

# Могућност примене приручних апарата за одређивања отпорности земљишта на ерозионе процесе шумских екосистема

Никола Живановић, Вукашин Рончевић, Владимир Чебашек, Вељко Рупар, Стеван Ђорлука, Сениша Половина



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Могућност примене приручних апарата за одређивања отпорности земљишта на ерозионе процесе шумских екосистема | Никола Живановић, Вукашин Рончевић, Владимир Чебашек, Вељко Рупар, Стеван Ђорлука, Сениша Половина | Инжењерски проблеми у меким стенама - Друга конференција регионалних геотехничких друштава, Специјализована конференција ISRM-а; Engineering problems in soft rocks | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007135>

## Могућност примене приручних апарата за одређивања отпорности земљишта на ерозионе процесе шумских екосистема

Никола Живановић<sup>а</sup>, Вукашин Рончевић<sup>а</sup>, Владимир Чебашек<sup>б</sup>, Вељко Рупар<sup>б</sup>, Стеван Ђорлука<sup>в</sup>, Синиша Половина<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Универзитет у Београду, Шумарски факултет, Београд, Србија

<sup>б</sup>Универзитет у Београду, Рударско геолошки факултет, Београд, Србија

<sup>в</sup>Рударски институт, Београд, Србија

### АПСТРАКТ

Ерозија земљишта је најзаступљенији облик деградације земљишта како у свету тако и у Србији. Деградирани шумски екосистеми не пружају довољну заштиту земљишта те су често велике површине захваћене ерозионим процесима. Важну улогу при оцени отпорности земљишта на ерозионе процесе има напон смицања. Истраживано подручје лоцирано је у југозападном делу Београда чије су површине под шумом изложене интензивним ерозионим процесима. Читава површина испресецана је јаругама и плитким клизиштима. Одабрано је 13 профила на јаругама на којима је извршено мерење отпорности земљишта приручним апаратима на три тачке дуж профила (лева обала, јаруга, десна обала) и по две дубине. За теренска мерења изабрани су приручни апарати: цепна крилна сонда (Eijkelkamp модел M1.14.10.E) и цепни (ручни) статички пенетрометар (Eijkelkamp модел M1.06.03.E). У раду су приказани механички параметри мерени приручним апаратима са опсегом вредности чврстоће земљишта на смицање  $\tau = 11,58 - 172,42 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$  и отпора при продору игле  $R = 159,36 - 441,30 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ . Утврђена је статистичка зависност између вредности добијених мерењима крилном сондом и пенетрометром, са коефицијентом корелације  $r = 0,65$  и коефицијентом детерминације  $r^2 = 0,42$ . Утврђене разлике у вредностима отпорности земљишта на смицање, на изабраним мерним тачкама, као и утврђена зависност указују на могућу примену приручних апарата за одређивање отпорности земљишта шумских екосистема на ерозионе процесе.

### КЉУЧНЕ РЕЧИ

Теренско мерење; Ерозија земљишта; Јаруга; Цепна крилна сонда; Цепни пенетрометар.

### 1. УВОД

Деградиране површине шумских подручја, услед деловања ерозионих процеса, имају редукован капацитет за вршење екосистемских услуга и смањен производни потенцијал дрвне масе. Како би се дошло до одговарајућег решења за санацију, неопходно је дефинисати механизам настанка ерозионог процеса. Недовољна изученост отежава идентификацију ерозионог процеса, предвиђање даљег правца развоја и утврђивање интензитета. Такође, има великог утицаја на резултате прорачуна продукције ерозионог материјала, затим на процене угрожености земљишта од ерозионих процеса као и на одређивање приоритета за санирање.

Кохерентна земљишта у Србији су углавном угрожена водном ерозијом која агресивно делује на земљиште својим током по површини, или кроз матрикс земљишта (унутрашња ерозија). Способност земљишта да се одупре ерозионим процесима првенствено зависи од отпорности земљишта која се

дефинише физичко-механичким параметрима земљишта (Sun et al., 2016). Кохерентна земљишта свој отпор ерозионим силама пружају комплексним односом гранулометријског састава, структуре агрегата и минералošких својстава глине. Отпорност земљишта на ерозионе процесе се може дефинисати преко чврстоће земљишта на смицање, која директно зависи од тренутне влажности и збијености земљишта (Jie et al., 2018). На вредности чврстоће земљишта на смицање значајно утичу промене тренутне влажности земљишта (Zimbone et al., 1996; Bachmann et al., 2005; Zhang et al., 2018). Значај параметра чврстоће земљишта на смицање, у погледу отпорности земљишта на ерозију, је у томе што представља физички параметар који обједињује ефекте физичких, хемијских и минералošких особина земљишта у један мерљив параметар (Agassi and Bradford, 1999). Утврђивање вредности чврстоће земљишта на смицање значајано је код дефинисања еродибилности кохерентних земљишта (Morgan et al., 1998; Goudie, 2004). Fattet et al. (2011) су истакли да водна ерозија, као и појава плитких клизишта зависи од стабилности агрегата и чврстоће земљишта на смицање. Чврстоћа земљишта на смицање има јаку корелациону везу са критичним напоном смицања потребним за настанак ерозионог процеса (Misra and Rose, 1995; Leonard and Richard, 2004; Fell et al., 2013). Heimsath и Whipple (2019) истичу да је познавање јачине веза у земљишту, што се може изразити чврстоћом на смицање (напоном смицања), предуслов за очување земљишта. У својим истраживањима привремених (краткотрајних) јаруга (енг. ephemeral gully) Wilson et al. (2019) су истакли да су мерења чврстоће земљишта на смицање и мерења отпора при продору игле, на самој површини земљишта, важна за детерминисање индикатора физичког квалитета земљишта. Agassi и Bradford (1999) наводе да је отпорност земљишта једини параметар, навођен у литератури, који има поуздану корелацију са продукцијом наноса проузрокованом ерозионим дејством кише.

