



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
POLJOPRIVREDNI FAKULTET



*Marko M. Kostić*

**RAZVOJ SISTEMA ZA POZICIONO  
MERENJE MEHANIČKOG OTPORA  
ZEMLJIŠTA**

*doktorska disertacija*

Novi Sad, 2014. godine



**UNIVERZITET U NOVOM SADU  
POLJOPRIVREDNI FAKULTET**

**KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska dokumentacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada (dipl., mag., dokt.): VR	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora: AU	Marko M. Kostić
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): MN	Dr Lazar Savin, vanredni profesor Dr Milan Tomić, vanredni profesor
Naslov rada: NR	Razvoj sistema za poziciono merenje mehaničkog otpora zemljišta
Jezik publikacije: JP	Srpski
Jezik izvoda: JI	Srpski / Engleski
Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje: UGP	AP Vojvodina
Godina: GO	2014.
Izdavač: IZ	Autorski reprint
Mesto i adresa: MA	Poljoprivredni fakultet, Trg Dositeja Obradovića 8, 21000 Novi Sad
Fizički opis rada: FO	11 poglavlja / 254 strana / 63 tabela / 157 slika / 277 navoda literature / 3 priloga/ biografija
Naučna oblast: NO	Biotehničke nauke
Naučna disciplina: ND	Poljoprivredna tehnika
Predmetna odrednica, ključne reči: PO	Otpor vuče, precizna poljoprivreda, GIS, GPS, osobine zemljišta, razvoj sistema, konstrukcija, kartiranje
UDK	338.43: 658.2:616-001.35(043.3)
Čuva se: ČU	Biblioteka Poljoprivrednog fakulteta, Univerziteta u Novom Sadu



Važna napomena: VN	Nema
Izvod: IZ	<p>Tekovine savremene biljne proizvodnje dovele su do tzv. „osiromašenja i fizičkog zagađenja“ zemljišta što se manifestuje stalnim smanjivanjem njegove plodnosti. U istoj meri primetan je porast ukupnog i specifičnog mehaničkog otpora obrade zemljišta što se odražava na veći utrošak energije i niži kvalitet obrade. Jedini način da se poveća ukupna poljska produktivnost na ekološki održiv način, u uslovima ograničenih prirodnih resursa, je maksimiziranje efikasnosti primene određene agrotehničke mere. Iskorak u odnosu na konvencionalnu proizvodnju je svakako proizvodnja po principima precizne poljoprivrede. Preduslov za kvalitetnu primenu precizne poljoprivrede je prethodno utvrđen pouzdan sistem prikupljanja velikog broja prostorno orjentisanih podataka u polju. Merenjem otpora obrade zemljišta uz prostorno lociranje svakog dobijenog podataka, može se unaprediti i pojednostaviti proces prikupljanja poljskih informacija za potrebe naučnih istraživanja ili pak precizne poljoprivrede. Ukoliko se uspešno definišu modeli zavisnosti otpora obrade od osobina zemljišta, broj potrebnih uzoraka se može značajno smanjiti.</p> <p>U ovoj disertaciji prikazan je proces razvoja originalnog mernog sistema koji je namenjen za merenje otpora vuče (otpor obrade) u toku operacije obrade zemljišta sa mašinama II ili III kategorije uz geografsko lociranje svakog merenja. Razvoj sistema tekao je u sledećim fazama. Prvo je osmišljen, dizajniran i izrađen mehanički ram koji je potom opremljen dinamometrima i akvizicijskom opremom visoke tačnosti. Merni sistem bio je podvrgnut višestrukome testiranju u laboratoriji i polju. Laboratorijskim testiranjem dobijena je merna karakteristika, tj. obavljena je kalibracija mernog rama. Poljski testovi su sprovedeni kako bi se utvrdila funkcionalnost i pouzdanost mehaničke konstrukcije sa aspekta prikopčavanja, nošenja i rada sa različitim mašinama. Takođe, proveravana je verodostojnost podataka o otporima vuče poređenjem sa modelima predviđanja definisanim prema važećim standardima. Sprovedena su komparativna ispitivanja različitih mašina u različitim zemljišnim uslovima kako bi se dokazalo da je sistem sposoban da te različitosti izmeri. Vrhunac u razvojnom procesu je bilo poljsko merenje otpora vuče i fizičkih parametara zemljišta uz primenu GPS tehnologije pozicioniranja i GIS tehnologije geostatističke analize za svrhu kartiranja.</p> <p>Rezultati dobijeni tokom višegodišnjeg razvojnog procesa koji je podrazumevao veliki broj testiranja</p>



	<p>nedvosmisleno pokazuju da je kao krajnji ishod dobijeno novo, potpuno originalno i funkcionalno rešenje mernog uređaja, odnosno sistema kao celine. To znači da je sistem svojim karakteristikama postigao unapred postavljene ciljeve koji se odnose na lako rukovanje, robusnost, visoku tačnost merenja, mobilnost, univerzalnost primene za različite mašine i primenjivost za potrebe precizne poljoprivredne proizvodnje. S obzirom na to da su tokom eksploatacije uočeni određeni nedostaci, date su preporuke u kom pravcu bi trebalo da se kreće dalje usavršavanje postojećeg rešenja ili tokom izrade novih.</p>
Datum prihvatanja teme: DP	25. 06. 2013.
Datum odbrane: DO	
<p>Članovi komisije: (ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status) KO</p>	<p><b>predsednik:</b> Dr Nedeljko Malinović, redovni profesor, uža n. o. Poljoprivredna tehnika, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad</p> <hr/> <p><b>mentor:</b> Dr Lazar Savin, vanredni profesor, uža n. o. Poljoprivredna tehnika, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad</p> <hr/> <p><b>mentor:</b> Dr Milan Tomić, vanredni profesor, uža n. o. Poljoprivredna tehnika, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad</p> <hr/> <p><b>član:</b> Dr Milan Martinov, redovni profesor, uža n. o. Inženjerstvo biosistema, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad</p> <hr/> <p><b>član:</b> Dr Dušan Rakić, docent, uža n. o. Analiza i verovatnoća, Tehnološki fakultet, Novi Sad</p> <hr/>





**UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF AGRICULTURE**

**KEY WORD DOCUMENTATION**

Accession number: ANO	
Identification number: INO	
Document type: DT	Monograph documentation
Type of record: TR	Textual printed material
Contents code: CC	PhD. Thesis
Author: AU	Marko M. Kostić
Mentor: MN	Savin Lazar, PhD, associate professor Milan Tomić, PhD, associate professor
Title: TI	Development of a soil mechanical resistance measuring system with global positioning
Language of text: LT	Serbian
Language of abstract: LA	English / Serbian
Country of publication: CP	Republic of Serbia
Locality of publication: LP	Province of Vojvodina
Publication year: PY	2014
Publisher: PU	Author's reprint
Publication place: PP	Faculty of Agriculture Trg Dositeja Obradovića 8, 21000 Novi Sad, Serbia
Physical description: PD	(number of chapters 11/ pages 254/ tables 63/ pictures 157/ references 277/ 3 appendix/ biography)
Scientific field SF	Biotechnical Sciences
Scientific discipline SD	Agriculture Engineering
Subject, Key words SKW	Draft resistance, precision agriculture, GIS, GPS, soil properties, system developing, construction, mapping
UC	338.43: 658.2:616-001.35(043.3)
Holding data: HD	Library of Faculty of Agriculture, University of Novi Sad
Note: N	None



Abstract:

AB

Achievements of modern crop production have led to the "impoverishment and physical contamination" of soil which are manifested by the constant decrease in soil fertility. Likewise, there is an evident increase in total and specific soil mechanical resistance of tillage which are reflected in higher energy consumption and lower quality of tillage. The only way to increase the total soil crop productivity in an environmentally sustainable way, is to maximize the effectiveness of production practices. Crop production by the principles of the Precision agriculture is a breakthrough compared to conventional production. Prior to application of Precision agriculture it is necessary to establish a reliable system for collecting a large number of spatially oriented data in the field. Measuring the soil tillage resistance with each obtained data spatially located, we can improve and simplify the process of collecting field information for the purposes of scientific research or Precision agriculture. If the model is successfully defined, based on depending on the resistance and characteristics of soil, the number of required samples can be significantly reduced.

In this thesis the development process of the original measurement system intended to measure the soil tillage resistance (resistance to treatment) during tillage operation with machines II or III category with the geographic location of each measurement is presented. The system was developed in the following stages. At first, mechanical frame was designed and built and after that it was equipped by dynamometers and acquisition equipment of high accuracy. The measuring system was subject of multiple testing in the laboratory and field. The result of laboratory tests is calibration characteristic of measuring system. Field tests were conducted to determine the functionality and reliability of mechanical constructions from the aspect of reconnecting, carrying and working with different machines. Also, validity of the measured draft resistance data was checked comparing it with the models which can predict the resistance according to the valid standards. Comparative studies involving the various machines and different soil conditions were also carried out. The final part of the development process is measuring the soil resistance and soil physical parameters using the GPS positioning technology and GIS geostatistical analysis technology for the purpose of mapping. The results obtained during the years of the development process which included a large number of tests clearly show that the obtained a new, completely original and functional solution



	<p>measuring device as well as the whole system. System characteristics achieved pre-set goals such as ease handling, robustness, high accuracy measurements, mobility, universality of application for the various machines and applicability for precision agricultural production. During exploitation, some minor failures have been identified, and therefore proper recommendations have been given in order to improve present device.</p>
<p>Accepted on Scientific Board on: AS</p>	<p>June 25, 2013.</p>
<p>Defended: DE</p>	
<p>Thesis Defend Board: DB</p>	<p><b>president:</b> PhD Nedeljko Malinović, full professor, Scientific field - Agriculture engineering, Faculty of Agriculture, Novi Sad</p> <hr/> <p><b>mentor,</b> PhD Lazar Savin, associate professor, Scientific Field - Agriculture engineering, Novi Sad</p> <hr/> <p><b>mentor,</b> PhD Milan Tomić, associate professor, Scientific Field - Agriculture engineering, Faculty of Agriculture, Novi Sad</p> <hr/> <p><b>member:</b> PhD Milan Martinov, full professor, Scientific Field - Biosystem engineering, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad</p> <hr/> <p><b>member:</b> PhD Dušan Rakić, assistant professor, Scientific Field - Analysis and probability, Faculty of Technology, Novi Sad</p> <hr/>



## Predgovor

Istraživanja prikazana u ovoj disertaciji su rezultat rada na projektu br. 114-451-2298/2011 čiji je naziv „Razvoj i primena mernog sistema za utvrđivanje otpora zemljišta po principu precizne poljoprivrede“ finansiran od strane Pokrajinskog sekretarijata za nauku i tehnološki razvoj i projekta TR31046, „Unapređenje kvaliteta traktora i mobilnih sistema u cilju povećanja konkurentnosti, očuvanja zemljišta i životne sredine“, finansiran od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije.

Ovom prilikom se najiskrenije zahvaljujem svojim mentorima prof. dr Lazaru Savinu i prof. dr Milanu Tomiću na velikoj podršci i više nego korektnoj saradnji tokom izrade ove disertacije.

Veliku zahvalnost iskazujem svom profesoru, višegodišnjem saradniku, prof. dr Nedeljku Malinoviću koji je, kao rukovodilac projekta sa kog se najvećim delom finansirao razvoj i izrada mernog rama (br. 114-451-2298/2011), imao veliko poverenje u moj rad i time me dodatno motivisalo da istrajem do kraja.

Prof. dr Milanu Martinovu i prof. dr Mihalu Mešiju se iskreno zahvaljujem na korisnim i krajnje dobronamernim savetima.

