

UDK: 624.131.23+631.42/.43
Оригинални научни рад
DOI: 10.2298/GSF1614045G

ПОКАЗАТЕЉИ И МЕХАНИЗАМ ДЕГРАДАЦИЈЕ КОД ЛЕСНОГ ЗЕМЉИШТА

Др Гроздана Гајић, редовни професор, Универзитет у Београду - Шумарски факултет (grozdana.gajic@sfb.bg.ac.rs)
Никола Живановић, асистент, Универзитет у Београду - Шумарски факултет
Лука Вукић, Faculty of Geo-informamtion Science and Earth Observation of the University of Twente

Извод: Истраживања која су приказана у овом раду извршена су због дефинисања критеријума за настанак деградације код лесног земљишта. Анализирање ерозионе стабилности код овог земљишта извршиће се на основу његових физичко-механичких карактеристика. У раду је помоћу формираних математичких модела, на основу експериментално добијених резултата физичко-механичких карактеристика земљишта, приказана успостављена зависност између појединих параметара лесног земљишта. На бази приказаних геотехничких резултата испитивања, математичких модела и успостављене функционе везе између водног режима и отпорних карактеристика лесног земљишта, дефинисани су показатељи и механизам настанка унутрашње ерозије, и сагледани су ефекти практичне примене добијених резултата.

Кључне речи: лесно земљиште, физика земљишта, математичко моделирање, гео-статистика, показатељи и механизам настанка ерозионих процеса

УВОД

Истраживања која су претходила анализи која ће бити приказана у овом раду урађена су на узорцима земљишта са подручја познатог као „Стишка долина“. Гео-статистичком обрадом резултата ових истраживања дефинисани су параметри од којих зависи интензитет ерозионих процеса. Показатељи настанка и интензитета ерозионих процеса код лесног земљишта су параметри отпорности на смицање, угао унутрашњег трења и кохезија у функцији влажности, и показатељи деформабилности у функцији сувих запреминских тежина (*Miljanović I., Gajić G., 2011*).

Основни циљ истраживања је дефинисање физичко-механичких особина код лесног земљишта. Поред испитивања физичко-механичких особина земљишта, испитана је и дефор-

мабилност, као показатељи настанка и развоја механизма ерозије земљишта. Механизам настанка ерозије условљен је различитим чиниоцима који делују на промену: напонског стања, физичко-механичких карактеристика и водног режима, ерозијом ангажованог земљишта, (*Todorović T.; Gajić G., 1997*). У зависности од промена ових параметара, зависи степен и облик ерозије код леса.

МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Порекло материјала

Лесно земљиште које је анализирано у овом раду је са подручја Пожаревца и Костол-

ца, познатог под називом “СТИШКА ДОЛИНА”. Лесни плато у овом подручју сачињава саме обале и широке речне терасе реке Дунава и Млаве, има благо заталасану површину чије се апсолутне коте крећу од 70 *m.n.m.* на обалама Дунава и Млаве, до 170 *m.n.m.* на Лештару. Доминантни облици ерозије земљишта на заравнима речних тераса су унутрашњи ерозиони процеси, док су на падинама Лештара, поред унутрашњих, присутни и интензивни површински облици ерозије. Поред описаних, на овим просторима су карактеристични и облици деградације речних обала и косина површинских ископа који су такође настали и/или формирани у лесу. Стабилност, и обала и косина такође су условљени физичко-механичким променама при водозасићењу и деловању филтрационих сила у лесној средини, (Vujić S. et.al 2011).

Са овог подручја је узет 47 непоремећени узорак лесног земљишта. Узорци су испитани у лабораторијским условима према прописаним стандардима из групаације СРПС - У.Б1., на катедри за противерозиону геотехнику на Шумарском факултету у Београду.

Метод рада

Методе рада при изучавању лесног земљишта су теренски истражни радови и лабораторијско испитивање. Теренски истражни радови су обухватили узимање непоремећених узорака. Лабораторијским испитивањима узетих непоремећених узорака су одређени физичко-механички и деформабилни параметри. Метод који је примењен има за циљ да се кроз анализу добијених резултата дође до квантитативних показатеља утицаја физичко-механичких и деформабилних параметара земљишта на настајак и развој ерозије, (Gajić G., 2000). Анализирање ерозионе стабилности извршиће се

упоредном анализом индекса тоњења и сувих запреминских тежина са анализом влажности и параметара отпорности лесног земљишта.