Отпор при продору игле је значајан индикатор при утврђивању збијености земљишта. Misra и Rose (1995) и Uusitalo et al. (2019) су истакли значај мерења отпорности земљишта преносивим уређајима (крилна сонда, џепни пенетрометар) у шумским подручјима, нарочито за одређивање збијености земљишта настале преласком тешке механизације. На основу изнетих закључака у прегледном раду Alaoui et al. (2018), повећање збијености земљишта има значајан утицај на формирање интензивнијег површинског отицаја и појаву поплава. Такође, познавање овог параметра даје могућност процене потенцијала раста и развоја кореновог система (Materchera and Mloza-Banda, 1997; Gajić et al., 2005; Shah et al., 2017), што може бити од великог значаја при пошумљавању.

Watson и Laflen (1985), Govers et al. (1990), Misra и Rose (1995), Bachmann et al. (2005), Nadal-Romero et al. (2007), Torri et al. (2013), Verachtert et al. (2013), Vahedifard et al. (2016), Ding и Loehr (2019) су користили ручну крилну сонду и/или џепни пенетрометар за анализу отпорности земљишта на ерозионе процесе. Brunori et al. (1989) сматрају да су апарати на принципу крилне сонде најприкладнији међу тестираним инструментима за мерење отпорности земљишта на ерозију. Govers et al. (1990) су указали на то да примена ручне крилне сонде за мерење чврстоће земљишта на смицање није увек поуздана, у погледу одређивања критичног прага за настанак ерозионог процеса, нарочито када се ради о растреситом или сувом земљишту. Ипак, ова мерења се могу користити за процену угрожености од настанка ерозионог процеса. Amacher и O'Neill (2004) су истакли да се коришћењем џепног пенетрометра обезбеђују квантитативни подаци о збијености земљишта. Watson и Laflen (1985) су открили да се теренска мерења отпорности земљишта могу користити за прибављање информација потребних за предвиђање ерозије земљишта. Примарни циљ овог рада је да се утврди могућност примене приручних апарата, за одређивање чврстоће земљишта на смицање, за потребе дефинисања отпорности земљишта на ерозионе процесе. Секундарни циљ је утврђивање разлика отпорности земљишта на смицање пратећи хипотезу: „Постоји разлика између механичких параметара земљишта које је захваћено ерозионим процесима и земљишта на коме нема видљивих показатеља деловања ових процеса“.

## 2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД

### 2.1. Материјал

Подручје на коме је спроведено истраживање налази се у југозападном руралном делу Београда., непосредно изнад великог чеоног одсека клизишта „Дубоко“. Експериментално истраживање спроведено је у 47. одељењу, одсек д, Газдинске јединице „Кошутњачке шуме“, којом газдује Шумска управа „Липовица“. У геолошком смислу, испод квартарног покривача у коме доминирају лес и делувијална глина, налазе се панонски глиновито-лапоровити и песковити седименти. Читаво подручје је захваћено ерозионим процесима о чему сведоче бројне јаруге као и површинска клизишта. Механизам настанка ерозионог процеса на истраживаном подручју је процес унутрашње линијске ерозије. Земљишни материјал може се описати следећим физичким карактеристикама приказаних у табели 1 према Живановић, 2021. Гранулометријском анализом земљишта истраживаног подручја утврђена је заступљеност три групе фракција, са четири текстурне класе, од којих је најзаступљенија лака прашинаста глина. Према Атерберговим границама конзистенције, земљишта истраживаног подручја припадају трима групама пластичности, од којих је најзаступљенија група неорганске глине средње пластичности (CI).

Табела 1. Статистички индикатори физичких карактеристика земљишта испитиваног подручја

Статистички индикатори	Запреминска тежина [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ]			Влажност [%]	Атербергове границе конзистенције [%]		Гранулометријски састав [%]		
	$\gamma_s$	$\gamma$	$\gamma_d$	W	$w_p$	$w_L$	глина	прашина	песак
Средња	24,23	16,30	13,14	24,20	42,16	19,78	25,84	34,97	39,19
Медијана	24,09	16,56	13,14	24,25	41,09	19,56	26,50	34,50	39,00
Максимална	26,24	18,82	15,35	38,89	57,30	25,31	37,90	40,00	51,70
Минимална	21,96	12,41	10,06	13,37	32,30	13,75	15,90	28,00	27,00
Стандардна варијација	1,28	1,69	1,41	5,61	6,04	2,32	4,64	2,64	5,15
Коефицијент варијације	5,30	10,40	10,75	23,16	14,32	11,72	17,98	7,54	13,14

### 2.2. Метод

Одабир места за теренска мерења је извршен применом методе систематичног узорковања на основу три критеријума заступљености и степена развоја ерозионог процеса и то: ерозиони процес је у фази настанка (дубина највише до 1 m); процес је развијен у једном литолошком слоју земљишта; нагиб терена је уједначен. Постављено је 13 профила на јаругама, дуж чијих праваца су одређене три позиције (тачке) за теренско мерење: Јаруга – површина захваћена ерозионим процесом, узорковање се врши у дну корита јаруге; Лева обала и Десна обала – површине непосредно уз обале јаруге без видљивих облика ерозионих процеса. За сваку од позиција мерење је обављено на две дубине: прва зона - на површини; и друга зона - на дубини од 20-25 cm.