Posebnu zahvalnost upućujem doc. dr Dušanu Rakiću na izdvojenom vremenu, razumevanju, dostupnosti i posvećenosti pri proučavanju problematike geostatističke analize.

Zahvalnost dugujem firmi "Majevica" za kvalitetno izrađen merni ram, dipl. inž. Hotimiru Ličenu iz firme "TRC" za pomoć tokom obrade podataka i dipl. inž. Ivanu Soskiću iz firme "Livona" na pomoći pri radu u GIS programima.

Hvala kolegama sa Departmana za poljoprivrednu tehniku na pomoći i podršci.

Iznad svih, najviše se zahvaljujem svojim roditeljima što su me naučili da se samo časnim i požrtvovanim radom dolazi do velikih rezultata, a da je sve ostalo obična improvizacija.

Poljoprivreda nije moja profesija, to je moj način življenja.

Autor



## SADRŽAJ

Korišćeni simboli i skraćenice .....	i-iii
<b>1. UVOD</b> .....	1
1.1. Ciljevi istraživanja .....	5
<b>2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA</b> .....	7
2.1. Teorijske postavke modela pomeranja zemljišta pri obradi .....	8
2.2. Analitički modeli procene mehaničkog otpora zemljišta .....	13
2.2.1. Široka vertikalna radna tela .....	13
2.2.2. Uzana i veoma uzana vertikalna radna tela .....	14
2.2.3. Diskosna radna tela .....	17
2.2.4. Plužna tela .....	18
2.3. Pregled rešenja sistema za merenje mehaničkog otpora zemljišta .....	22
2.3.1. Sistemi za merenje mehaničkog otpora u hodu .....	23
2.3.2. Sistemi za merenje mehaničkog otpora u mestu .....	50
<b>3. RADNE HIPOTEZE</b> .....	56
<b>4. MATERIJAL I METODE</b> .....	58
4.1. Eksperimentalne metode poljskog ispitivanja mernog sistema .....	58
4.1.1. TEST 1 - Preliminarno testiranje mernog sistema u operaciji oranja .....	59
4.1.2. TEST 2 - Usporedno merenje otpora vuče dva različita pluga .....	63
4.1.3. TEST 3 - Merenje otpora vuče po principima precizne poljoprivrede .....	66
4.1.4. TEST 4, 5 i 6 - Utvrđivanje zavisnosti otpora vuče, spektralne karakteristike signala otpora i signala sa akcelerometra od faktora radne brzine .....	73
4.2. Postupci merenja i merna oprema .....	77
4.2.1. Merenje sile .....	77
4.2.2. Merenje stvarne brzine ( $v_s$ ) i geografskih koordinata .....	78
4.2.3. Merenje teoretske brzine pogonskih točkova traktora, $v_t$ .....	79
4.2.4. Merenje proklizavanja pogonskih točkova traktora, $\delta$ .....	79
4.2.5. Merenje frekvencije oscilovanja konstrukcije radne mašine .....	80
4.2.6. Akvizicija podataka .....	80
4.2.7. Merenje dubine obrade .....	81
4.2.8. Pogonske i mašine za obradu zemljišta korišćeni tokom poljskih testiranja .....	82
4.2.9. Analiza hemijskog sastava .....	83
4.2.10. Mehanički sastav zemljišta .....	83



4.2.11. Određivanje zapreminske mase zemljišta i vlažnosti zemljišta .....	84
4.2.12. Određivanje sabijenosti zemljišta .....	85
4.3. Primenjeni metodi statističke analiza podataka .....	86
4.4. Planiranje eksperimenta (DoE-design of experiment) .....	87
4.5. Metod obrade sirovih geopodataka otpora vuče .....	91
4.6. Procedura obrade i prikazivanja geopodataka.....	93
4.6.1. Primena geografsko informacionog sistema (GIS) za potrebe određivanja prostorne varijabilnosti otpora i korespondentnih osobina zemljišta .....	95
<b>5. GEOSTATISTIČKA ANALIZA .....</b>	<b>100</b>
5.1. Istorijat razvoja geostatistike.....	100
5.2. Istorijat razvoja precizne poljoprivrede .....	101
5.3. Istorijat razvoja Geostatistike u okvirima precizne poljoprivrede .....	104
5.4. Osnove geostatistike.....	105
5.4.1. Stacionarnost .....	105
5.4.2. Unutrašnja varijabilnost i variogram.....	106
5.4.3. Oblik variograma .....	107
5.4.4. Kriging interpolacija .....	111
5.4.5. Ordinarni kriging.....	112
5.4.6. Upotreba dopunskih podataka za unapređenje procesa predviđanja u preciznoj poljoprivredi - kokriging.....	113
5.4.7. Variogram i unakrsni variogram .....	114
<b>6. MERNI RAM-RAZVOJ ORIGINALNOG KONSTRUKCIONOG REŠENJA .....</b>	<b>117</b>
6.1. Kreiranje ideje .....	118
6.2. Analiza postojećih rešenja.....	118
6.3. Projektovanje mehaničke konstrukcije .....	120
6.4. Tehnički problem koji se rešava primenom univerzalnog rama .....	122
6.5. Izlaganje suštine tehničkog rešenja .....	123
6.6. Detaljan opis modela.....	124
6.7. Statička analiza konstrukcije.....	126
6.8. Statička kalibracija mernog rama.....	129
<b>7. REZULTATI ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>132</b>
7.1. Rezultati poljskog testiranja mernog sistema (TEST 1) .....	132



7.2. Rezultati komparativnog merenja otpora vuče na plugovima sa različitom konstrukcijom plužnih tela (TEST 2).....	138
7.2.1. Rezultati metode planiranja eksperimenta (DoE) .....	144
7.3. Rezultati prostorne analize otpora vuče raonog pluga i fizičkih osobina zemljišta (TEST 3).....	152
7.3.1. Rezultati stanja fizičkih osobina zemljišta po tretmanima.....	153
7.3.2. Analiza podataka otpora vuče i klizanja po tretmanima .....	160
7.3.3. Komparativna analiza podataka za tretmane.....	164
7.3.4. Analiza parametara za konkretne geografske lokacije na nivou cele parcele ..	165
7.3.5. Analiza parametara za konkretne geografske lokacije po tretmanima.....	167
7.3.6. Semivariogramsko modelovanje geopodataka.....	172
7.3.7. Prostorno mapiranje prikupljenih geopodataka .....	179
7.3.8. Mapiranje parametra zapreminska masa zemljišta.....	179
7.3.9. Mapiranje parametra vlažnost zemljišta.....	182
7.3.10. Mapiranje parametra sabijenosti zemljišta.....	185
7.3.11. Mapiranje parametra sadržaja gline i praha u zemljištu.....	187
7.3.12. Mapiranje parametra sadržaja peska u zemljištu .....	190
7.3.13. Mapiranje vučnih otpora zemljišta.....	192
7.3.14. Mapiranje parametra klizanje pogonskog točka .....	195
7.4. Rezultati merenja otpora vuče u funkciji radne brzine (TEST 4) .....	197
7.5. Rezultati spektralne analize signala otpora vuče (TEST 5) .....	200
7.6. Rezultati spektralne analize signala sa akcelerometra (TEST 6) .....	203
<b>8. DISKUSIJA .....</b>	<b>206</b>
8.1. Tehničko rešenje mehaničke ramske konstrukcije (merni ram).....	206
8.2. Preliminarno poljsko testiranja mernog sistema .....	208
8.3. Komparativno merenje otpora vuče na plugovima sa različitim tipom plužnih tela	210
8.4. DoE u eksperimentu merenja otpora vuče plugova sa različitim plužnim telima.....	212
8.5. Prostorne analize fizičkih osobina zemljišta i otpora vuče raonog pluga .....	212
8.6. Semivariogramsko modelovanje geopodataka.....	215
8.7. Tematske karte-mape .....	218
8.8. Merenje otpora vuče u funkciji radne brzine .....	219
8.9. Spektralna analiza otpora vuče.....	221
8.10. Spektralna analiza oscilacija radnog tela .....	222



<b>9. ZAKLJUČAK</b> .....	224
<b>10. LITERATURA</b> .....	228
<b>11. PRILOZI</b> .....	249
Sklopni crtež kompletnog rama.....	250
Aksonometrijski prikaz modela rama.....	251
Rešenje o priznavanju patenta .....	252
<b>BIOGRAFIJA</b> .....	254





## KORIŠĆENI SIMBOLI I SKRAĆENICE

Oznaka	Jedinica	Naziv	
$r_s$	$m$	poluprečnik logaritamske spirale pri uglu $\theta$	
$r_0$		poluprečnik logaritamske spirale pri uglu $w=0$	
$\psi$	$rad$	ugao logaritamske spirale	
$\varphi$		ugao unutrašnjeg trenja zemljišta	
$\beta$		ekstenzija radijalne zone smicanja	
$F$	$N$	dejavujuća sila	
$p_0$	$N/m^2$	geostatički pritisak srazmeran težini zemljišta	
$q_n$		normalna komponenta pasivnog pritiska koja deluje u osnovi	
$W$	$N$	težina zemljišta koja deluje u zoni pomeranja zemljišta	
$\varepsilon$	$rad$	ugao osnove tela	
$b$	$m$	širina radnog tela	
$d_c$		kritična dubina	
$d$		dubina obrade	
$\alpha$	$^\circ$	nagibni ugao radnog tela u odnosu na horizontalu	
$w$	$m$	širina prodirućeg tela	
$r$		poluprečnik zone delovanja	
$\rho'$	$rad$	ugao bočnog dejstva	
$\gamma$	$kg/m^3$	zapreminska masa	
$c$	$N/m^2$	kohezija zemljišta	
$c_a$		adhezija zemljišta	
$q$	$N$	dodatno opterećenje	
$N_\gamma$	-	bezdimenzioni faktori (zavise od napadnog ugla $\alpha$ vertikalnog nosača)	
$N_c$			
$N_{ca}$			
$N_q$			
$\delta$	$^\circ$	ugao trenja zemljišta za različite materijale	
$Q$	$N$	bočna komponenta sile otpora za uzana tela	
$H$		komponenta otpora koja deluje na uzano vertikalno telo u horizontalnoj ravni	
$V$		komponenta otpora koja deluje na uzano vertikalno telo u vertikalnoj ravni	
$H_T$		ukupna horizontalna sila otpora koja deluje na uzana i veoma ozana vertikalna tela	
$H_{Ts}$		otpor vuče pri plitkoj obradi	
$H_{Td}$		otpor vuče pri dubokoj obradi	
$\lambda$		$^\circ$	ugao konkavnosti diska
$\theta$		ugao u odnosu na pravac kretanja	
$P$	$N$	pasivno opterećenje diska	
$D_p$		horizontalna komponenta otpora prodiranja diska	
$V_p$		vertikalna komponenta otpora prodiranja diska	