Тип испитивања и резултати испитиваних параметара земљишта

Испитивања и одређивања вредности физичко-механичких параметара и деформабилних показатеља код лесног земљишта, извршена су на свим узетим узорцима, (укупно 47). Вредности физичко-механичких параметара су дефинисане кроз: садржај воде у земљишту, запреминске тежине, порозност, гранулометријски састав, угао унутрашњег трења и кохезију, док је деформабилност дефинисана кроз модул стишљивости и индекс тоњења (Gajić G., 2005.a).

Садржај воде у земљишту - у моменту узимања узорака, макропорозне зоне леса се крећу у границама од 6,5%, 35,3%, са средњом вредношћу од $W = 22,5\%$.

Запреминске тежине - код лесног земљишта битан показатељ промене физичких особина су запреминске тежине. Вредности природно влажних запреминских тежина, код лесног земљишта су у распону од $\gamma = 15,8 \div 21,0 \text{ kN/m}^3$ (18,5), односно суве запреминске тежине $\gamma_d = 11,8 \div 16,2 \text{ kN/m}^3$, док је средња вредност свих добијених резултата $14,14 \text{ kN/m}^3$.

Гранулометријски састав - Учешће појединих фракција се знатно мења како у хоризонталном, тако и у вертикалном профилу, што је последица примарних услова таложења, (јачине и правца дувања ветра), и дејства секундарних процеса дубинске ерозије (суфозије, преструктурирања честица и рушења структуре). Меродавни распони процентуалног учешћа појединих фракција макропорозног леса приказани су у *табели 1*.

Табела 1. (извор аутор)

Гранулометријска анализа	Глина	Прашина	Песак ситан	Песак средњи	Песак крупан	Шљунак ситан
	0.000÷0.002	0.002÷0.02	0.02÷0.2	0.2÷1.0	1.0÷2.0	2.0÷30
Меродавни распони	2÷19 (8)	73÷91 (82.6)	1÷15 (7.35)	0÷5 (1.3)	0÷2 (0.35)	0÷1 (0.2)

Порозност - Укупна порозност испитиваног леса се креће у границама од $36\% \div 53,3\%$ (45,1), док је коефицијент порозности $0,50 \div 1,05$, са средњом вредношћу од 0,80.

Водопропустљивост - лесног земљишта, у директној је зависности од сопствених физичких карактеристика, вискозитета течности и других хидрофизичких показатеља. Одређивање водопрпустљивости код узорака земљишта урађено је лабораторијским поступком. Добијени су коефицијенти филтрације од $K_f = 1,9^6 \div 1,2^4$ cm/s, док је средња вредност $2,23^4$, cm/s.

Отпорне карактеристике - један од најважнијих механичких параметара земљишта је чврстоћа на смицање. Елементи унутрашњег отпора земљишта 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 садржај воде. С 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. Код леса су добијене вредности угла унутрашњег трења $\varphi = 8^\circ \div 24^\circ$ (17), и кохезије $c = 9,0 \div 26,1$ kN/m² (16,53). Промене угла унутрашњег трења и кохезије код леса су приказане на слици 1 и 2.

Деформабилна својства - Показатељи механичких својстава утврђени су и преко опита деформабилности на репрезентативним узорцима из свих евидентираних средина макропорозног лесног комплекса. Резултати показују директну зависност деформабилних карактеристика од структурних и физичких својстава.

Површински нивои лесног комплекса карактеристични су по изузетној стишљивости. Меравни распони показатеља деформабилности макропорозног и колапсбилног лесног земљишта изражени кроз модул стишљивости су $M_s = 2200 \div 5400$ kN/m², односно у условима провлажавања $M_s = 1800 \div 4000$ kN/m², при чему се индекс тоњења кретао у распону $I_m = 0,0066 \div 0,028$.

