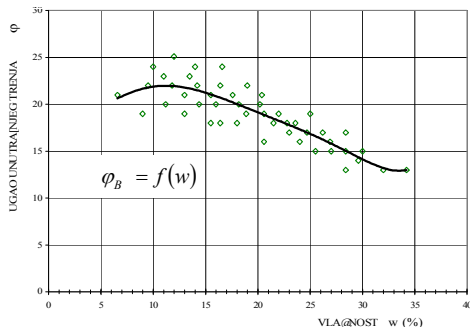
$I_B$  - градијент при настанку течева гла

### 3.1. Промена параметара отпорности у функцији промене влажности код биолошки "армираног" лесног тла

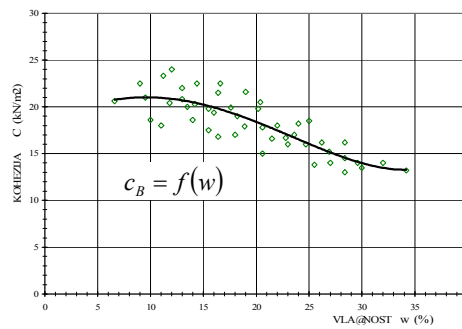
На основу експериментално добијених резултата формиран су математички модели и извршено је тестирање веза кроз комплексну регресиону анализу. Утврђена је функционална веза  $\varphi_B = f(w)$ . Математички модел са регресионом кривом приказан је на слици 6. Полином VI-степен који даје функциону везу  $\varphi_B = f(w)$  има регресиону једначину:

Са показатељима:

Коефицијент корелације	0.915	Ф-тест	23.072
Коефицијент детерминације	0.837	Стандардна грешка процене	0.085



Слика 6.



Слика 7

Промене кохезије у зависности од количине влажности су такође анализирани геостатистичким методама (слика 7). Утврђена је функционална веза  $c_B = f(w)$ . Полином IV-степен који даје функциону везу  $c_B = f(w)$  има регресиону једначину:

Са показатељима:

Коефицијент корелације	0.859	Ф-тест	20.435
Коефицијент детерминације	0.738	Стандардна грешка процене	0.141

На основу успостављених корелационих веза  $\varphi_B = f(w)$  и  $c_B = f(w)$  може се закључити да биолошки "армирани" лес при садржају влажности од  $w_{15\%}$  достиже максималну вредност угла унутрашњег трења од  $\varphi_B \approx 22^\circ$  док се минимална вредност угла унутрашњег трења од  $\varphi_B \approx 13^\circ$  постиже при садржају влажности од  $w_{35\%}$ . Максимална вредност кохезије од  $c_B \approx 20 \text{ kN/m}^2$  се постиже при влажности од  $w_{10\%}$ , минимална вредност кохезије од  $c_B \approx 10 \text{ kN/m}^2$  је при садржају влажности од  $w_{35\%}$ . Интере-

сантно је истаћи и податак, евидентан праћењем тока развоја регресионе криве, а то је да се и при мањим вредностима влажности од  $w_{15\%}$  примећује опадање вредности угла унутрашњег трења. Веома идентична ситуација је и код регресионе криве везане за кохезију, с тим што вредност кохезије почиње да опада при смањењу садржаја влажности од  $w_{15\%}$ .

Може се закључити да су успостављене јаке функционе везе са високим вредностима регресионих показатеља, и да добијени резултати и анализе имају практични значај у проучавању унутрашње ерозије код биолошки "армираног" лесног тла.

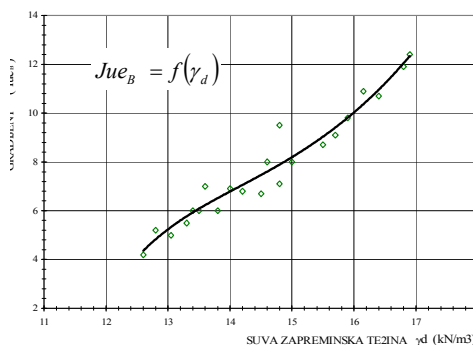
### 3.2. Промена хидро-гео-механичких параметара унутрашње ерозије у функцији промене сувих запреминских тежина код биолошки „армираног“ леса

С обзиром да код биолошки "армираног" лесног тла, у односу на референтно, долази до поремећаја структуре и смањења укупне порозности долази и до промена хидро-гео-механичких параметара иницијалне унутрашње ерозије. Анализиране су вредности градијента при настанку процеса унутрашње ерозије ( $J_{e_B}$ ) и вредности градијента при настанку течења тла ( $J_{t_B}$ ) у функцији промене показатеља физичких особина лесног тла ( $\gamma_d$ ). По формирању математичких модела на основу експериментално добијених вредности  $J_{e_B}$  и  $J_{t_B}$  тестирана је веза ових показатеља унутрашње ерозије и физичких особина тла, односно сувих запреминских маса биолошки "армираног" лесног тла. Утврђена је функциона веза  $J_{e_B} = f(\gamma_d)$ . Математички модел са регресионом кривом приказан је на слици 8. Полином V-степенa који даје функциону везу  $J_{t_B} = f(\gamma_d)$  има једначину:

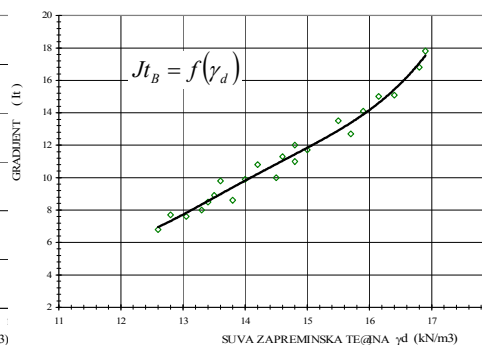


Са показатељима:

Коефицијент корелације	0.981	Ф-тест	80.82
Коефицијент детерминације	0.962	Стандардна грешка процене	0.019



Слика 8



Слика 9

Промене градијента течења тла ( $J_R$ ) у функцији промене сувих запреминских маса ( $\gamma_d$ ) су такође испитиване геостатистичким методама (слика 9). Утврђена је функциона веза  $J_R = f(\gamma_d)$ , Полином V-степенa који даје функциону везу  $J_R = f(\gamma_d)$  има једначину:

Са показатељима:

Коефицијент корелације	0.992	Ф-тест	209.19
Коефицијент детерминације	0.985	Стандардна грешка процене	0.01

На основу успостављених корелационих веза  $J_R = f(\gamma_d)$  и  $J_B = f(\gamma_d)$  може се закључити да биолошки "армирани" лес при сувој запреминској маси од  $27.15 \text{ kN/m}^3$  је много осетљивији на настанак унутрашње ерозије и течења, односно потребни су градијенти реда величине 6÷8, у односу на градијенте када су суве запреминске масе  $27.15 \text{ kN/m}^3$ , под условом да не дође до порног притиска у биолошки "армираном" лесном тлу. У условима успостављања и трајања порног притиска влада друго напонско стање на чврсте честице тла, па филтрациона сила нема толики утицај на померање чврсте честице, односно градијент нема значајнијег утицаја, по слабљењу порног притиска поново се успоставља напонско стање као и пре настанка порног притиска.

На основу изложених резултата може се закључити да су успостављене јаке функционе везе са високим вредностима регресионих показатеља, и да добијени резултати и анализе имају практични значај у проучавању унутрашње ерозије код биолошки "армираног" лесног тла.

#### 4. ЗАКЉУЧАК

На основу приказаних експерименталних испитивања физичко-механичких карактеристика, а посебно отпорних карактеристика и хидро-геомеханичких параметара - иницијалне унутрашње ерозије и течења биолошки "армираног" лесног тла, и њиховом обрадом математичким методама геостатистике може се закључити да:

1) Биолошки "армирани" лес показује већи степен отпорних карактеристика (угао унутрашњег трења и кохезија), у односу на исто референтно тло у условима промене влажности за 20-30%.

2) Како код референтног, тако и код биолошки "армираног" лесног тла резултати експерименталних испитивања почетне - иницијалне унутрашње ерозије и течења тла доведени су у функциону везу са сувим запреминским масама уз висок степен корелационе зависности. Ефекти "биолошког армирања" имају позитиван тренд, односно, потребни су већи градијенти за настанак почетне - иницијалне ерозије и течења тла. Успостављене корелационе зависности: отпорних карактеристика и влажности, као и зависности хидрауличких градијената ( $J_{Me}$ ) и ( $J_I$ ) и сувих запреминских маса омогућавају рационалност у истраживању и испитивању унутрашње дубинске ерозије у оквиру биолошки "армираних" лесних наслага.