$S_p$	$N$	kosa komponenta otpora prodiranja diska
$D_s$		horizontalna komponenta otpora struganja zemljišta diskom
$V_s$		vertikalna komponenta otpora struganja zemljišta diskom
$S_s$		horizontalna komponenta otpora struganja zemljišta diskom
$D$		ukupna horizontalna sila otpora koja deluje na disk
$V$		ukupna vertikalna sila otpora koja deluje na disk
$S$		ukupna bočna sila otpora koja deluje na disk
$H_t$		ukupna sila otpora
$H_p$		otpor vrha raonika
$H_s$		otpor raonika
$H_{mc}$		otpor pluže daske
$H_e$		potencijalna energija zemlje i otpor sile trenja
$H_{ms}, H_{fs}, H_{cs}$		sile trenja koje izazivaju bočne komponente otpora
$l$		$m$
$\omega_p$	zahvat vrha raonika	
$\omega_s$	zahvat raonika	
$\zeta$	$^\circ$	ugao rezanja raonika
$g$	$m/s^2$	gravitaciono ubrzanje
$v$	$m/s$	brzina
$CI$	$MPa$	indeks konusa (otpor prodiranja konusa)
$WI$		indeks klina (otpor prodiranja klina)
$DI$		indeks diska (otpor prodiranja diska)
“on-the-go”	-	u hodu
“in-situ”	-	u mestu
$R$	-	koeficijent korelacije
$R^2$	-	koeficijent determinacije
$VRT$	-	tehnologije za promenljivu distribuciju repromaterijala
$PVT$	-	priključno vratilo traktora
$S$	$m$	pređeni put
$N_{imp}$	-	broj impulsa
$R_D$	$m$	dinamički prečnik točka
$t$	$s$	vreme
$v_s$	$m/s$	stvarna brzina
$v_t$		teoretska brzina
$R_{kor}$	$kN/m^2$	korigovani specifični otpor zemljišta
$R_{tr}$		trenutni specifični otpor zemljišta
$v_R$	$m/s$	referentna brzina
$v_{tr}$		trenutna brzina
$\varphi_{gš}$	$^\circ$	geografska širina
$\lambda_{gd}$	$^\circ$	geografska dužina
$\gamma(h)$	-	semivarijansa variograma na rastojanju „h“



$h$	$m$	rastojanje
$C$	-	prag
$C_0$	-	odstupanje
$a$	$m$	domet
$\hat{Z}(X_0)$	-	procenjena vrednost promenljive Z
$\lambda_i$	-	težinski faktor
$\gamma(x_i, x_j)$	-	semivarijansa od Z između tačaka $x_i$ i $x_j$
$\gamma(x_i, x_0)$	-	semivarijansa između i-te tačke i ciljane tačke $x_0$
$\bar{\gamma}(x_i, B)$	-	srednja vrednost varijanse između tačaka $x_i$ i posmatrani blok B
$\bar{\gamma}(B, B)$	-	srednja vrednost semivarijanse unutar bloka B
$\psi(x_0)$	-	Lagranžov multiplikator
$\sigma^2(B)$	-	kriging varijansa
$EC_a$	$mS/m$	električna provodljivosti zemljišta
$\hat{\gamma}_Z(h)$	-	eksperimentalni variogram od atributa za dati vektor rastojanja h
$N(h)$	-	broj parova podataka u klasi rastojanja i pravca za korišćeni vektor rastojanja h
$z_{CK}^*(u)$	-	procena ordinarnog kokriging-a
$Fx_i$	-	suma spoljašnjih sila koje se nalaze u ravni x
$L$	-	sila u levoj donjoj poluzi traktora
$D$	-	sila u desnoj donjoj poluzi traktora
$T$	$N$	sila u gornjoj upornoj poluzi
$G$	$N$	projekcija sile u gornjoj poluzi na prava kretanja traktora
$R$	$N$	ukupan otpor vuče
$F_i$	-	veličina koja se odnosi na strukturni sastav zemljišta
$A, B$ i $V$	-	vrednosti koje se odnose na tip oruđa za obradu
$T$	$m$	radni zahvat
$W$	$cm$	dubina obrade
$Q1, Q2, Q3$ i $Q4$	-	redukovani uzorci (svaka četvrta vrednost iz osnovnog skupa; par-nepar)
$H1$ i $H2$	-	redukovani uzorci (svaka druga vrednost iz osnovnog skupa; par-nepar)
$W$	-	osnovni skup uzoraka
$MP$	-	plug sa punom plužnom daskom
$SMP$	-	plug sa rešetkastom plužnom daskom
$ZM$	$g/cm^3$	zapreminska masa
$Wz$	$\%$	trenutna vlažnost uzorka
$T$	-	tretman TANJIRANJE
$O$	-	tretman ORANJE
$R$	-	tretman RAZRIVANJE
$p_0$	-	“nugget” vredost (početna varijansa)
$p$	-	prag varijanse



# 1. Uvod

**P**oljoprivredna proizvodnja se suočava sa sve većim izazovima u pogledu narastajućih potreba za hranom, biološkim materijalima i energijom. Korisnici poljoprivrednih proizvoda nisu samo obični potrošači, već bitan faktor koji utiče na metode proizvodnje u poljoprivredi kroz ekonomske, ekološke i političke mehanizme. U tom smislu, globalni zadatak poljoprivredne proizvodnje ne odnosi se samo na odezbeđivanje dovoljnih količina zdravstveno bezbedne hrane uz minimalne troškove, već i na smanjivanje štetnog uticaja takve proizvodnje na okolinu. Sa druge strane, primetna je tendencija smanjivanja plodnosti zemljišta što je najčešći uzrok stagnacije ili čak opadanja poljske produktivnosti u globalnim razmerama. Tekovine savremene njivske proizvodnje dovele su do tzv. „ispošćavanja i fizičkog zagađenja“ zemljišta što se manifestuje smanjenjem sadržaja humusa u zemljištu, degradaciju strukture zemljišnih agregata, povećanom sabijenosti i erozijom zemljišta, pojavom nepropusnih slojeva, smanjenjem biološke aktivnosti kao i nizom drugih negativnih pojava. U istoj meri primetan je porast ukupnog i specifičnog mehaničkog otpora obrade zemljišta što se odražava na veći utrošak energije i niži kvalitet obrade. Jedini način da se poveća ukupna poljska produktivnost na ekološki održiv način, u uslovima ograničenih prirodnih resursa koji stoje na raspolaganju poljoprivredi je maksimiziranje efikasnosti primene određene agrotehničke mere. Ako se zna da biljna proizvodnja na otvorenom polju predstavlja rezultat složenih interakcija između biljke, zemljišta, klime i primenjenih agrotehničkih mera, onda se može zaključiti da je sistem donošenja odluka o primeni neke mere ključan za održivost i produktivnost takvog sistema. Tekuća praksa pri donošenju odluka u biljnoj proizvodnji temelji se na tradicionalnim obrascima, prethodnom iskustvu, intuiciji individue, a najviše nasleđenim navikama iz prošlosti. Takav stohastičan način upravljanja zemljišnim resursima donosi rezultate koji nisu uvek u saglasnosti sa količinom uložених sredstava. Pored nepouzdanog sistema donošenja



odluka, konvencionalna poljoprivreda se oslanja na prosečne vrednosti parametara, neuvažavajući prostornu varijabilnost. Svaka parcela se tretira kao jedna proizvodna jedinica, čije se stanje ocenjuje globalno kao prosek stanja svih njenih delova, dok se mere primenjuju podjednako na svim njenim delovima. Rezultati su, shodno prisutnim varijabilnostima stanja zemljišta, veoma promenljivi, u krajnjem ishodu niži od očekivanog i mnogo niži od maksimalno mogućeg. U prilog varijabilnosti na jednoj parceli ide i proces ukрупnjavanja parcela sa pojavom velikih, visokoproduktivnih mašina, uklanjanjem granica na postojećim parcelama. Originalne granice su verovatno bile nekad prirodne granice između različitih tipova zemljišta, reljefa ili nekih drugih pejzažnih različitosti koje sada čine jedinstvenu proizvodnu celinu sa svim međusobnim različitostima. Dakle, sa povećavanjem veličine parcele, povećava se varijabilnost unutar jedne parcele (Oliver, 2010). U opštem slučaju, uprosečivanje nekonzistentnog sistema kakvo je zemljište, ima za posledicu ograničavanje potencijala resursa sa kojim se raspolaže.

Iskorak u odnosu na konvencionalnu proizvodnju je svakako proizvodnja po principima precizne poljoprivrede. Primenom najsavremenije tehnologije i naučnih dostignuća u okviru precizne poljoprivrede, bolje su objašnjeni odnosi varijabilnosti u polju i date su osnove lokalnog menadžmenta po principu: „broj pravilno donetih odluka po jediničnoj površini u jedinici vremena dovodi do povećanja neto prihoda“ (McBratney et al., 2005). Prostorno orjentisane informacije o zemljištu imaju viši naučni značaj sa aspekta boljeg prostornog sagledavanja i praćenja procesa degradacije. Upravljanje prostornim resursima i procesima izuzetno je složeno, zahteva integraciju velikog broja osnovnih naučnih disciplina i primenu skupa složenih tehnologija (Petrovački i Konjović, 2007). Da bi sve biljke dale svoj maksimum u toku proizvodnog ciklusa, neophodno je obezbediti optimum svih ključnih parametara, podjednako na svim delovima parcele (Hemmat i Adamchuk, 2008).

Iako sama ideja o upotrebi informacije o prostornoj varijabilnosti bitnih parametara zemljišta u cilju optimizacije njivske proizvodnje postoji još od 1929. godine (Linsley i Bauer, 1929), precizna poljoprivreda kao koncept nije mogla biti u punoj meri i na ekonomski prihvatljiv način ranije uvedena u konvencionalnu proizvodnju, pre svega zbog tehnološke zaostalosti u odnosu na zahteve koji se postavljaju ovim konceptom. Da bi se zadovoljili pomenuti principi, neophodna je primena novih tehnologija kao što su GPS (*Global Positioning System*), senzorska tehnologija, tehnologija promenljivih normi (*Variable Rate Application*) i informacijski „alat“ za očitavanje, tumačenje i prikazivanje varijabli (*Geographic Information System*).



U cilju optimizacije poljoprivredne proizvodnje, razvijane su nove metode. Tako je 70-tih godina prošlog veka, razvijena nova disciplina bazirana na statističkoj analizi prostornih podataka. Geostatističke tehnike bile su inicijalno razvijene za potrebe geoloških istraživanja (*Journal i Huijbregts, 1978*), a potom ubrzo uvedene i u poljoprivredi (*Burgess i Webster, 1980; McBratney i Webster 1981*). Svrha upotrebe geostatističkih alatki je da se pomoću njih sa mogu predvideti prostorne raspodele karakteristika zemljišta na onim delovima na kojima nije obavljeno uzorkovanje ili *in-situ* merenje. *Buchter (1991)* navodi da su pojedinačni uzorci zemljišta najčešće prostorno zavisni i da ih treba tretirati kao prostorno povezana merenja što predstavlja osnovu za kompleksnu analizu prostorne varijabilnosti zemljišta. Samo razumevanje i modelovanje varijabilnosti zemljišnih osobina ima malu upotrebnu vrednost u preciznoj poljoprivredi, ukoliko se one ne mogu staviti u korelaciju sa fenomenima kao što su vlažnost zemljišta, mehanički sastav, bilans graniva, itd.

Varijabilnosti u polju potiču od različitih izvora, a pripisuju se dejstvu čoveka i prirodnih faktora. Prirodni faktori najdominantnije utiču na promenljivost proizvodnje. Tu se pre svega misli na fizička svojstva zemljišta koja utiču na prirodne procese: kretanje vode, pristupačnost vode i hraniva, efikasnost herbicida, razvoj korena, erozija, itd. Ljudska aktivnost ima jednako snažan uticaj na proizvodnju kao i sve pojave koje se dešavaju u zemljištu. Nejednako sabijanje zemljišta kao neminovna posledica upotrebe teške visokoproduktivne mehanizacije utiče na varijabilnost prinosa neke kulture (*Savin et al., 2008; Savin et al., 2009a; Savin et al., 2009b, Savin et al., 2010; Savin et al., 2011*). Aplikacija đubriva nije uvek ujednačena po parceli (uticaj vetra, različita distribucija granula na širini zahvata, nepravilno sklapanje prohoda).