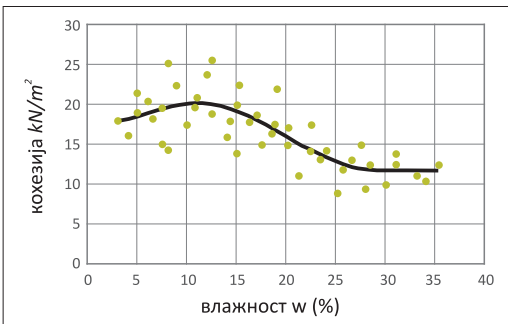
РЕЗУЛТАТИ

Промена параметара отпорности у функцији промене влажности

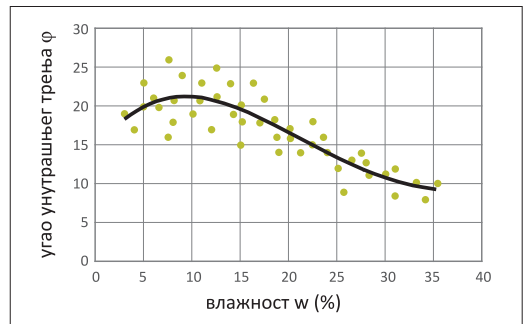
Како су угао унутрашњег трења и кохезија један од основних показатеља отпорности земљишта извршена су експериментална испитивања промене ових параметара у функцији промене влажности. Испитано је укупно 47 узорака а резултати су приказани на слици 1 и 2. На основу добијених резултата формирани су математички модели и утврђена је функционерна веза $\varphi = f(w)$, као и $c = f(w)$. Регресионе једначине полинома који дају функциону везу угла унутрашњег трења, кохезије и садржаја воде у земљишту, код лесног земљишта, имају следећи израз:

Угао унутрашњег трења: $\varphi = 12,91 + 2,16 \cdot w - 0,181 \cdot w^2 + 0,005 \cdot w^3 - 5,14 \cdot 10^{-5} \cdot w^4$

Са статистичким показатељима: коефицијент детерминације $R^2 = 0,731$, коефицијент корелације $R = -0,82$, стандардна грешка 2,39.



Слика 1. (извор: аутор)



Слика 2. (извор: аутор)

Кохезија: $c = 17,29 - 0,085 \cdot w + 0,1197 \cdot w^2 - 0,1194 \cdot w^3 + 3,75 \cdot 10^{-4} \cdot w^4 - 3,83 \cdot 10^{-6} \cdot w^5$

Са статистичким показатељима: коефицијент детерминације $R^2 = 0,607$, коефицијент корелације $R = -0,73$, стандардна грешка 2,68.

На основу успостављених корелационих веза $\varphi = f(w)$ и $c = f(w)$ може се закључити да лес при садржају влажности од $w = 10\%$ достиже максималну вредност угла унутрашњег трења од $\varphi = 21^\circ$ док се минимална вредност угла унутрашњег трења од $\varphi = 9^\circ$ постиже при садржају влажности од $w = 34\%$. Максимална вредност кохезије од $c = 20,5 \text{ kN/m}^2$, се постиже при влажности од $w = 10,9\%$, минимална вредност кохезије од $c = 11,5 \text{ kN/m}^2$ је при влажности од $w = 30\%$. Интересантно је истаћи и податак, евидентан праћењем тока развоја регресионе криве, а то је да се и при мањим вредностима влажности од $w = 10\%$ 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 $w < 10,9\%$.

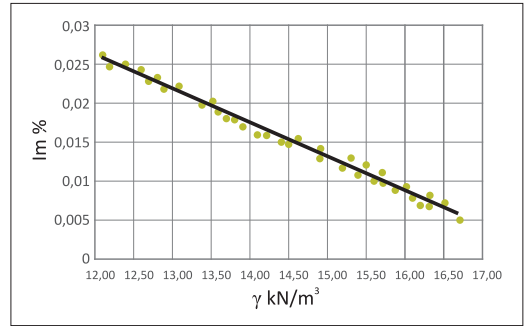
Промена деформабилности у функцији промене сувих запреминских тежина

Деформабилни параметри као показатељи настанка ерозионих процеса анализирани у овом раду су вредности индекса тоњења у функцији промене показатеља физичких особина лесног земљишта, односно сувих запреминских тежина (γ_d).

Експериментално испитивање је извршено на 47 узорака макропорозног лесног земљишта а резултати су приказани на слици 3. По формирању математичких модела на основу експериментално добијених вредности Im и γ_d утврђена је функциона веза $Im = f(\gamma_d)$. Линеарна једначина која даје функциону везу индекса тоњења и сувих запреминских тежина, код лесног земљишта, има следећи израз:

$$Im = 0,078 - 0,0044\gamma_d$$

Са статистичким показатељима: коефицијент детерминације $R^2 = 0,991$, коефицијент корелације $R = -0,99$, стандардна грешка 0,0005



Слика 3. (извор: аутор)

На основу успостављене корелационе везе $Im = f(\gamma_d)$ може се закључити да лес при сувој запреминској тежини од $\gamma_d = 12 \text{ kN/m}^3$ достиже максималну вредност индекса тоњења од $Im = 0,026$, док се минимална вредност индекса тоњења од $Im = 0,005$ постиже при сувој запреминској тежини од $\gamma_d = 16,7 \text{ kN/m}^3$. Праћећи резултате ових испитивања може се закључити да је осетљивост лесног земљишта на колапс при сувим запреминским тежинама до $\gamma_d \leq 15,6 \text{ kN/m}^3$.