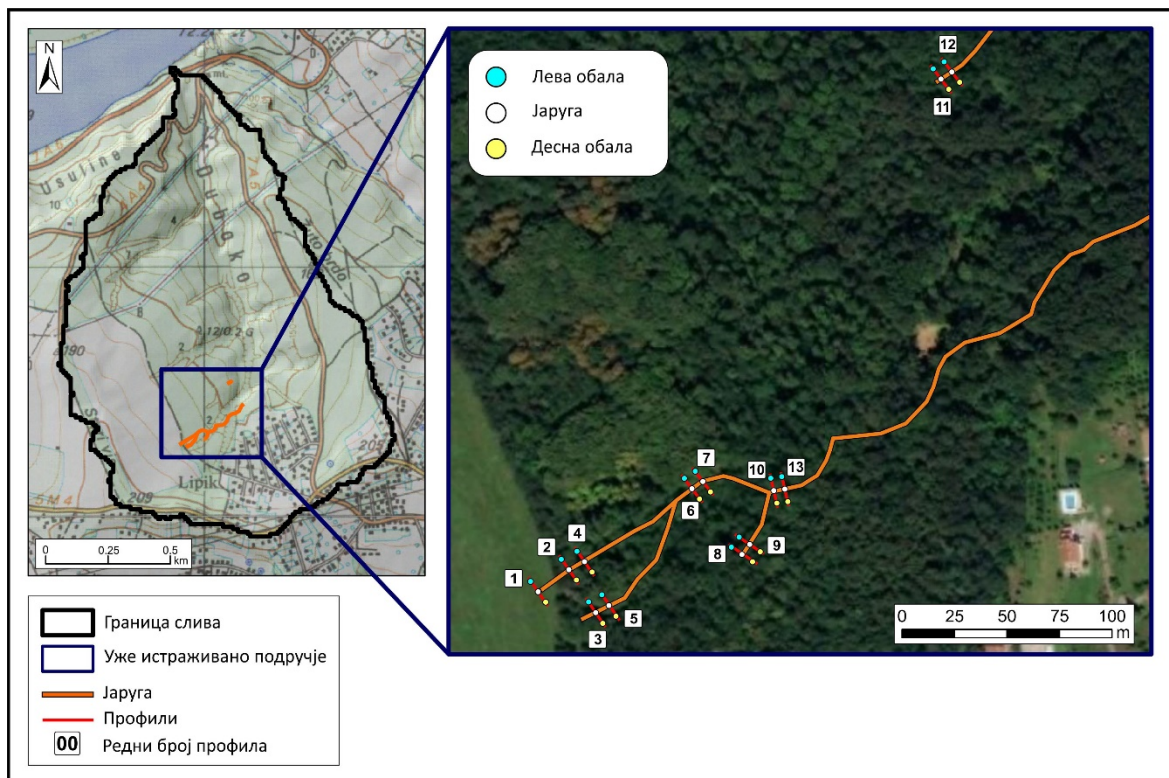
Одређивање чврстоће земљишта на смицање ( $\tau$ ) обављено је коришћењем цепне крилне сонде (Pocket vane tester – Eijkelkamp модел M1.14.10.E), која је дизајнирана за брзо одређивање чврстоћа земљишта на смицање, како на терену тако и у лабораторијским условима (слика 2). Овај модел поседује три крила различитог пречника, са одређеним опсегом могућности мерења:

- CL101: 0 – 0,2  $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$
- CL100: 0 – 1,0  $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$

- CL102:  $0 - 2,5 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$

Опсег очитавања на бројчанику износи од 0,0-10,0 подеока. Најмања подела на бројчанику је  $0,05 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  што дозвољава визуелну интерпретацију очитавања прецизности од  $0,01 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ . Испитивање тренутне чврстоће на смицање на терену вршено је према упутствима произвођача и утврђеном методом (Liu et al., 2003) на следећи начин:

- одабрана површина за мерење мора бити релативно равна без присуства корена или остатака вегетације;
- џепна крилна сонда се убада у земљиште, док крила сонде не уђу цела у земљиште;
- апарат се окреће удесно, равномерним покретом, до слома структуре земљишта. Уколико вредности очитане на апарату приликом лома прелазе 8,0 користи се крило мањег пречника, а ако су вредности испод 2,0, користи се сонда већег пречника;
- врши се по пет опита на свакој позицији испитивања - како у првој зони, тако и у другој зони узорковања;
- очитане вредности множе се са датим коефицијентима (које је дефинисао произвођач), за сваку од сонди. Прорачунава се аритметичка средина вредности добијених мерењима на свакој позицији, која се усваја као чврстоћа земљишта на смицање за посматрану позицију.