Preduslov za kvalitetnu primenu precizne poljoprivrede je prethodno utvrđen pouzdan sistem prikupljanja prostornih informacija u polju (*Kostić et al., 2014*). Da bi se mogla razumeti poljska varijabilnost potreban je ogroman broj validnih podataka različitih parametara (*Clark, 1999*).

Istraživanja ekološke sredine kakvo je zemljište, u praksi se svodi na uzimanje prostorno diskontinualnih uzoraka od kojih se dobijaju podaci koji se predstavljaju kontinualno u prostoru (*Oliver i Webster, 2014*). Za određivanje fizičkog stanja zemljišnih slojeva u istraživačkom radu najučestalije se primenjuju *in-situ* metode direktnog merenja, npr. ručnim penetrometrom ili indirektnim određivanjem parametara iz uzoraka zemljišta uzetih u narušenom i nenarušenom stanju. Nedostaci ovih metoda jesu veliki utrošak vremena za dobijanje relativno malog broja diskontinualnih prostornih informacija. Nehomogena



struktura, neujednačen sadržaj vlage u slojevima kao i nejednako sabijanje može proizvesti ekstremne vrednosti *in-situ* merenih parametara koji kao takvi ne predstavljaju realnu sliku stanja, jer su suštinski odraz lokalnog stanja zemljišnog specifikuma (Kostić et al., 2014). S obzirom na to da se radi o ručnim tehnikama merenja, neophodna je naknadna obradu podataka što dodatno povećava mogućnost nastajanja subjektivne greške (Campbell i O'Sullivan, 1991). Prednost je u tome što se početno stanje zemljišta minimalno narušava, tj. ostaje neporemećeno. Primenom "on-the-go" tehnike merenja otpora obrade zemljišta, može se unaprediti i pojednostaviti proces prikupljanja poljskih informacija za potrebe naučnih istraživanja ili pak potrebe precizne poljoprivrede. Merenje otpora obrade uz istovremeno određivanje geografske lokacije dobijenih vrednosti, može dopineti pojednostavljuvanju postupka terenskog istraživanja kroz smanjenje potrebnog broja uzoraka. Informacija o otporu može se koristiti kao surogat informacija o stanju nekog poljoprivrednog zemljišta jer zavisi od njegovog fizičko-biološkog stanja (Lapen et al., 2001a). Veliki broj autora dokazuje u svojim istraživanjima da vlažnost, zapreminska masa, mehanički sastav, kao i druge fizičke osobine zemljišta, nedvosmisleno utiču na mehanički otpor mašina za obradu (Rockström et al., 1999; Gaston et al., 2001; Mouazen et al., 2004; Kazuhiko 2008; Mzuku et al., 2005; Raper et al., 2005; Chung et al., 2006; Topakci et al., 2010). Otpor zemljišta, može biti korišćen kao alat za prepoznavanje različitih tipova zemljišta. Detaljne mape otpora daju jasnu sliku o prostornoj orijentaciji nepropusnih slojeva kao i drugih anomalija u zemljištu (Kostić et al., 2012). Osim toga, mape otpora vuče mogu se koristiti kao kriterijum za lociranje kritičnih područja koja zahtevaju posebne popravne mere prema protokolima precizne poljoprivrede (Van Bergeijk et al., 2001, Hanquet et al., 2004).

Merenje otpora obrade zemljišta za različite mašine ima višestruk ekonomski značaj. Vrednost otpora vuče neke mašine u konkretnim zemljišnim uslovima je važan parametar za ocenu performansi konkretne mašine (Naderloo et al., 2009). Studija autora Perfect et al. (1997) sa uspehom definiše potošnju energije na osnovu srednje vrednosti otpora zemljišta. S obzirom da troškovi nabavke mehanizacije značajno povećavaju troškove proizvodnje, podaci o otporu vuče mašina za obradu u različitim zemljišnim uslovima mogu pomoći proizvođačima kod racionalne nabavke traktora i mašina za obradu i njihove efikasne eksploatacije (Alimardani et al., 2008, Kheiralla et al., 2003; Onwualu et al., 1998; Sahu et al., 2006).

Tehnologije, tehnički sistemi i mašine za obradu zemljišta su predmet stalnih istraživanja. Iako je globalna tendencija da se redukuje, obrada zemljišta i dalje predstavlja najsloženiju



agrotehničku meru koja izaziva kontraverzne stavove u naučnim krugovima. Takođe, obrada zemljišta je i najskuplja operacija na koju se troši preko 30% od ukupne energije u biljnoj proizvodnji. Kako bi se povećala efikasnost obrade, danas se ulažu veliki naponi ka usavršavanju postojeće i razvitku novih uređaja i sistema za obradu zemljišta (*Marković et al., 1995*). *Martinov et al. (1998)* navodi da je ispitivanje poljoprivrednih mašina i traktora neophodno da bi se dobili realni pokazatelji o njihovom kvalitetu, što je značajno kako za same proizvođače tako i za korisnike. Mehanički otpor zemljišta u konkretnom slučaju može poslužiti kao mera degradiranosti nekog zemljišta jer isključivo zavisi od fizičko-biološkog stanja zemljišta. Utvrđivanjem prethodnog stanja nekog zemljišta pomoću sistema za merenje otpora, moguće je smanjiti intenzitet obrade, unaprediti ekonomske i ekološke aspekte poljske proizvodnje kroz smanjenje utroška energije, zagađenja okoline, zaštitu strukture zemljišta, itd. Razni postupci utvrđivanja i vrednovanja resursa i antiresursa, te definisanje mera i sredstava za lokacijski specifičnu upotrebu repromaterijala još uvek su u fazi razvoja (*Ehlert et al., 2004*). Imajući u vidu da mehanički otpor zemljišta prvenstveno zavisi od sistematske jedinice zemljišta, sistema obrade, gajenih biljnih vrsta, klimatskih uslova i dr., istraživanja mehaničkog otpora zemljišta daće značajan doprinos racionalnom korišćenju energije i pravilnom korišćenju sredstava mehanizacije u cilju postizanja visokih, stabilnih i kvalitetnih prinosa gajenih biljaka i očuvanja zemljišta (*Kostić et al., 2012*).

### 1.1. Ciljevi istraživanja

Sa gledišta precizne poljoprivrede, fizičko – mehaničke osobine zemljišta koje imaju uticaj na kvalitet obrade, vodno – vazdušni režim, mikrobiološku aktivnost, pristupačnost hrane, a samim tim i na prinos, utrošak energije i na ekološke efekte jesu prostorno promenljivog karaktera koje se u naučnom istraživanju moraju tako i tretirati. Postojeća saznanja o uticaju fizičko - mehaničkih osobina zemljišta, sa stanovišta veličine otpora zemljišta, bila su zasnovana na prosečnim vrednostima i nisu podrazumevala preciznu lokaciju utvrđenih otpora. Istraživačkim radom u okviru disertacije težilo se razvitku referentnog mernog sistem kojim bi se unapredio kvalitet naučnih istraživanja fizičko-mehaničkih osobina poljoprivrednog zemljišta kao i praktičnoj upotrebljivosti dobijenih podataka. Istraživanja su išla u pravcu razvoja merne tehnike i metodologije obrade, tumačenje i prikaza dobijenih podataka. Očekivani rezultat istraživanja je originalno rešenje sistema koji daje veliku gustinu





vremenski realnih, prostorno orjentisanih podataka, pre svega o otporu obrade, a zatim i o drugim parametrima zemljišta koji bitno utiču na promene otpora i koji su važni pokazatelji degradiranosti. Sistem merenja lokalnih devijacija otpora odnosno, fizičko – mehaničkih i bioloških osobina zemljišta kao i njihovih međusobnih zavisnosti, poslužiće kao osnova za kreiranje programa (postupaka) ka očuvanju zemljišta. U istraživanje otpora zemljišta kreće se sa pretpostavkom da intenzitet otpora zemljišta na parceli varira u zavisnosti od tipa, vlažnosti, broja izvedenih tehnoloških operacija, vrste plodoređa, tipa radnog organa i izbora režima rada, i dr. Ovaj aspekt sagledavanja intenziteta i lokacije veličine otpora takođe je predmet istraživanja. Prema tome, ciljevi ove disertacije bili su:

- **da se dizajnira, razvije i verifikuje novi originalni merni sistem,**
- **da se odabere verodostojan metod merenja otpora i način obrade podataka i**
- **da se grafički prikažu i interpretiraju dobijeni rezultata merenja.**



## 2. Pregled dosadašnjih istraživanja

**R**azvojem napredne merno-akvizicione opreme koja je sve prisutnija u naučno-istraživačkom radu u oblasti poljoprivrede, merenje prostorne varijabilnosti otpora zemljišta postaje sve atraktivnija tema za mnoge istraživače širom sveta. Standardizovane metode koje se primenjuju za direktno određivanje parametra fizičkog stanja, vremenski su zahtevne kada se radi veliki broj merenja za potrebe prostornog mapiranja velikih površina. Indirektnim određivanjem parametara fizičkog stanja zemljišta, bitno se olakšava proces prikupljanja podataka sa parcele.

Senzori za određivanje fizičkog stanja zemljišta spadaju u uređaje koji tokom merenja narušavaju prvobitno stanje sopstvenim kretanjem kroz zemljište. To kretanje izaziva pojavu sile reakcije zemljišta koja se protivi kretanju tela. Sila reakcije je proizvod sile optora deformacije zemljišta usled smicanja slojeva, kidanja agregata, pomeranja zemljišta i sila trenja koja nastaje između zemljišta mernog elementa. Da bi se razumela reakcija zemljišta na deformaciju, potrebno je razumeti način kretanja zemljišta usled prolaska različitih geometrijskih oblika. Faktori koji izazivaju pomeranje zemljišta tokom obrade mogu se odrediti kroz analitičke modele predikcije sile otpora (*Gill i Vanden Berg 1968; Hettiaratchi i Reece, 1974; Plasse et al., 1985*), poluempirijske tehnike dimenzione analize (*Schuring i Emori, 1964; Wismer i Luth, 1972*), ili kroz eksperimentalne studije (*Alihamsyah et al., 1990*). Parametri se mogu generalno podeliti u četiri kategorije i to: geometrija radnog tela (napadni uglovi, dužine, interakcija radnih elemenata), stanje zemljišta (zapreminska masa, unutrašnje trenje, kohezija, sadržaj gline, distribucija agregata, sadržaj vode i organske materije), interakcija zemlje i radnog tela (trenje zemlje o metal, adhezija) i režimi rada (dubina i brzina). Gore navedeni parametri kao i njihova međusobna interakcija na kompleksan način utiču na pomeranje zemlje tokom obrade.