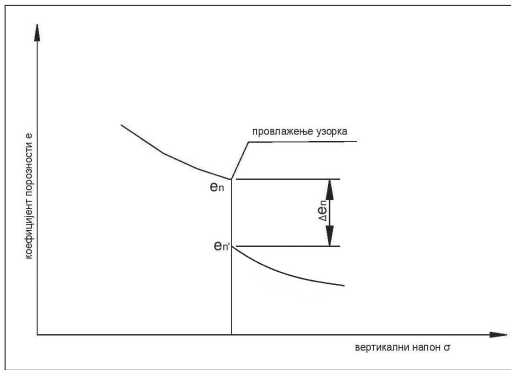
ДИСКУСИЈА

Колапсбилност лесног земљишта условљена је између осталог структурним разарањем услед деловања унутрашње ерозије и хидродинамичке консолидације терена.

У хоризонтима са очуваном примарном структуром, изразитом порозношћу и малим сувим запреминским тежинама, у условима провлажавања (присуства воде), долази до рушења, односно слома структуре, (нагли скок компресионе криве), слика 4, што знатно утиче на отпорна својства макропорозних лесних земљишта.

Осетљивост лесне структуре изражена је преко коефицијента тоњења Im , који се креће од $0,02 \div 0,006$. Индикатор осетљивости структуре лесног земљишта на провлажавање, слома односно колапса јесте сува запреминска тежина.

Код осетљивости структуре на провлажавање важан чинилац је и степен zasiћености, односно zasiћеност леса водом. Утврђено је



Слика 4. (извор: аутор)

да је у I-хоризонту леса и “погребене земље” степен засићености неуједначен и релативно низак. Уколико је влажност испод 20%, индекс тоњења је ближи горњој граници, док за случај веће влажности, од 20%, тежи доњој граници.

Сви испитивани узорци из макропорозне зоне показали су мале модуле стишљивости, односно повећану деформабилност, а посебно у условима провлажавања.

У условима водозасићења лесног земљишта долази до опадања вредности кохезије и угла унутрашњег трења, који доводе до појаве смицања што засигурно има за последицу настанак бразди, јаруга, пластичног течења, клизишта или одрона на теренима са нагибом. На заравнима анализираних речних тераса водозасићење доводи до слома структуре, које се на површини манифестују мањим или већим улегнућима. Промена рељефа на овај начин, омогућава задржавање воде у увалама, што доводи до повећања увале што у следећој фази може да доведе до појаве смицања (клизишта) у ободним деловима увале.

У датој ситуацији, услед већих падавина, долази до заједничког деловања слабљења отпорних карактеристика и деформабилних особина лесног земљишта, што води ка настанку и интензивном развоју ерозионих процеса.

Ефекте параметара отпорности на смицање и деформабилних карактеристика на деградацију лесног земљишта у великој мери може ублажити присуство вегетација (Gajić G. at all 2013.). Правилан одабир врста који омогућава армирање земљишта кореновим системом, на више нивоа по дубини профила, значајно утичу

на отпорне и деформабилне карактеристике леса. Присуство кореновог система, у макропорозним зонама леса доводи до смањења порозности, повећања запреминских тежина а самим тим до повећања параметара отпорности на смицање и смањењем деформабилности (Gajić G. 2005.b). Све наведено може довести до спречавања или смањења површинских и унутрашњих ерозионих процеса.

ЗАКЉУЧАК

На основу приказаних експерименталних испитивања физичко-механичких карактеристика, а посебно отпорних карактеристика - иницијалне ерозије макропорозног лесног земљишта, и њиховом обрадом математичким методама геостатистике може се закључити следеће:

Отпорне карактеристике (угао унутрашњег трења и кохезија), имају снижене вредности, у условима повишене влажности и водозасићења, односно пад од вршне на резидуалну чврстоћу за око два пута.

Резултати експерименталних испитивања почетне - иницијалне ерозије доведени су у функциону везу са сувим запреминским тежинама уз висок степен корелационе завискости.

Успостављене корелационе зависности: отпорних карактеристика и влажности, као и зависности индекса тоњења и сувих запреминских тежина омогућавају рационалност у истраживању и испитивању настанка, механизма и динамике развоја ерозије у оквиру макропорозних лесних наслага.

Напомена: Истраживања која су послужила као основ за концепт изложен у овом раду резултат су пројекта NPTR 33044 „Мониторинг и адаптивно управљање ризицима у површинској експлоатацији минералних сировина“ који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, а који реализује тим стручњака Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, Факултета организационих наука Универзитета у Београду, Шумарског факултета Универзитета у Београду и Иновационог центра Машинског факултета Универзитета у Београду.