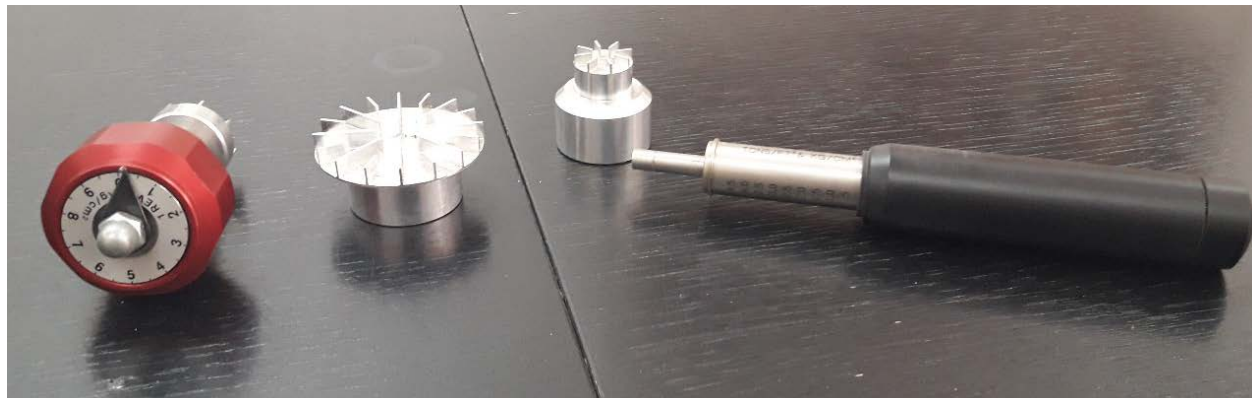


Слика 1. Распоред постављених профила на јаругама

Отпор при продору (цилиндра) игле ( $R$ ) испитиваног земљишта, мерен је помоћу џепног (ручног) статичког пенетрометра (произвођача Eijkelkamp модел M1.06.03.E) (слика 2). Опит је извршен према упутствима произвођача и утврђеном поступку (Amacher and O'Neill, 2004), на следећи начин:

- одабрана површина за мерење мора бити релативно равна, без присуства корена или остатака вегетације;
- игла ручног џепног пенетрометра утискује се у земљу до назначене линије на игли;
- очитава се максимална вредност означена гуменим прстеном;
- врши се по пет продора иглом за свако место испитивања;

- на свакој позицији, изведено је по пет продора игле пенетрометра, да би се за усвојену вредност отпора земљишта, при продору игле, узимала аритметичка средина добијених вредности.



Слика 2. Апаратура за одређивање механичких особина земљишта  
(фото: Живановић)

Обрада података је спроведена у програму Microsoft Excel, док је утврђивање статистичких зависности између анализираних параметара вршено у програму Statgraphics centurion XVIII (StatPoint Technologies, Inc. 2019).

### 3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Механички параметри земљишта одређивани на терену приручним апаратима, чврстоћа земљишта на смицање ( $\tau$ ) и отпор при продору игле ( $R$ ), дали су увид у отпорне карактеристике земљишта анализираниог подручја (табела 2). На основу распона и мера централне тенденције (средња вредност, медијана) запажа се да су вредности чврстоћа земљишта на смицање и отпора при продору игле ниже код узорака прве зоне у односу на узорке друге зоне, што указује на већи степен отпорност земљишта друге зоне на ерозионе процесе. Hosseini et al. (2016) су утврдили да је чврстоћа земљишта на смицање мања у слоју дубине од 0 – 8 cm, него у слоју на дубини од 8 – 16 cm. Такође, Wilson et al. (2019) су показали да чврстоћа земљишта на смицање расте од површине до дубине од 20,0 cm. Веће вредности пенетрационог отпора земљишта друге зоне, указују на већи степен збијености. Unger и Jones (1998) и Bogunović et al. (2018) су утврдили да са порастом дубине пенетрациона отпорност земљишта има тенденцију раста. Nan et al. (2009) су указали на повећање пенетрационог отпора земљишта са дубином (7,15 cm; 15,0 cm; 22,5 cm), на шумском земљишту. На основу коефицијента варијације утврђена је већа варијација вредности мерених параметара узорака прве зоне, у односу на узорке друге зоне. Fattet et al. (2011) су утврдили постојање веће варијације у вредностима мерених параметара код површинског слоја. Вредности коефицијента варијације параметара отпор при продору игле, указују да узорци друге зоне имају мању варијацију у односу на узорке прве зоне. До сличних запажања дошли су Materechera и Mloza-Banda (1997).

Распони вредности чврстоћа земљишта на смицање су релативно велики на шта указује коефицијент варијације чије вредности прелазе 30% код узорака обе зоне, што указује на систематски утицај неопаженог фактора. На овако велики степен варијабилности података вероватно су утицали различити временски термини током којих су узимани узорци што је условило различите вредности тренутне влажности земљишта (табела 1). Zimbone et al. (1996) су у својим истраживањима дошли до сличних опажања.