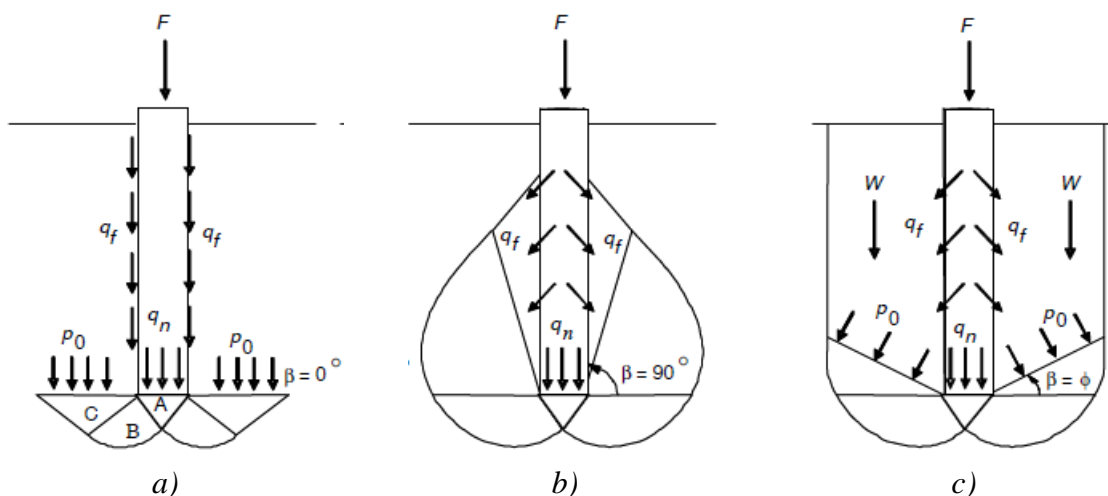


## 2.1. Teorijske postavke modela pomeranja zemljišta pri obradi

Pomeranje zemlje zbog pojave smičućih ravni je objašnjeno pomoću *Mohr-Coulomb*-ove teorije. Na osnovu ove teorije, mesto pomeranja zemlje moguće je odrediti ukoliko je poznat oblik pomerajuće površine. U većini slučajeva ova površina je nepoznata. Eksperimentalna istraživanja ukazuju da se smičuće površine u zemljištu koje je pod dejstvom radnog tela pojavljuju neposredno uz radno telo u vidu krivih linija i pravih linija (*Payne, 1956*). Ovo je tzv. logaritamsko spiralni model koji se koristi za procenu pomeranja zemlje pri obradi vertikalnim telima (*Terzaghi, 1943; Osman, 1964*) i procenu kapaciteta nošenja zemljišta tokom prolaska penetrirajućih vertikalnih tela (*Terzaghi, 1943; Meyerhof, 1951; Hu, 1965*). Jednačina logaritamsko spiralnog kretanja je:

$$r_s = r_0 e^{\psi \tan \varphi} \quad (2.1)$$

gde je:  $r_s$ - poluprečnik (m) logaritamске spirale pri uglu  $\Theta$ ;  $r_0$ - poluprečnik (m) logaritamске spirale pri uglu  $w=0$ ;  $\psi$  - ugao logaritamске spirale (u radijanima);  $\varphi$  - ugao unutrašnjeg trenja zemljišta (u radijanima).



Sl. 1. Modeli pomeranja zemlje pri dubokom fundiranju prema Terzaghi (a), Meyerhof (b), Hu (c):

$\beta$  - ekstenzija radijalne zone smicanja (radijani),  $F$  - dejstvujuća sila (N),  $p_0$  - geostatički pritisak srazmerno težini zemljišta ( $N/m^2$ ),  $q_f$  - prosečan jedinični pritisak na telu ( $N/m^2$ ),  $q_n$  - normalna komponenta pasivnog pritiska koja deluje u osnovi ( $N/m^2$ ),  $W$  - težina zemljišta koja deluje u zoni pomeranja zemljišta (N)

Model pomeranja zemljišta pri horizontalnom kretanju prizmatičog elementa i vertikalnom pomeranju konusnog elementa u homogenom zemljištu može se izvesti korišćenjem teorije



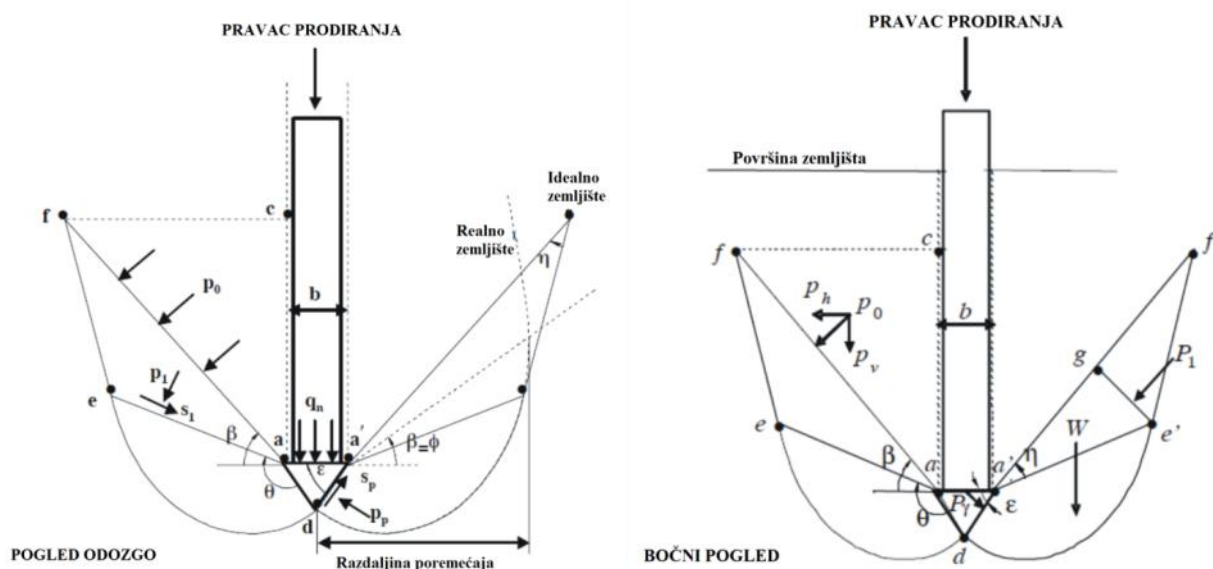
pomeranja zemlje pri kretanju uzanih vertikalnih elemenata i teorije kapaciteta nošenja zemljišta pri fundiranju. Na slici 1 prikazana su tri modela pomeranja zemlje koja su ustanovili neki od autora. Prvi tip kretanja zemlje (*Terzaghi, 1943*) se sastoji od oštrouglo centralne zone (A), dve aktivne zone radijalnog smicanja (B), i dve pasivne Rankinove zone radialnog smicanja (C), (sl. 1a). U slučaju plitkog fundiranja, otpor smicanja zemlje iznad nivoa osnove je zanemaren i zamenjen pritiskom koji deluje u nivou osnove.

*Mayerhof (1951)* tvrdi da pomeranje zemljišta nije u skladu sa prethodno pomenutim mehanizmom naročito kada se radi o kohezivnom materijalu sa povećanim unutrašnjim trenjem, zbog čega proširuje zonu radijalnog smicanja (sl. 1b). Za plitko fundiranje, u glini i pesku pokazuje se dobro slaganje sa teorijom. Za slučaj dubokog fundiranja, trenutni otpor je manji od predviđenog, a empirijski faktor stišljivosti je uključen radi smanjenja otpora smicanja.

Prema *Hu (1965)* zona radijalnog smicanja ograničena je do oblasti gde je bočno rastojanje od zone pomeranja zemlje do stuba maksimalno, a efekat težine zemljišta ( $W$ ) iznad zone pomeranja služi za izračunavanje otpora pomeranja osnove (sl. 1c). Teoretske vrednosti pokazuju dobro poklapanje kada se porede sa eksperimentalnim rezultatima u sličaju otpora rastresitog i zbijenog peska. Za vezivna zemljišta, procenjeni otpor treba korigovati sa faktorom koji zavisi od dubine.

*Chung i Sudduth (2006)* su unapredili postojeće modele pomeranja zemljišta pri kretanju prizmatičnog elementa (sl. 2a). Model se oslanja na prethodne ali i koristi koncept promenljive zone pomeranja i predstavlja funkciju težine zemljišta, kohezije, adhezije i operativne brzine.

Svaki član u modelu množi se odgovarajućim bezdimenzionim brojem koji predstavlja funkciju napadnog ugla oruđa, unutrašnjeg trenja zemljišta i trenja zemlje i metala. Takođe, model je razvijen za slučaj prodiranja konusnog elementa (sl. 2b). Razlika između ova dva modela je saglasna sa efektima različite geometrije (prizmatična i konusna), sa razlikom u geostatičkom pritisku i težinom zemljišta zbog različitog pravca delovanja (vertikalno i horizontalno).

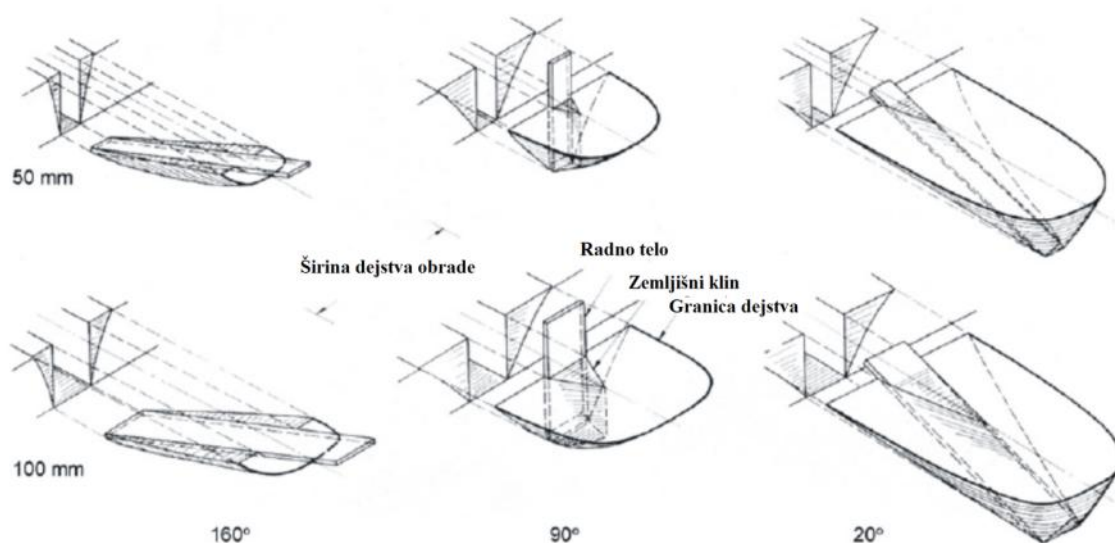


Sl. 2. Mehanizam pomeranja zemlje pri horizontalnoj penetraciji prizmatičnog vrha (a) i vertikalnoj penetraciji konusnog vrha (b):

$\beta$  - ekstenzija radijalne zone smicanja (radijani),  $\varepsilon$  - ugao osnove tela (radijani),  $\varphi$  - ugao unutrašnjeg trenja zemljišta (radijani),  $\eta$  -  $0,25\pi - 0,5\varphi$  (radijani),  $\Theta$  -  $0,75\pi - 0,5\varphi - \varepsilon + \beta$  (radijani),  $b$  - širina radnog tela (m),  $W$  - težina zemljišta koja deluje u zoni pomeranja zemljišta (N)

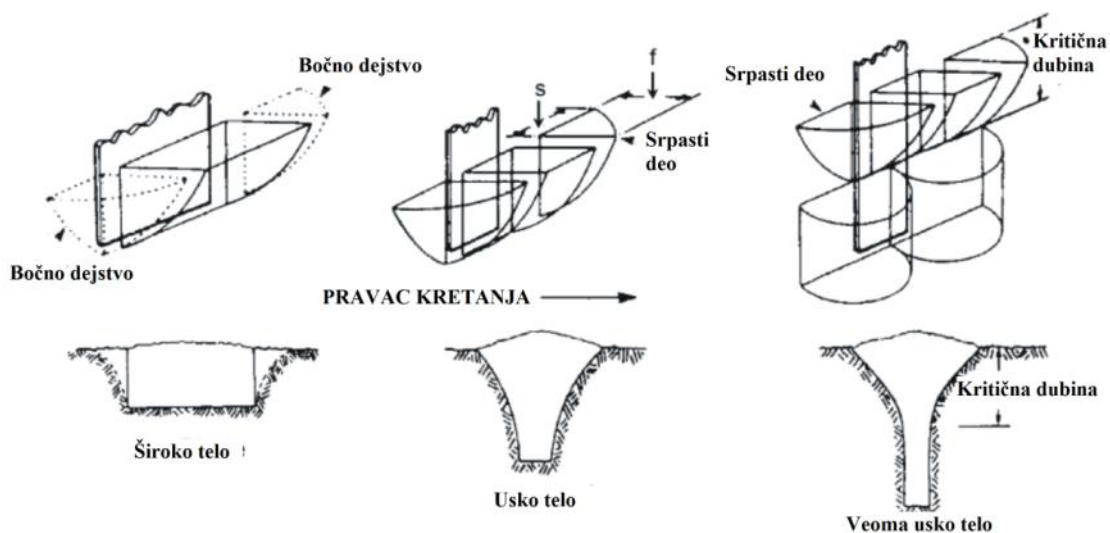
Godwin (2007) u analizi efekata pomeranja zemljišta pri kretanju prostog sečiva kroz zemljište, kao najuticajnije faktore uzima koeficijent odnosa širine vertikalnog nosača i dubine obrade ( $d/w$ ) i ugao oštrice ( $\alpha$ ) u odnosu na ravan zemljišta (sl. 3). Isti autor je podelio oruđa sa vertikalnim nosačem radnog tela na tri karakteristične kategorije zavisno od odnosa dubine obrade i širine zahvata i to na:

- široke kog kojih je  $d/w < 0,5$ ,
- uzane kod kojih je  $1 < d/w < 6$  i
- veoma uzane kod kojih je  $d/w > 6$ .