INDICATORS AND DEGRADATION MECHANISAM OF LOESS SOIL

Dr Grozdana Gajić, full professor, University of Belgrade - Faculty of Forestry

Nikola Živanović, research assistant, University of Belgrade - Faculty of Forestry

Luka Vukić, Faculty of Geo-inforamtion Science and Earth Observation of the University of Twente

Abstract: Studies that are presented in this paper were carried out to define the formation criteria of loess soil degradation. Erosion stability analysis of this soil type will be carried out on the basis of its physical and mechanical characteristics. To describe the established relationships between the individual parameters of loess soil, the study uses mathematical model, that is based on experimentally obtained results of soils' physical and mechanical characteristics, From the presented results of geotechnical tests, mathematical models and functional relations between water regime and loess soils' resistant characteristics; indicators of internal erosion were defined as well as the mechanism of this process. Effects of the practical application of found results are also analyzed in this paper.

Key words: loess soil, soil physics, mathematical modelling, geo-statistics, indicators and mechanism of internal erosion processes.

INTRODUCTION AND OBJECTIVE

Studies that preceded the analysis that will be presented in this paper were carried out on soil samples from the area known as "Stiška Valley". Geo-statistical analysis of the results of these studies defined the parameters of which depends the intensity of erosion processes. Parameters of the occurrence and intensity of erosion processes in loess soil are parameters of shear strength, internal friction angle and cohesion in the function of humidity and deformability indicators in the function of dry bulk density (*Miljanović I., Gajić G., 2011*).

The main objective of the research is to define the physical and mechanical properties of loess soil. In addition to tests of physical and mechanical soil properties, deformability was tested as well, as one of the indicators of the origin and development of the soil erosion mechanism. The origin mechanism of erosion is caused by a variety of factors that are affecting the change of: stress state, physical and mechanical properties and water regime, in the erosion engaged soil (*Todorović T.; Gajic G., 1997*). Degree and form of loess soil erosions is dependent on the variation of these factors.

DATA ACQUISITION AND WORKING METHODS

Data acquisition

Loess soil that is analyzed in this paper is originated from the area of Pozarevac and Kostolac, known as the "Stiška Valley". The loess plateau in this area is a part of the coast and the wide river terraces of rivers Danube (Dunav) and Mlava (Mlava). Plateau has a slightly wavy surface whose absolute elevations are ranging from 70 meters above sea level on the banks of the Danube and Mlava rivers to 170 masl on Lestari. The dominant forms of soil erosion on the river plain terraces are internal erosion processes, while on the slopes of Lestari, in addition to the internal processes there are intensive forms of surface erosion as well. This region is also known for typical forms of degradation of river banks and surface excavation slopes also formed in loess. Stability of banks and slopes are also conditioned by the physical and mechanical changes in water saturation and by the filtration forces in loess soil (*Vujic S. et all 2011*).

From this study area, 47 undisturbed loess soil samples were taken. The samples were tested

Table 1. (source: author)

Granulometric analysis	Clay	Dust	Sand small	Sand medium	Sand coarse	Gravel small
	0.000÷0.002	0.002÷0.02	0.02÷0.2	0.2÷1.0	1.0÷2.0	2.0÷30
Relevant ranges	2 ÷ 19 (8)	73 ÷ 91 (82.6)	1 ÷ 15 (7.35)	0 ÷ 5 (1.3)	0 ÷ 2 (0.35)	0 ÷ 1 (0.2)

in laboratory conditions in accordance with prescribed standards SRPS - U.B1, at laboratories of the Chair of Anti-erosion Geotechnics of Faculty of Forestry in Belgrade.

Working methods

Field research and laboratory testing are working methods in the study of loess soils. Field investigations include taking undisturbed soil samples. Physical-mechanical and deformable parameters were determined by testing undisturbed soil samples in the laboratory. Applied method, trough analysis of retrieved results, derives the quantitative indicators of the physical- mechanical and deformable parameters that create and develop erosion processes (Gajić G., 2000). Erosion stability will be carried out by comparative analysis of sinking index and dry bulk density with the analysis of moisture and loess soil shere strength parameters.

Type of tests and the results of examined soil parameters

Tests and value determination of the physical-mechanical parameters and deformable indicators in the loess soil were conducted on all collected samples (total of 47). The values of physical and mechanical parameters are defined through: water content in the soil, bulk density, porosity, granulometric composition, internal friction angle and cohesion, while deformability is defined through the modulus of compressibility and sinking index. (Gajic G., 2005.a).

Water content in the soil at the time of sampling, loess soil macro-porous zone ranges from 6.5% to the 35.3%, with a mean value of $W=22.5\%$.