## 5. ЛИТЕРАТУРА

- Гајић Г. (1994): “Утицај физичко-механичких карактеристика земљишта на појаву и развој процеса дубинске ерозије” магистарски рад одбрањен на Шумарском факултету у Београду.
- Гајић Г. (2000): “Утицај отпорности земљишта на степен активизације дубинске ерозије” докторска дисертација одбрањена на Шумарском факултету у Београду
- Todorović T.; Gajić G. (1996): "Application of the method of erosion-control soil engineering in the study of the mechanism of landslides and sanation of terrain", First European Conference and Trade Eposition on Erosion Control, Barcelona, may 29-31.
- Todorović,T.; Gajić G. (1997): “Applications geotevhnical approach to structures on macr-oporous loess soil”, APCOM '97 - Symposium on computers applications and operations rese-arch in the mineral industries, 2<sup>nd</sup> Regional, Mosco state Mining University, Mosco, Russia, August 24-28.
- Славјанов В.Н., Фандеева В.И., (1963): “Инженерно геологические процеси и јавленија их значение дља строитеелства”, Госстеојиздат, Москва.
- Влаховић М., (1977): “Прилог проучавању процеса филтрације и консолидације нормално консолидованих тла”, Докторска дисертација, одбрањена на Рударско Геолошком факултету.
- Гајић Г., (2005): "Иницијални показатељи настанка унутрашњих ерозионих процеса" “Шумарство”, Часопис за шумарство, прераду дрвета, пејзажну архитектуру и заштиту од ерозије, бр. 3, Београд 2005. године, YU ISSN 0350-1752, UDK 630, COBISS.SR-ID 39008263, стр. 117-129.

Grozdana Gajić

## Summary

The aim of the study is to define the physical-mechanical properties of the soil with the presence of the biological component, i.e. in the root zone. Based on the defined soil properties, the criteria of internal erosion in biologically "reinforced" loess soil are also analyzed. Along with the study of the soil physical-mechanical and filtration properties, the gradients of groundwater filtration are studied as the parameters of the occurrence of internal erosion and soil flow. The mechanism of internal erosion is conditioned by different factors which affect the changes of stress notation, physical-mechanical characteristics and water regime of the eroded soil. The degree and the form of internal erosion in loess soils depend on the changes of the above parameters.

Because of the laboratory conditions, the study of physical-mechanical properties of the soil with the presence of roots is limited to soil samples with secondary and fibrous roots. The samples with a network of root system are formed for the research of the soil physical-mechanical characteristics of the samples with the biological component – roots.

The physical-mechanical parameters and hydro-geo-mechanical parameters in biologically "reinforced" loess are studied and determined, by the above methodology, by the same procedure as the reference loess (without the presence of the roots). The effect of the biological component is recorded in the value of porosity, density, permeability and parameters of shearing resistance.

The study of both reference loess and biologically "reinforced" loess developed in two directions. One direction is the study of susceptibility of the change of physical and resistance characteristics of the biologically "reinforced" loess to the change of moisture content in the soil. The other direction is the study of hydro-geo-mechanical parameters of internal erosion and their change depending on the change of dry density of biologically "reinforced" loess.

Based on the correlation  $\varphi_R = f(w)$  and  $c_B = f(w)$ , it can be concluded that biologically "reinforced" loess at moisture content  $w_{15}\%$  reaches the maximal value of the angle of repose of  $\varphi_R \approx 22^\circ$  while the minimal value of the angle of repose of  $\varphi_R \approx 13^\circ$  is attained at moisture content  $w_{30}\%$ . The maximal value of cohesion  $c_B \approx 25 \text{ kN/m}^2$  is attained at moisture content  $w_{30}\%$ , the minimal value of cohesion  $c_B \approx 10 \text{ kN/m}^2$  is attained at moisture content  $w_{15}\%$ . It should be pointed out that in the regression curve development, even at the values of moisture contents lower than  $w_{15}\%$ , the value of the angle of repose decreases. The identical situation occurs in the regression curve for cohesion, but the value of cohesion starts to decrease at the decrease of moisture content of  $w_{15}\%$ .

Based on the correlation  $J_{eB} = f(\gamma_d)$  and  $J_t = f(\gamma_d)$ , it can be concluded that biologically "reinforced" loess at the dry density  $\gamma_d \approx 1.6 \text{ t/m}^3$  is much more susceptible to the initiation of internal erosion and soil flow, i.e. the necessary gradients are 6-8, compared to the gradients when dry density is  $\gamma_d \approx 1.8 \text{ t/m}^3$ , under the condition that there is no internal pressure in the biologically "reinforced" loess. In the conditions of internal pressure, the other stress notation occurs on solid particles, so the filtration force does not have a high effect on the movement of solid particles, i.e. the gradient has not a major effect, after the decrease of the internal pressure, the stress notation is established again, just as before the occurrence of the internal pressure.

In both reference soil and biologically "reinforced" loess, the experimental study results of initial internal erosion and soil flow are correlated with dry density, with a high degree of correlation. The effects of "biological reinforcement" have a positive trend, i.e. greater gradients are necessary for the initial erosion and soil flow. The correlation of resistance characteristics and moisture content, as well as of hydraulic gradients ( $J_{eB}$ ) and ( $J_t$ ), and dry density, enable the rationality of research and study of internal deep erosion in biologically "reinforced" loess deposits.