Sl. 3. Uticaj napadnog ugla vertikalnog tela širine 50 mm i 100 mm na modelu kretanja zemlje pri radu na dubini 150 mm (Payne i Tanner, 1959).

Ako se uzme primer sa krutim vertikalnim radnim telom ( $\alpha=90^\circ$ ) pri radu na malim dubinama ( $d/w=1$ ), zemljište se pomera unapred, bočno i nagore po jasno definisanim ravnima koje se rasprostiru od gornje strane oštrice prema površini zemljišta pod uglom od  $45^\circ$  (sl. 4). Ovaj model kretanja zemljišta naziva se „srpasti“. Srpasti model pomeranja zemljišta pri obradi vertikalnim telima, karakterističan je do određene dubine (*kritične dubine*). Na većim dubinama zemljište menja model pomeranja i počinje da se kreće samo bočno i unapred.



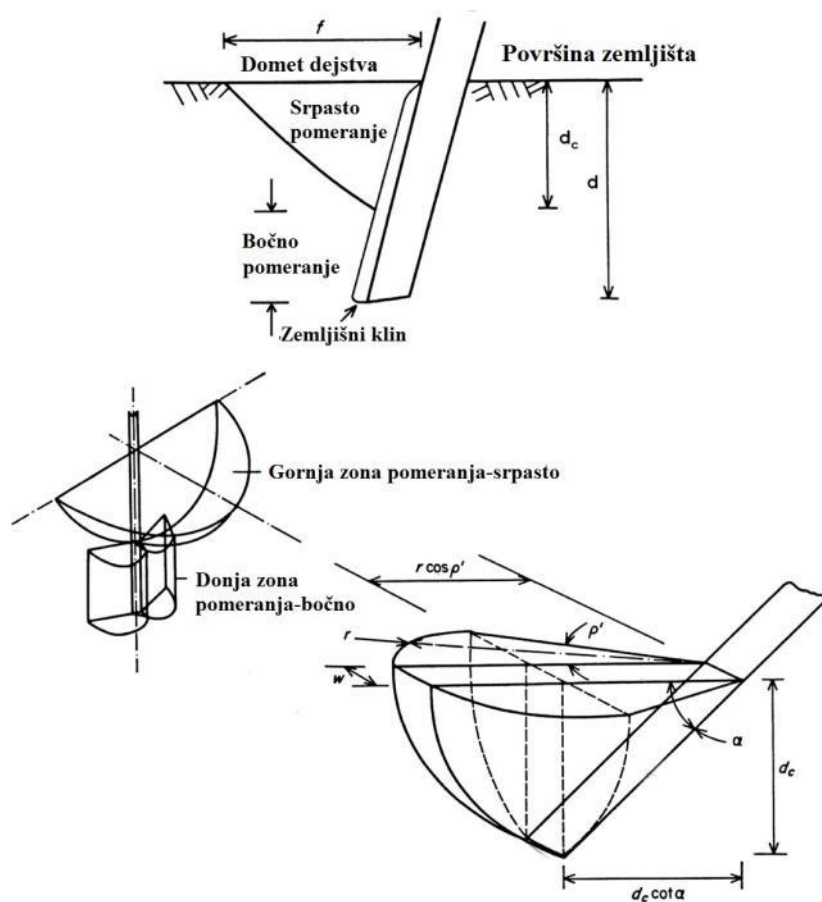
Sl. 4. Uticaj geometrije vertikalnog tela (dubina/širina) na pomeranje zemlje (Godwin u O'Dogherty, 2007)



Srpasti model pomeranja se javlja na onim dubinama obrade kada je otpor smicanja agregata pri kretanju na gore manji od otpora bočnog pomeranja.

Godwin i Spoor (1977) navode da je kritična dubina obrade ona dubina pri kojoj dolazi do izjednačavanja dva pomenuta otpora (sl. 5). Za kruta vertikalna tela sa dletastim elementom na vrhu, pri radu na dubini ispod kritične, model pomeranja zemljišta u površinskom sloju više zavisi od širine i nagibnog ugla vertikalnog radnog tela nego od dletastog elementa (Spoor i Godwin, 1978). Za veoma uzane vertikalna radna tela, prelaz sa srpastog modela pomeranja na bočno pomeranje zemljišta javlja se pri  $d/w > 6$  (Godwin i O'Doerty, 2007).

Pored odnosa  $d/w$ , kritična dubina se povećava sa smanjivanjem ugla  $\alpha$ , vlažnosti zemljišta i površinskog napona zemljišta, povećanjem zapreminske mase i smanjenjem operativne brzine (Smith et al., 1989). Takođe, kritična dubina zavisi i od tipa zemljišta. Owen (1988) je utvrdio da je kritična dubina na glinovitim zemljištima veća nego na peskovitim.



Sl. 5. Model pomeranja zemlje i pojava kritične dubine (Godwin i Spoor, 1977):  
 $d_c$  - kritična dubina (m),  $d$  - dubina obrade,  $\alpha$  - nagibni ugao radnog tela u odnosu na horizontalu (radijan),  $w$  - širina tela (m),  $r$  - poluprečnik zone delovanja (m),  $\rho'$  - ugao bočnog dejstva (radijan)



Saglasno konceptu kritičnog stanja zemljišta, priroda kretanja zemljišta zavisi od stepena stišljivosti i veličine graničnog napona. Vertikalni granični napon raste sa porastom operativne dubine, napadnog ugla radnog tela i napona smicanja u gornjim slojevima zemljišta (*Spoor i Fry, 1983*). *Stafford (1981)* je u svojim istraživanjima prepoznao dva modela kretanja zemljišta pri obradi krutim telom i to krto i tečno pomeranje.

## 2.2. Analitički modeli procene mehaničkog otpora zemljišta

U narednom tekstu biće prikazani različiti teorijski pristupi u definisanju matematičkih modela za predviđanje otpora zemljišta prema različitim vrstama (geometrijama) oruđa za obradu.

### 2.2.1. Široka vertikalna radna tela

Jednačina procene otpora izvedena od strane autora *Hettiaratchi et al. (1966)* i *Hettiaratchi i Reece (1974)* za slučaj dvodimenzionalnog pomeranja zemlje je rezultat ranijih istraživanja, zanovana na teoriji kapaciteta nošenja zemljišta. Obrazac (2.2) je složena računica za predviđanje pasivne sile pojednostavljena na obrazac koji izostavlja krajnje efekte.

$$P = (\gamma d^2 N_\gamma + cdN_c + c_a dN_{ca} + qdN_q)w \quad (2.2)$$

gde je:  $\gamma$ -zapreminska masa ( $\text{kg/m}^3$ );  $d$ -dubina obrade (m);  $c$ -kohezija  $c_a$ -adhezija zemlja-metal,  $q$ -dodatno opterećenje;  $N_\gamma$ -gravitacioni broj;  $N_c$ -kohezioni broj;  $N_a$ -adhezioni broj,  $w$ -širina radnog tela (m). Bezdimenzioni faktori  $N_\gamma$ ,  $N_c$ ,  $N_{ca}$  i  $N_q$  zavise od napadnog ugla vertikalnog nosača ( $\alpha$ ), te ugla unutrašnjeg trenja zemljišta ( $\varphi$ ) i izračunati su od strane *Hettiaratchi (1969)* za uglove  $\alpha$  i  $\varphi$  pri vrednostima ugla trenja ( $\delta$ ) zemlje o metal  $\delta=0$  i  $\delta=\varphi$ . Vrednosti N faktora su određene pomoću logaritamske interpolacije za vrednosti ugla  $\delta$  od  $0^0$  do vrednosti ugla  $\varphi$ . Zbog malih vrednosti adhezije između zemlje i metala, što za posledicu ima mali adhezije uticaj na ukupnu vrednost otpora  $P$ , *Hettiaratchi and Reece (1974)* su grupisali adhezivne i kohezivne članove u jednačini 2.3.

$$P = (\gamma d^2 N_\gamma + cdN_c + qdN_q)w \quad (2.3)$$

### 2.2.2. Uzana i veoma uzana vertikalna radna tela

Kod ovih nosača, pomeranje zemlje se javlja u tri dimenzije. Model predviđanja otpora utvrdili su *Payne (1956)*, *O'Callaghan i Farrely (1964)* i *O'Callaghan i McCoy (1965)* i





Hettiaratchi i Reece (1974). Ključni faktor kod predviđanja otpora za ove tipove nosača je koncept kritične dubine ( $d_c$ ). Ovo su prvi put razmatrili Zelenin (1950) i Kostritsyn (1956), a koncept je konačno definisan od strane O'Callaghan i McCullen (1956). Esencijalna karakteristika kritične dubine je pojava dva modela kretanja zemlje pri obradi vertikalnim uzanim telima i to:

- srpasto pomeranje u blizini površine zemljišta i iznad kritične dubine uz kretanje zemlje unapred, sa strane i nagore i
- bočno pomeranje zemlje ispod kritične dubine sa kretanjem unapred i sa strane tela.

Jednačinu za predviđanje otpora definiso je Godwin et al. (1984) i prikazao je kao dvokomponentnu reakciju u horizontalnoj i vertikalnoj ravni projekcije (jed. 2.4 i 2.5).

$$H = (\gamma d_c^2 N_\gamma + c d_c N_c + q d_c N_q) \times \left[ w + d \left\{ m - \frac{1}{3}(m-1) \right\} \right] \sin(\alpha + \delta) \quad (2.4)$$

$$V = -(\gamma d_c^2 N_\gamma + c d_c N_c + q d_c N_q) \times \left[ w + d \left\{ m - \frac{1}{3}(m-1) \right\} \right] \cos(\alpha + \delta) \quad (2.5)$$

Pozitivan predznak za obrazac "V" znači da je reakcija usmerena na gore, a negativna kada je reakcija usmerena na dole. Zbog pojednostavljenja obrasca nisu uključeni elementi adhezije metala i zemlje  $c_a w d_c \cos \alpha$  (za horizontalnu reakciju) i  $c_a w d_c \sin \alpha$  (za vertikalnu reakciju) jer predstavljaju mali udeo u ukupnom otporu. Član  $d \left\{ m - \frac{1}{3}(m-1) \right\}$  predstavlja efekat širine vertikalnog tela na bočno pomeranje zemljišta. Vrednosti  $m$  ( $m=f/d_c$ ) su veličine koje predstavljaju odnos dužine frontalne aktivne zone ( $f$ ) i kritične dubine ( $d_c$ ) koju su eksperimentalno odredili Godwin i Spoor (1977). Ahmed (1990) u obradi izrazito kohezivnih zemljišta ( $\varphi \approx 0$ ) vertikalnim oruđem pokazuje da je kritična dubina veoma mala sa neznatnim pomeranjem zemlje po srpastom modu. U tom slučaju, pomeranje zemlje je bilo bočno uz formiranje vertikalnog proreza u zemljištu do dubine obrade.