Bulk densities - at loess soil they are an essential indicator of changes in the soils' physical

properties. Naturally moist bulk density values, for loess soils, are in the range of $\gamma=15,8\div 21,0 \text{ kN}/\text{m}^3$ (18.5) and dry bulk density values ranges are $\gamma_d=11,8\div 16,2 \text{ kN}/\text{m}^3$, whereas the mean value of all obtained results is $14,14 \text{ kN}/\text{m}^3$.

Granulometric analysis - participation of some fractions can significantly change both in the horizontal and the vertical profile, which is due to primary settling conditions (intensity and direction of the wind), and the effects of secondary deep erosion processes (suffosion, restructuring of the particles and demolition of structures). The relevant ranges of percentage share of certain loess soils' macro-porous fractions are shown in Table 1.

Porosity - total porosity of the tested soil samples ranges from 36% to 53.3% (45.1), while the porosity coefficient range is $0,50\div 1,05$, with an average value of 0.80.

Water permeability of loess soil - directly depends on its own physical characteristics, fluid viscosity and other hydro-physical indicators. Determination of water permeability of taken soil samples was done by laboratory method. Obtained coefficients of filtration range: $K_f = 1,9^{-06} \div 1,2^{-04} \text{ cm}/\text{s}$, while the mean value is $2,23^{-04} \text{ cm}/\text{s}$.

Resistant characteristics - shear strength is one of the most important mechanical parameters of the soil. Elements of the internal resistance are internal friction angle and cohesion. Shear resistance parameters of loess soil are influenced by: heterogeneity of the soil composition, the content of clay and dust, porosity and compaction, as well as the water content. Considering that in conditions of increased humidity and water saturation changes could be expected in mentioned physical properties, change in the parameters of shear resistance, especially in terms of water saturation and function of the water filtration current. Values of internal friction angle of loess soil: $\varphi=8^\circ\div 24^\circ$ (17) and cohesion: $c=9,0\div 26,1 \text{ kN}/\text{m}^2$ (16,53). Changes of the loess internal friction angle and cohesion are shown in *Figures 1 and 2*.

Deformable properties - indicators of mechanical properties are determined by deformability experiment on representative samples from all registered areas of macro-porous loess complex. The results show direct dependence of deformable characteristic from the structural and physical properties. Loess complex surface levels are specific because of their exceptional compressibility. The relevant ranges of deformability indicators for macro-porous and collapsible loess soils expressed through the compressibility module $M_s=2200 \div 5400 \text{ kN/m}^2$, and in terms of wetted conditions $M_s=1800 \div 4000 \text{ kN/m}^2$, with the range of sinking index: $I_m=0.0066 \div 0.028$.

RESULTS

Influence of humidity change on resistance parameters

Experimental tests were carried out to examine the influence of humidity change on internal friction angle and cohesion. A total of 47 samples were tested and the results are displayed in Figures 1 and 2. Based on obtained results mathematical models were formed and $\varphi = f(w)$ functionality links were established as well as $c = f(w)$. Regression polynomial equations that give functional link between internal friction angle, cohesion and soil water content of the loess soil, have the following expression:

Internal friction angle:

$$\varphi = 12,91 + 2,16 \cdot w - 0,181 \cdot w^2 + 0,005 \cdot w^3 - 5,14 \cdot 10^{-5} \cdot w^4$$

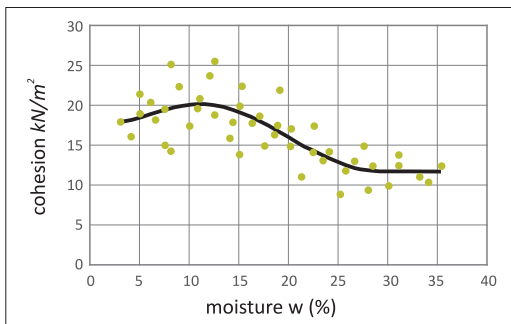


Figure 1. (source: author)

With statistical indicators: determination coefficient $R^2 = 0.731$, correlation coefficient $R = -0.82$, standard deviation 2.39

$$\text{Cohesion: } c = 17,29 - 0,085 \cdot w + 0,1197 \cdot w^2 - 0,1194 \cdot w^3 + 3,75 \cdot 10^{-4} \cdot w^4 - 3,83 \cdot 10^{-6} \cdot w^5$$

With statistical indicators: determination coefficient $R^2 = 0.607$, correlation coefficient $R = -0.73$, standard deviation 2,68.