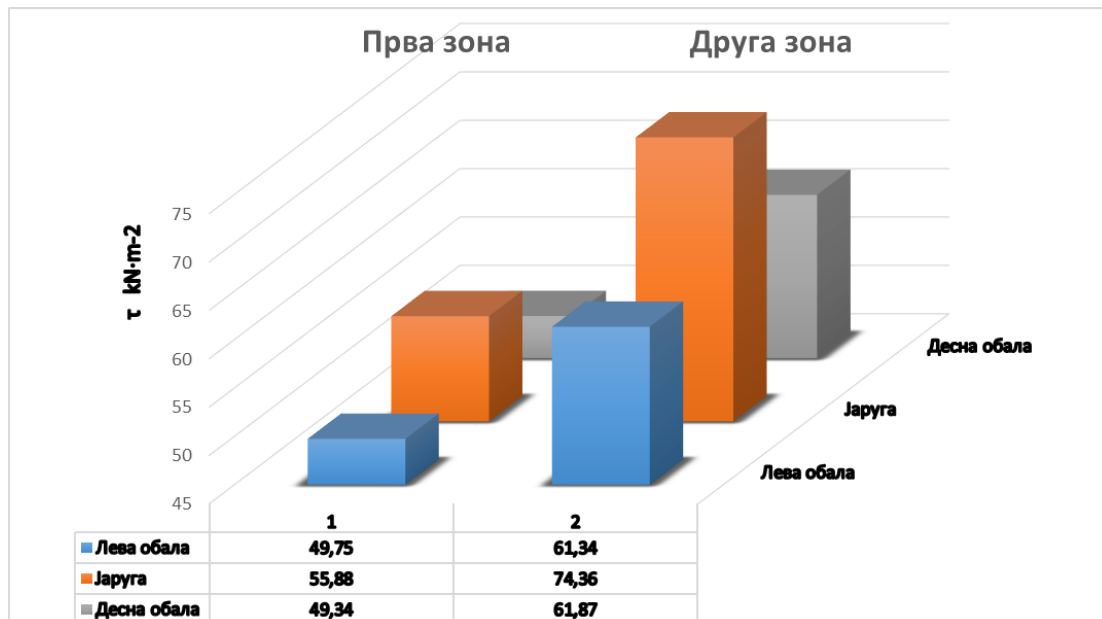
Генерално посматрано, забележене су веће вредности чврстоће земљишта на смицање добијене пенетрометром од вредности установљених крилном сондом, што су утврдили и Vahedifard et al. (2016).



Овакво запажање изнели су у свом раду и Zimbone et al. (1996) образложивши да се применом ручне крилне сонде на танки површински слој земљишта, који одговара висини крила (3-4 mm), отпорна сила земљишта манифестује током торзионог кретања крила, док се код ручног пенетрометра, дејством вертикалног притиска на подлогу, детектује компресиона и смичућа сила истовремено. Посматрајући коефицијент варијације уочава се да су вредности добијене пенетрометром уједначеније у односу на вредности добијене крилном сондом, што су у својим истраживањима установили и Ding и Loehr (2019).

Табела 2. Статистички индикатори мерених параметара

Статистички индикатори	Прва зона		Друга зона	
	$\tau$ [kN·m <sup>-2</sup> ]	R [kN·m <sup>-2</sup> ]	$\tau$ [kN·m <sup>-2</sup> ]	R [kN·m <sup>-2</sup> ]
Средња	51,66	292,15	66,10	324,60
Медијана	48,26	283,39	63,99	313,81
Максимална	97,86	419,72	172,49	441,30
Минимална	11,58	159,36	13,51	215,75
Стандардна варијација	18,87	67,12	23,93	69,66
Коефицијент варијације	36,53	22,98	36,20	21,46

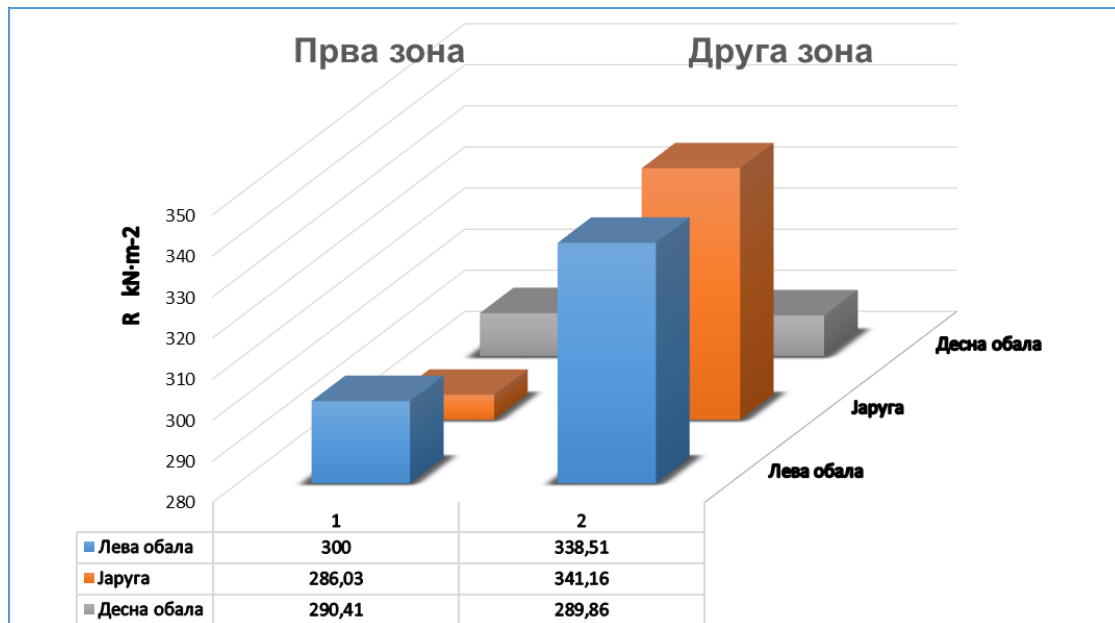


Слика 3. Средње вредности  $\tau$  прве и друге зоне

На основу средњих вредности напона смицања узорака прве зоне и друге зоне, приказаних на слици 3, уочава се да су више вредности код узорака из јаруга у односу на узорке из обала. Ово се може објаснити утицајем више фактора на вредности чврстоће земљишта на смицање и отпора при продору игле. У литератури се, као фактори са највише утицаја, истичу тренутна влажност земљишта и запреминска маса (Zimbone et al., 1996; Materechera and Mloza-Banda, 1997; Unger and Jones, 1998; Amacher and O'Neill, 2004; Knäpen et al., 2007; Vanapalli and Oh, 2011; Da Silva et al., 2016; Paul et al., 2018; Jie et al., 2018).