Bočna komponenta sile otpora je računata logaritamsko spiralnom metodom za kapacitet nošenja uzanog tela (Mayerhof, 1951). Ovakav pristup sagledavanja reakcije zemljišta rezultirao je jednačinom za bočno-horizontalnu komponentu sile  $Q$  (jed. 2.6).

$$Q = w c N'_c (d - d_c) + 0,5(1 - \sin \varphi) \gamma w N'_q (d^2 - d_c^2) \quad (2.6)$$

Vrednosti  $N'_c$  i  $N'_q$  su bezdimenzione i one se računaju po obrascima (Mayerhof, 1951):

$$N'_c = \cot \varphi \left[ \frac{(1 + \sin \varphi) e^{2\theta \tan \varphi}}{(1 - \sin \varphi \sin(2\eta + \varphi))} - 1 \right] \quad (2.7)$$



$$N'_q = \frac{(1 + \sin\varphi)e^{2\theta\tan\varphi}}{(1 - \sin\varphi \sin(2\eta + \varphi))} \quad (2.8)$$

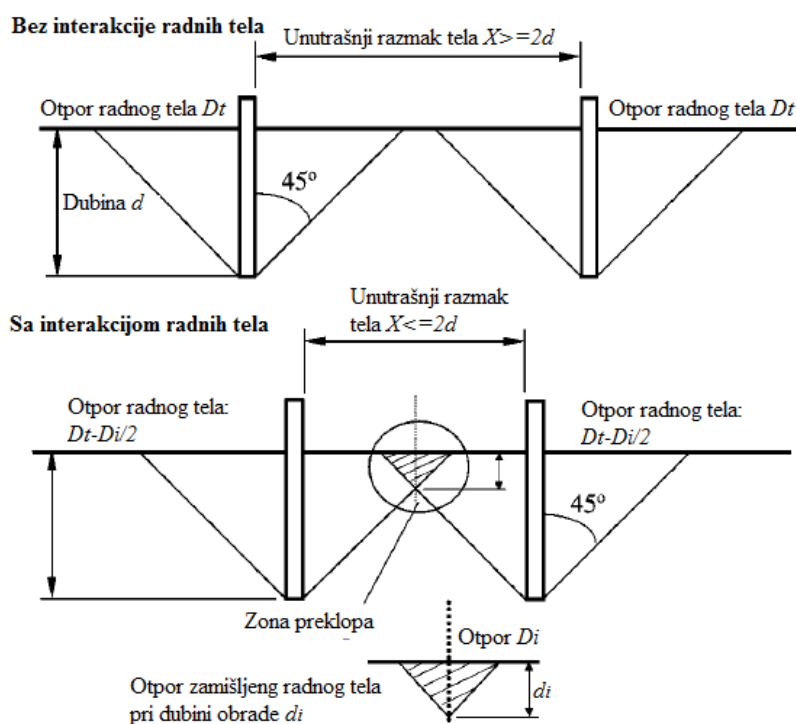
gde je  $\eta = \pi/4 - \varphi/2$ .

Ukupna horizontalna sila otpora koja deluje na uzana i veoma ozana vertikalna tela jednaka je zbiru horizontalne i bočne-horizontalne komponente (jed. 2.9).

$$H_T = H + Q \quad (2.9)$$

Članovi  $H$  i  $Q$  dati su u jednačinama 2.4 i 2.6.

Poznavanje kritične dubine je važno za određivanje komponenti sile otpora na vertikalnom oruđu. Autori *Godwin i Spoor (1977)* su kritičnu dubinu odredili eksperimentalnim putem. Inače to se može uraditi iterativnom procedurom ili diferencijacijom. Za određivanje kritične dubine neophodni su eksperimentalni podaci o dužni pukotina u funkciji nagibnog ugla tela ( $\alpha$ ). *O'Dogherty i Godwin (2003)* su koristili metode diferencijacije i pokazali su da vrednost kritične dubine  $d_c$  za poznatu vrednost  $c$ , značajno opada sa smanjenjem ugla trenja zemljišta ( $\varphi$ ). Uticaj kritične dubine na otpor se smanjuje sa smanjenjem kohezije jer je kritična dubina znatno manja kada je kohezija manja od 1.



Sl. 6. Model interakcije radnih tela pri vertikalnoj obradi (Godwin et al., 1984)

Relativni položaj vertikalnih tela na ramskoj konstrukciji ima značajan uticaj na efekat rada i veličinu otpora obrade. Za predviđanje sile, *Godwin et al., (1984)* polazi od pretpostavke da je  $d_c = d$  i u tu svrhu koristi modifikovano oruđe kako bi naglasio međusobnu interakciju



radnih elemenata. U ovoj analizi otpor vuče dobija se kao zbir otpora za svako pojedinačno telo od kojeg se oduzima ekvivalent otpora vuče potrebnog za rastresanje zone interakcije između radnih tela (sl. 6).

Obrazac za predviđanje sile otpora je (Godwin et al., 1984):

$$D = n_s H_{Ts} + n_d H_{Td} - n_i (\gamma d_c^2 N_\gamma + cd_c N_c + qd_c N_q) \times \left[ d_i \left\{ m - \frac{1}{3} (m - 1) \right\} \right] \sin(\alpha + \delta) \quad (2.10)$$

gde su članovi  $H_{Ts}$  i  $H_{Td}$  otpori vuče pri plitkoj i dubokoj obradi.

Navedeni matematički modeli predviđanja otpora nisu u sebe uključivali faktor radne brzine, odnosno faktor sile inercije na vertikalnim radnim telima zbog promene stanja zemlje. Ovo se mora uzeti u obzir pri kretanju iznad određene brzine. Schurning i Emori (1964) predlažu da to bude vrednost koja se računa kao  $\sqrt{5gw}$ . U slučaju širokih radnih tela McKeys (1985) predlaže dodatni član u osnovnom modelu (jed. 2.3) koji se odnosi na mehanička svojstva zemljišta a u sebe uključuje faktor brzine ( $\frac{\gamma v^2}{g} d N_a w$ ). Član  $N_a$  je funkcija od  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$  i  $m$  i računa se kao:

$$N_a = \frac{\tan\beta + ctg(\beta + \varphi)}{(\cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \delta) ctg(\beta + \varphi))(1 + \tan\beta ctg\alpha)} \quad (2.11)$$

gde je,

$$\tan\beta = \frac{1}{m - ctg\alpha} \quad (2.12)$$

Kako bi se ovakav pristup primenio na uzana tela, kada se pretpostavi da je dubina jednaka kritičnoj dubini ( $d=d_c$ ), Wheeler i Godwin (1996) su faktor inercije uvrstili u obrazac za izračunavanje zapremine rastrešenog zemljišta i efektivnu širinu radnog tela koje se računa kao  $w + 0,6d$ . Kranji obrazac za izračunavanje horizontalne i vertikalne komponente otpora je:

$$H = \left[ \begin{array}{l} (\gamma d^2 N_\gamma + cd N_c + qd N_q) \left( w + d \left( m - \frac{1}{3} (m - 1) \right) \right) \\ + \frac{\gamma v^2}{g} N_a d (w + 0,6d) \end{array} \right] \sin(\alpha + \delta) \quad (2.13)$$

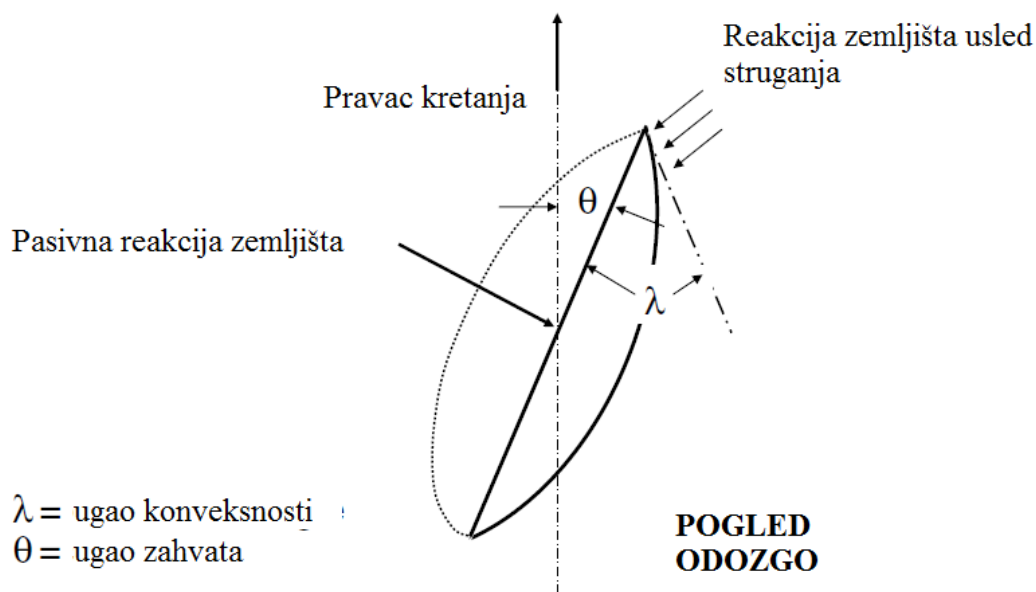
$$V = - \left[ \begin{array}{l} (\gamma d^2 N_\gamma + cd N_c + qd N_q) \left( w + d \left( m - \frac{1}{3} (m - 1) \right) \right) \\ + \frac{\gamma v^2}{g} N_a d (w + 0,6d) \end{array} \right] \cos(\alpha + \delta) \quad (2.14)$$



Obrazac za izračunavanje kritične brzine autora *Schuring i Emori (1964)* modifikovan je od strane autora *Wheeler i Godwin (1996)* tako da se kritična brzina pri kojoj se mora uzeti u obzir faktor inercije izračunava kao  $v_c = \sqrt{5g(w + 0,6d)}$ .

### 2.2.3. Diskosna radna tela

Postoji znatan broj istraživanja na temu određivanja otpora na diskosnim radnim telima zavisno od geometrije (*McCreeny 1959; McCreeny i Nichols 1959; Gill et al., 1978; Gill et al., 1979 i Gill et al., 1981*). Međutim do skoro nije bilo modela predikcije bazirani na mehaničkim osobinama zemljišta. Prvi model otpora definisao je *Godwin et al., (1987)*. Njime se razmatra reakcija zemlje pri pasivnom rezanju sa konkavnom stranom diska primenom korigovane teorije oštrice i reakcija koja se javlja zbog struganja zemlje konveksnom stranom diska primenom teorije kapaciteta nosivosti zemlje (sl. 7).