Based on these correlations $\varphi = f(w)$ and $c = f(w)$ it can be concluded that the loess moisture content of $w = 10\%$ reaches the maximum value of the internal friction angle of $\varphi = 21^\circ$ and the minimum value of the internal friction angle of $\varphi = 9^\circ$ is achieved when the content of humidity is $w = 34\%$. The maximum value of cohesion $c = 20,5 \text{ kN/m}^2$ is achieved when the humidity is $w = 10,9\%$, the minimum value of the cohesion $c = 11,5 \text{ kN/m}^2$, is achieved when the humidity is $w = 30\%$. It is interesting to point out information, which is obvious by monitoring the development of the regression curve that even at lower humidity values of $w = 10\%$ decline of the internal friction angle value is noticeable. The situation is similar with the regression curve related to cohesion, except that the value of cohesion starts to decrease after the moisture content reduction of $w < 10,9\%$.

Deformability change in the function of dry bulk density changes

Deformable parameters as indicators of the occurrence of erosion processes analyzed in this paper are value of the sinking index as a function of changes in the indicators of physical properties of loess soil, respectively dry volume weight (γ_d).

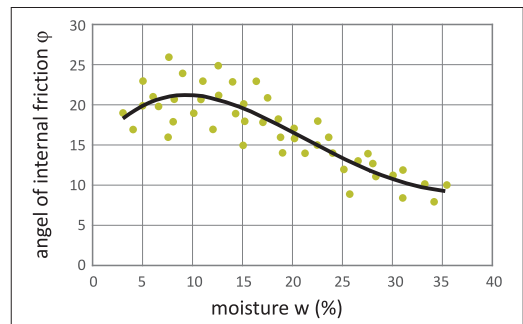


Figure 2. (source: author)

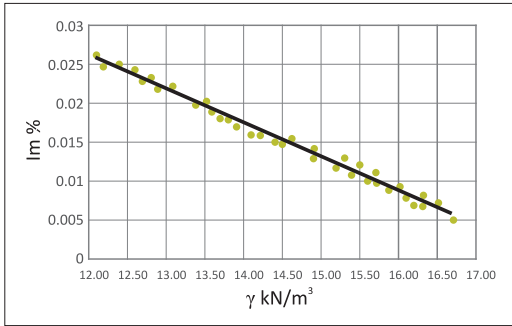


Figure 3. (source: author)

Experimental testing was performed on 47 samples of macro-porous loess soil and the results are shown in Figure 3. After formation of mathematical models based on experimentally obtained values Im and γ_d functionality connection was found $Im = f(\gamma_d)$. The linear equation which gives the function relationship of sinking index and dry bulk density, gives the following expression:

$$Im = 0,078 - 0,0044\gamma_d$$

With statistical indicators: determination coefficient $R^2 = 0.991$, correlation coefficient $R = -0.99$, standard deviation 0.0005

Based on the established correlation relationship $Im = f(\gamma_d)$ it can be concluded that loess in the dry bulk density of $\gamma_d = 12 \text{ kN/m}^3$ reaches maximal sinking index of $Im = 0,026$, while the minimum value of the sinking index of $Im = 0,005$ is reached when the dry bulk density is $\gamma_d = 16,7 \text{ kN/m}^3$. Following the results of these tests it can be concluded that the loess soils are susceptibility to collapse when the dry bulk density is $\gamma_d \leq 15,6 \text{ kN/m}^3$.

DISCUSSION

Collapsibility of loess soil is conditioned by structural destruction caused by the internal erosion process and hydrodynamic field consolidation.

In horizons with preserved primary structure, small dry bulk density and distinct porosity flooding conditions (wetted conditions, high presence of water) cause demolition or collapse of structures (sudden jump of compression curve), Figure 4. This significantly affects the resistant properties of macro-porous loess soils.

Loess structure sensitivity is expressed with sinking coefficients Im , which ranges from 0.02 to 0,006. Dry bulk density is an indicator of loess structure sensitivity to flooding conditions, demolition or collapse of structures.

When we are referring to sensitivity of the structure to the wetted conditions important factor to consider is the degree of saturation, or saturation of the loess with water. It was found that the I-horizon of loess and of "fossil soil" has uneven and relatively low degree of saturation. Sinking index is closer to the upper limit if the humidity is below 20%, in case of humidity greater than 20%, the sinking index is closer to the lower limit.

All of the samples from the macro-porous zone showed increased deformability, especially under the wetted conditions (flooding samples).

Loess soil in water saturated conditions leads to decline of cohesion and internal friction angle values. This causes decrease of shear strength which has the effect on the formation of furrows, gullies, landslides or avalanches on sloped terrain. On the analyzed river terrace plains water saturation leads to the collapse of the structure, this is manifested on the surface with smaller or larger dents. Change of relief in this way allows the retention of water in the dents, which leads to an increase of the dent. This could lead to the appearance of shear and creation of the landslide in the peripheral parts of the widened dent.