На слици 4 приказане су средње вредности параметра добијених применом цепног пенетрометра. Код групе узорака прва зона вредности су ниже у јаруги у односу на вредности на обалама. У другој зони ситуација обрнута, те се бележе веће вредности у јаруги у односу на обалу. Такође, уочава се да су

вредности код узорака леве обале (обе зоне) веће у односу на вредности узорака десне обале. Код вредности напона смицања (слика 3) обале имају готово идентичне вредности у обе зоне. Анализиране вредности приказане на сликама 3 и 4, указују да је земљиште јаруга отпорније на ерозионе процесе у односу на обале. Ово се може објаснити тиме што се при деловању ерозионих процеса у јарузи, односе слабо везане честице, чиме се изнова долази до „здравице“ односно слојева земљишта који нису деградирани и поседују већу отпорност земљишта на смицање. Земљиште обала је осетљивије на ерозионе процесе нарочито уколико се угрози (деградира) биљни покривач.



Слика 4. Средње вредности R прве и друге зоне

Спроведеном нелинеарном регресионом анализом добијен је модел који најбоље описује статистичку зависност између променљивих чврстоће земљишта на смицање и отпор при продору игле свих посматраних узорака (једанчина 1).

$$\tau = (10,682 - \frac{935,38}{R})^2 \quad (1)$$

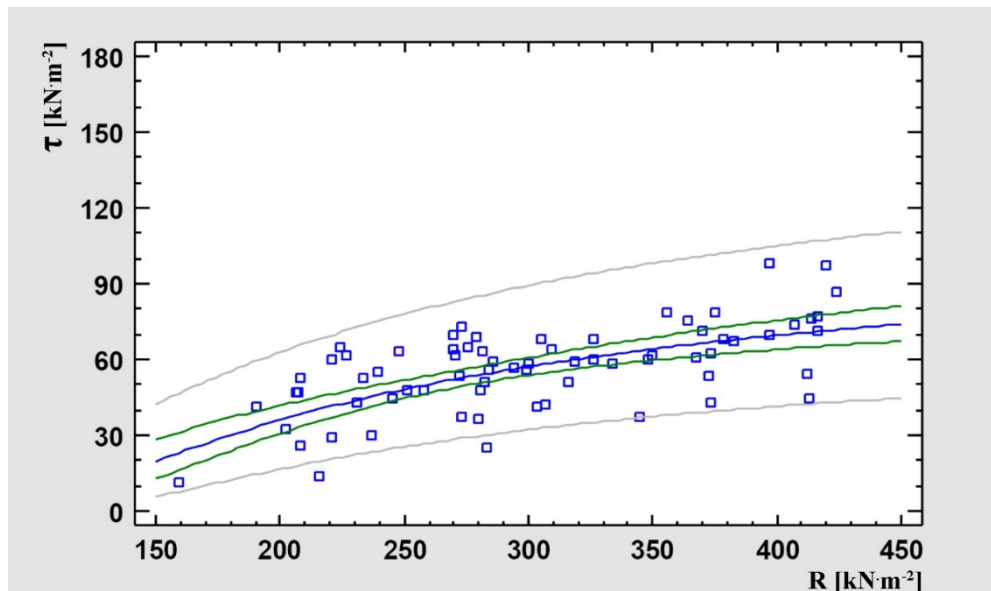
где је  $\tau$  зависна променљива,  $R$  независна променљива.

Коефицијент корелације приказаног модела износи  $r = 0,65$ , што указује на постојање значајне везе између варијабли. Коефицијент детерминације  $r^2 = 0,42$  указује да је 42,00% варијансе две променљиве заједничко (слика 5). Vachmann et al. (2005) су утврдили високе статистичке зависности изражене линеарним једначинама, између променљивих чврстоћа земљишта на смицање и пенетрационог отпора, са коефицијентом корелације од  $r = 0,57$  до чак  $r = 0,95$ , у зависности од типа земљишта.

Предности коришћења ручне крилне сонде и џепног пенетрометра, за утврђивање отпорности земљишта на смицање, огледа се у могућности примене на тешко приступачним теренима, затим код површинских слојева земљишта који се због присуства вегетације тешко узоркују, као и кроз призму једноставности и брзине вршења мерења. Знатно је брже коришћење ручног пенетрометра, док се приликом коришћења ручне крилне сонде доста времена „губи“ на чишћење крила после сваког извршеног мерења (око 2 min), на шта су указали и Zimbone et al. (1996). Предности коришћења ових апарата у геотехници, у специфичним условима, истакао је и Sarsby (2013). Повезивање механичких параметара, са могућношћу настанка ерозионих процеса, је у потпуности оправдано када се ради о испитивањима на узорцима мање величине (површине), што се постиже применом ручне крилне сонде и ручног пенетрометра (Misra and



Rose, 1995). Чврстоћа земљишта на смицање је кључни параметар у формирању браздасте ерозије (Zimbone et al., 1996). Значај ручних апарата за мерење чврстоће земљишта на смицање и пенетрациону отпорност земљишта истакли су Bachmann et al. (2005) и Vaz et al. (2011).



Слика 5. Статистичка зависност параметара чврстоће земљишта на смицање и отпора при продору игле укупног броја узорка

#### 4. ЗАКЉУЧАК

Механички параметри мерени помоћу ручне крилне сонде и џепног пенетрометра имају опсег вредности чврстоће земљишта на смицање  $\tau = 11,58 - 172,42 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$  и отпора при продору игле  $R = 159,36 - 441,30 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ . На основу добијених резултата може се закључити да су узорци земљишта из јаруга (обе зоне) показали већу отпорност на смицање од узорка са обала, сем код узорка прве зоне мерених џепним пенетрометром, што указује да су узорци из јаруга отпорнији на ерозионе процесе у односу на узорке обала. Значај коришћења приручних апарата огледа се кроз могућност једноставне и брзе карактеризације стања земљишта и оцене отпорности на ерозионе процесе, на шта указује добијена статистичка зависност између вредности добијених мерењима помоћу ручне крилне сонде и џепног пенетрометра са коефицијентом корелације  $r = 0,65$  и коефицијентом детерминације  $r^2 = 0,42$ . Теренска мерења приручним апаратима дају задовољавајуће вредности које се могу користити за процену тренутног стања земљишта као и његове отпорности на ерозионе процесе (еродибилност земљишта). Такође, ови приручни апарати се могу користити и за процену осетљивости земљишта на друге облике механичке деградације као што је збијање, појава колотрага и заптивање земљишта.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Agassi, M., Bradford, J.M. (1999). Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil & Tillage Research*; Vol. 49; p. 277 – 287
- Alaoui, A., Rogger, M., Peth, S., and Blöschl, G. (2018). Does soil compaction increase floods? A review. *Journal of Hydrology*, Vol. 557; p. 631 – 642. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.052>

- Amacher, M.C., O'Neill, K.P., (2004). Assessing Soil Compaction on Forest Inventory & Analysis Phase 3 Field Plots Using a Pocket Penetrometer. *Research Paper RMRS-RP-46WWW. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 7*
- Bachmann, J., Contreras, K., Hartge, K.H., MacDonald, R. (2005). Comparison of soil strength data obtained in situ with penetrometer and with vane shear test. *Soil & Tillage Research Vol. 87; p. 112 – 118; doi:10.1016/j.still.2005.03.001*
- Bogunovic, I., Pereira, P., Kistic, I., Sajko, K., Sraka, M. (2018). Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia). *Catena. Vol. 160; p. 376 -384; http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.009*
- Da Silva, W., Bianchini, A., Da Cunha C.A., (2016). Modeling and correction of soil penetration resistance for variations in soil moisture and soil bulk density. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering. Vol. 36; no. 3; p. 449-459. ISSN: 1809-4430 (on- line) Doi:http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n3p449-459/2016*
- Ding, D., and Loehr, J.E. (2019). Variability and Bias in Undrained Shear Strength from Different Sampling and Testing Methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 145 (10): 04019082 DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002121*
- Fattet, M., Fu, Y., Ghestem, M., Ma, W., Foulonneau, M., Nespoulous, J., Le Bissonnais, Y., Stokes, A. (2011). Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. *Catena. Vol. 87; p. 60 - 69; doi:10.1016/j.catena.2011.05.006*
- Fell, R., Hanson, G., Herrier, G., Marot, D., Wahl, T., (2013). Relationship between the erosion properties of soils and other parameters. *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees; 10.1002/9781118577165.ch5.*
- Gajić, B., Milivojević, J., Bošnjaković, G., Matović, G. (2005). Zbijenost zemljišta različitih teksturnih klasa u zasadima maline ariljskog malinogorja. *Poljoprivredna tehnika, Broj 2; str. 25 – 30; UDK: 631.312:669.8*
- Goudie, A. (2004). Encyclopedia of Geomorphology. Vol. 1 A–I. *International Association of Geomorphologists; ISBN 0–415–32737–7*
- Govers, G., Everaert, W., Poesen, J., Rauws, G., De Ploey, J., and Lantier, J.P. (1990). A Long Flume Study of the Dynamic Factors Affecting the Resistance of a Loamy Soil to Concentrated Flow Erosion. *Earth Surface Processes and Landforms. Vol. 15, p. 313 – 328; 0197-9337/90/040313-16\$08.00*
- Han, S., Han, H., Page-Dumroese, D.S. and Johnson, L.R. (2009). Soil compaction associated with cut-to-length and whole-tree harvesting of a coniferous forest. *Canadian Journal of Forest Research. Vol. 39; p. 976 – 989; doi:10.1139/X09-027*
- Heimsath, A.M., Whipple, K.X. (2019). Strength matters: Resisting erosion across upland landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms. Vol. 44; Issue 9; p. 1748 – 1754; https://doi.org/10.1002/esp.4609*
- Hosseini, M., Naeini, S.A.M., Dehghani, A., Khaledian, Y. (2016). Estimation of soil mechanical resistance parameter by using particle swarm optimization, genetic algorithm and multiple regression methods. *Soil & Tillage Research. Vol. 157; p. 32 - 42; http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.11.004*
- Jie, W., Binglin, S., Jinlin, L., Shasha, L., Xiubin, H. (2018). Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities: A case study in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Catena. Vol. 166 p. 124 – 133; https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.021*
- Knapen, A., Poesen, J., Govers, G., Gyssels G., Nachtergaele, J. (2007). Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Science Reviews. Vol. 80; p. 75 – 109; doi:10.1016/j.earscirev.2006.08.001*
- Leonard, J., Richard, G. (2004). Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. *Catena. Vol. 57; p. 233–249*
- Liu, G., Xu, M., Ritsema, C. (2003). A study of soil surface characteristics in a small watershed in the hilly, gullied area on the Chinese Loess Plateau. *Catena. Vol. 54; p.31–44*
- Materechera, S.A., Molza-Banda, H.R. (1997). Soil penetration resistance, root growth and yield of maize as influenced by tillage system on ridges in Malawi. *Soil & Tillage Research. Vol. 41; p. 13 – 24*
- Misra, R.K., Rose, C.W. (1995). An Examination of the Relationship between Erodibility Parameters and Soil Strength. *Aust. J. Soil Res., Vol. 33; p. 715 – 732*

- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E., Folly, A.J.V (1998). The European Soil Erosion Model (EUROSEM): *documentation and user guide*. Silsoe College, Cranfield University
- Nadal-Romero, E., Regues, D., Marti-Bono, C., and Serrano-Muela, P. (2007). Badland dynamics in the Central Pyrenees: temporal and spatial patterns of weathering processes. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 32; p. 888 – 904; DOI: 10.1002/esp.1458
- Paul, O.K., Mao, H., Li, L. and Ma, G. (2018). Relationship Between Soil Moisture Content and Penetration Resistance on Verisols. *ASABE Annual International Meeting Sponsored by ASABE Detroit, Michigan; Paper Number: 1800017; p. 13; DOI: https://doi.org/10.13031/aim.201800017*
- Sarsby, R.W. (2013). Environmental Geotechnics. *Second edition, ICE Publishing, ISBN 978-0-7277-4187-5, http://dx.doi.org/10.1680/eg.41875.001*
- Shah, A. N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., Bukhari, M.A., Tung, S.A., Hefeez, A., Souliyanonh, B. (2017). Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 24 (11); p. 10056 – 10067; doi:10.1007/s11356-017-8421-y
- Sun, L., Zhang, G., Luan, L., Liu, F. (2016). Temporal variation in soil resistance to flowing water erosion for soil incorporated with plant litters in the Loess Plateau of China. *Catena*. Vol. 145; p. 239 – 245; http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.016
- Torri, D., Santi, E., Marignani, M., Rossi, M., Borselli, L., Maccherini, S. (2013). The recurring cycles of biancana badlands: Erosion, vegetation and human impact. *Catena*. Vol. 106; p. 22 – 30; doi:10.1016/j.catena.2012.07.001
- Unger, P.W., Jones, O.R. (1998). Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum. *Soil & Tillage Research*. Vol. 45; p. 39 – 57; PII S0167-1987 97. 00068-8
- Uusitalo J., Ala-Ilomäki J., Lindeman H., Toivio J., Siren M. (2019). Modelling soil moisture – soil strength relationship of fine-grained upland forest soils. *Silva Fennica*. vol. 53; no. 1 article 10050. https://doi.org/10.14214/sf.10050
- Vahedifard, F., Howard, I.L., Badran, W.H., Carruth, W.D., Hamlehdari, M., Jordan, B.D. (2016). Strength indices of high-moisture soils using handheld gauges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Ground Improvement*. Vol. 169; Issue GI3; p. 167 – 181; http://dx.doi.org/10.1680/jgrim.14.00033
- Vanapalli, S.K., Oh, W.T. (2011). A Simple Technique for Estimating Matric Suction of Unsaturated Fine-Grained Soils Using Pocket Penetrometer. *Advances in Unsaturated Soil, Geo-Hazard, and Geo-Environmental Engineering. Geotechnical Special Publication No. 217 ASCE*
- Vaz, C.M.P., Manieri, J.M., de Maria, I.C., Tuller, M. (2011). Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*. Vol. 166; p. 92-101; doi:10.1016/j.geoderma.2011.07.016
- Verachtert, E., Van Den Eeckhaut, M., MArtinez-Murillo, J.F., Nadal-Romero, E., Poesen, J., Devoldere, S., Wijnants, N., Deckers, J. (2013). Impact of soil characteristics and land use on pipe erosion in a temperate humid climate: Field studies in Belgium. *Geomorphology*. Vol. 192; p. 1 – 14; http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.02.019
- Watson, D.A., Laflen, J.M. (1985). Soil Strength, Slope, and Rainfall Intensity Effects on Interrill Erosion. *Transactions of the ASAE* Vol. 29 (1); p. 0098 – 0102; doi: 10.13031/2013.30109
- Wilson, G.V., Wells, R.R., Dabney, S.M., Zhang, T. (2019). Filling an ephemeral gully channel: Impacts on physical soil quality. *Catena*. Vol. 172; p. 164 – 173; https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.006
- Zhang, C., Wang, X., Zou, X., Tian, J., Liu, B., Li, J., Kang, L., Chen, H., Wu, Y. (2018). Estimation of surface shear strength of undisturbed soils in the eastern part of northern China's wind erosion area. *Soil & Tillage Research*. Vol. 178; p. 1–10; https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.014
- Zimbone, S.M., Vickers, A., Morgan, R.P.C., Vella, P. (1996). Field investigations of different techniques for measuring surface soil shear strength. *Soil Technology*. Vol. 9; p. 101 – 111.
- Живановић, Н. (2021). *Отпорност земљишта као индикатор механизма настанка ерозионог процеса*. Докторска дисертација одбрањена на Универзитету у Београду Шумарском факултету.