In the given situation, due to higher precipitation, there is a joint action of weakening resistance characteristics and deformable properties of loess soil, which leads to the creation and development of intensive erosion processes.

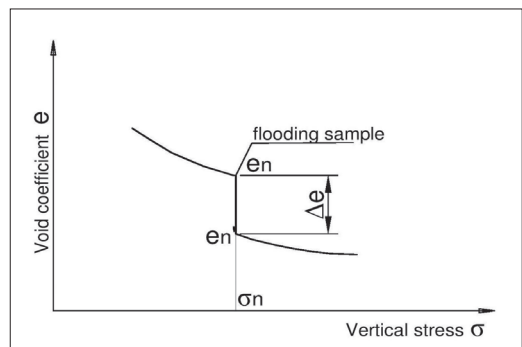


Figure 4. (source: author)

Loess soil degradation could be mitigated with vegetation and the effects of shear resistance parameters and deformable characteristics would be lessened (Gajić G. at all in 2013). Proper species selection that allows the reinforcement of the soil with root system, on multiple levels throughout the profile, significantly affects the resistance and deformable characteristics of loess soil. The presence of the root system in the loess macro-porous zones leads to a decrease in porosity, increase of the dry bulk density, increase of the shear strength parameters and a decrease of deformability (Gajić G. 2005.b). All of this could lead to the prevention or reduction of surface and internal erosion processes.

CONCLUSION

Based on the executed experimental testing of physical-mechanical properties, especially resistance characteristics - initial macro-porous loess soil erosion, and their processing with geostatistics mathematical methods, the following could be concluded:

Resistant characteristics (internal friction angle and cohesion), have lower values in conditions of high humidity and water saturation, decline from the peak to the residual strength (the values doped, approximately, by half). Experimental test results of initial erosion were brought into functional connection with dry bulk density with a high degree of correlation dependency.

Established correlations: resistance characteristics and humidity, as well as the dependence of the sinking index and dry bulk density ensure rationality in researching and examining the origin, mechanism and dynamics of the erosion development within the macro-porous loess deposits.

Acknowledgment: The studies, that served as the starting point for the concept outlined in this paper, are the result of the project NPTR 33044 "Monitoring and adaptive risk management in surface mining of mineral resources" („Monitoring i adaptivno upravljanje rizicima u površinskoj eksploataciji mineralnih sirovina“) financed by the Ministry of Education, Science and Technological Development of Republic of Serbia, and imple-

mented by a team of experts of Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, Faculty of Organizational Sciences, University of Belgrade, Faculty of Forestry, University of Belgrade and Innovation Centre of Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Gajić G. (2000): "Uticaj otpornosti zemljišta na stepen aktivizacije dubinske erozije": doktorska disertacija, Šumarski fakultet u Beogradu
- Gajić G. (2005.a): "Inicijalni pokazatelji nastanka unutrašnjih erozionih procesa" "Šumarstvo", Časopis za šumarstvo, preradu drveta, pejzažnu arhitekturu i zaštitu od erozije, br. 3, Beograd 2005.g., COBISS.SR-ID 39008263, str. 117-129
- Gajić G. (2005.b): "Uticaj korenovog sistema na nastanak unutrašnjih erozionih procesa" "Šumarstvo", Časopis za šumarstvo, preradu drveta, pejzažnu arhitekturu i zaštitu od erozije, br. 4, str. 45-58
- Gajić G., Miljanović I., Živanović N., Stanišić M., Pavlović M., Damjanović V. (2013.): "Uporedna analiza efekata biološkog "armiranja" i njihov uticaj na unutrašnju eroziju", Časopis za uređenje bujica i zaštitu od erozije "Erozija" 39, str 46-56, Udruženje bujičara Srbije, Beograd
- Miljanović I., Gajić G. (2011): "Matematički modeli komparativne analize efekata biološkog armiranja zemljišta na unutrašnje erozione procese" – SIMOPIS, 38. Simpozijum o operacionim istraživanjima
- Todorović T.; Gajić G. (1997): "Applications geotechnical approach to structures on macro-porous loess soil", APCOM '97 - Symposium on computers applications and operations research in the mineral industries, 2nd Regional, Moscow state Mining University, Moscow, August 24-28
- Vujić S., Čebašek V., Gajić G., Gojković N., Miljanović I., Petrovski A. (2011): „Potential traps and risks in slope stability calculations at open pit mines“, 4th Balkan Mining Congress BALKAN-MINE, Ljubljana, Slovenia, pp. 527-530