Sl. 7. Konceptualni model sila koje deluju na konkavni disk (*Godwin et al., 1987*)

*Godwin et al. (1987)* dao je izraz za pasivnu silu otpora rezanja koja deluje na konkavnu stranu diska, koji uzima u obzir uticaj ugla zahvata, poluprečnika  $R$ , dubine  $d$  i efektivne širine diska na pasivno opterećenje  $P$  (jed. 2.15).

$$P = (\gamma_i d^2 N_\gamma + cd N_c + (R - d) \gamma_f d N_q \sin \theta) \times 2(2Rd - d^2)^{0,5} \sin \theta \quad (2.15)$$

Prema *Godwin et al. (1987)*, obrasci za izračunavanje horizontalne, vertikalne i bočne pasivne komponente otpora su:

$$D_p = P \sin(\alpha + \delta) \sin \theta \quad (2.16)$$



$$V_p = -P \cos(\alpha + \delta) \quad (2.17)$$

$$S_p = P \sin(\alpha + \delta) \cos \theta \quad (2.18)$$

Na osnovu teorije kapaciteta nošenja zemlje, *Mayerhof (1961)* je prilagodio izraz za silu otpora struganja zemlje zadnjom stranom diska. Komponente sile otpora su:

$$D_s = V_s \tan(\alpha - \delta) \sin(\lambda - \theta) \quad (2.19)$$

$$V_s = q' A \sin \frac{\pi(\lambda - \theta)}{2\lambda} \quad (2.20)$$

$$S_s = V_s \tan(\alpha - \delta) \cos(\lambda - \theta) \quad (2.21)$$

Stoga je ukupna horizontalna sila otpora koja deluje na disk:

$$D = D_p + D_s \quad (2.22)$$

Ukupna vertikalna sila otpora:

$$V = V_p + V_s \quad (2.23)$$

Ukupna bočna sila otpora:

$$S = S_p + S_s \quad (2.24)$$

Autor *O'Dogherty et al. (1996)* daje detaljniju analizu geometrijskih parametara diska u odnosu na kontaktnu površinu sa zemljom na radnoj dubini. *Hettiaratchi i Alam (1998)* razvili su drugačiji pristup u označavanju geometrijskih članova diska uvažavajući pretpostavku da se zone rezanja i struganja mogu zameniti u ekvivalentnu režuće površine.

#### 2.2.4. Plužna tela

Postoji veliki broj studija u kojima se proučava fenomen otpora vuče raonog pluga. U najvećem broju slučajeva, došlo se do zaključka da sila otpora vuče raste eksponencijalno sa porastom operativne brzine (*Gill i Vanden Berg 1968; Kepner et al., 1982; Goryachkin 1968*). U svojim odvojenim studijama u kojima istražuju uticaj geometrije plužnog tela na intenzitet otpora vuče pluga, *Shöne (1966)* i *Shöne i Möller (1962)* jasno pokazuju kvadratnu vezu otpora vuče i radne brzine. *Gee Clough et al. (1977), Krastin (1973)* i *Larsen et al., (1968)* u svojim analizama uključuju bezdimenzijalni član koji predstavlja kvadratni izraz radne brzine.

*Oskoui i Witney (1982)* i *Oskoui (1982)* usvojili su model u kojem se karakteristike zemljišta inkorporiraju unutar kvadratne funkcije i koji uključuje parametar konusnog indeksa. Isti autori upotrebili su podatke od *Gee Clough et al. (1977)* i dobili prihvatljivu korelaciju između predviđene i izmerene sile otpora vuče. *Qiong et al. (1986)* i *Voorhees i Walker (1977)* takođe su opisali kvadratnu funkciju otpora vuče u odnosu na brzinu uvodeći

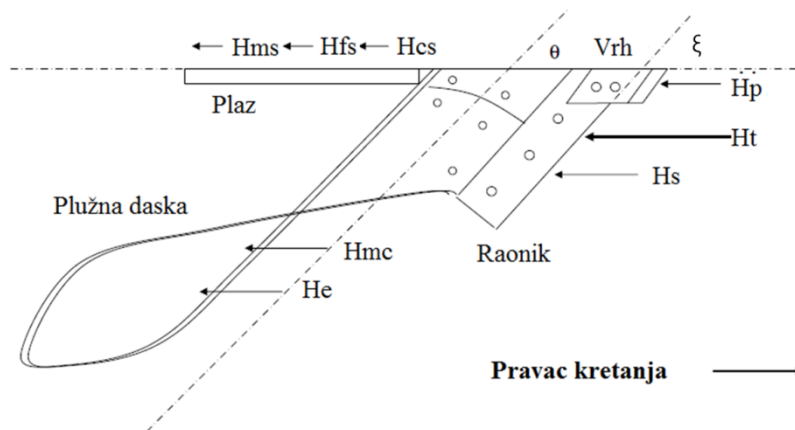


empirijske konstante i dodatne članove koji su u vezi sa vlažnosću zemljišta. *McKyes (1985)* napravio je model za koji predviđa silu potrebnu za ubrzavanje zemljišnog klina formiranog na oštrici širokog sečiva. S bzirom na to da je predviđena sila otpora funkcija sile inercije, to znači da je istovremeno i kvadratna funkcija brzine sečiva. Ovaj pristup je primenjen u modelu predikcije (*Wheeler i Godwin, 1996*) za sile koje deluju na vertikalna radna tela koji je pokazao dobro statističko podudaranje sa izmerenim vrednostima sile na nivou značajnosti od 5%.

*O'Callaghan i McCoy (1965)* su imali teoretski prilaz u kome su analizirali sile koje deluju na elementarne prizme unutar odsečene plastice tokom pomeranja po pluznom telu. Autori su u okviru rada napravili kompjuterski program za predviđanje ukupne sile koja će delovati na pluzno telo. *Gyachev (1985)* izložio je pojednostavljenu analizu kretanja zemlje po pluznom telu. *Desbiolles et al. (1999)* je razvio model za predviđanje otpora vuče na osnovu vrednosti o konusnom indeksu i referentnog indeksa sile koja deluje na standardno vertikalno radno telo. *Qiong et al. (1986)* je izložio u svom radu rigorozni matematički model kretanja zemlje po pluznom telu na osnovu kojeg se procenjuje komponenta sile otpora vuče.

Opšti princip prilikom predviđanja sile otpora na raonom plugu uključuje faktore osnovnih fizičkih osobina zemljišta i geometrijskih parametara pluznog tela. *Sieg (1982)* je primenio opštu jednačinu mehanike zemljišta koju su izveli *Godwin i Spoor (1977)* u svrhu predviđanja sile otpora koja deluje na kljun raonika i raonik. Saopštenja *Saunders et al. (2000)*, *Saunders (2002)* i *Godwin i D'Dogherty (2006)* u kojima se opisuje model predikcije otpora uključuje u sebe faktor brzine na način kao što su to predstavili *Wheeler i Godwin (1996)*.

*Godwin et al. (2007)* je razvio model predikcije sila reakcije zemljišta na pluzno telo uključujući u njega uticaj karakteristika zemljišta, faktora geometrije pluga i operative brzine. Model uključuje komponente sile koje deluju na raonik i vrh raonika, promenu stanja i potencijalne energije pri okretanju i podizanju plastice na pluznoj dasci i sile trenja koje deluju na kliznim površinama pluznog tela (raonik, daska i plaz, sl. 8).



Sl. 8. Komponente sile otpora vuče koje deluju na plužno telo:

$H_t$  - ukupna sile otpora;  $H_p$  - otpor vrha raonika;  $H_s$  - otpor raonika;  $H_{mc}$  - otpor plužne daske;  $H_e$  - potencijalna energija zemlje i otpor sile trenja;  $H_{ms}$ ,  $H_{fs}$ ,  $H_{cs}$  - sile trenja koje izazivaju bočne komponente otpora;  $l$  - dužina plužne daske;  $\omega_p$  - zahvat vrha raonika  $\omega_s$  - zahvat raonika;  $\xi$  - ugao rezanja raonika;  $\theta$  - ugao daske u odnosu na pravac kretanja

Takođe, model uključuje elemente radne brzine na kinetičku energiju zemljišta, odnosno otpor vuče. Praktično osnova ovog modela izvedena je u radu *Saunders et al. (2000)*. Osnovna karakteristika ovog modela je predviđanje sile otpora vuče pluga na manje rigorozan način. U modelu su uključene komponente zapreminske mase zemljišta  $\gamma$ , kohezije  $c$ , ugao napona smicanja  $\varphi$ , ugao trenja zemljišta o metal  $\delta$ , ugao trenja zemlje o zemlju  $\varphi_s$ , geometrijske faktore plužnog tela (nagibni uglovi kljuna raonika  $\alpha_p$  i raonika  $\alpha_s$ ), ugao plužne daske u odnosu na pravac kretanja  $\theta$ , dužina plužne daske  $l$ , radni zahvat i radna dubina kljuna i raonika ( $d_p, w_p$  i  $d_s, w_s$ ). Pored pomenutog, jednačina predikcije uključuje i faktor brzine  $v$ .

Ukupna sila otpora vuče  $H_t$  (kN) računa se po jednačini 2.25 kao:

$$H_t = H_p + H_s + H_{mc} + H_e + H_{cs} + H_{ms} + H_{fs} \quad (2.25)$$

gde je  $H_p$  (kN) sila otpora vuče koja deluje u centru otpora;  $H_{mc}$  (kN) je sila otpora vuče koja nastaje zbog pokretanja zemlje iz stanja mirovanja i sile trenja koja se javlja na plužnoj dasci;  $H_e$  (kN) je sila otpora vuče koja je rezultat porasta potencijalne energije plastice;  $H_{cs} + H_{ms}$  (kN) su komponente sile otpora koje predstavljaju silu trenja koju izazivaju bočne sile na raoniku i plužnoj dasci;  $H_{fs}$  (kN) je komponenta otpora koja nastaje zbog bočnog pomeranja plastice.

Pojedinačne komponente ukupnog otpora date su u nastavku.



$$H_p = \left[ \left( \gamma d_p^2 N_\gamma + c d_p N_c \right) \left\{ w_p + 0,55 d_p \left( m - \frac{(m-1)}{3} \right) \right\} + (\gamma v^2 N_a d_p / g) (w_p + 0,33 d_p) \right] \sin(\alpha_p + \delta), \quad (2.26)$$

gde je  $\gamma$  zapreminska težina zemlje u  $\text{kN/m}^3$ ;  $c$  je kohezija zemlje u  $\text{kN/m}^2$ ;  $d_p$  je dubina vrha raonika pluga u m;  $m$  je odnos rastojanja pukotina;  $v$  je radna brzina pluga u  $\text{m/s}$ ;  $g$  je gravitaciono ubrzanje u  $\text{m/s}^2$ ;  $\alpha_p$  je nagibni ugao raonika u stepenima;  $\delta$  je ugao trenja zemlje i metala u stepenima i  $N_\gamma$  i  $N_a$  su bezdimenzioni parametri.

$$H_s = \left( \gamma d_s^2 N_\gamma + c d_s N_{ca} + \frac{\gamma v^2 N_a d_s}{g} \right) w_s \sin(\alpha_p + \delta) \sin \beta, \quad (2.27)$$

gde je  $d_s$  radna dubina raonika u m;  $w_s$  je zahvat raonika u m;  $\beta$  je ugao oštrice raonika u odnosu na pravac kretanja u stepenima.

$$H_{mc} = (\gamma/g)(w_p d_p + w_s d_s) v^2 \{1 - (1 - \sin \theta \tan \delta) \cos \theta\}, \quad (2.28)$$

gde je  $\theta$  ( $^\circ$ ) srednja vrednost ugla plužne daske u odnosu na pravac kretanja pluga.

$$H_e = 2\gamma(w_p d_p + w_s d_s) d_s, \quad (2.29)$$

$$H_{cs} = \left( \gamma d_s^2 N_\gamma + c d_s N_{ca} + \frac{\gamma v^2 N_a d_s}{g} \right) w_s \sin(\alpha_p + \delta) \cos \beta \tan \delta, \quad (2.30)$$

$$H_{ms} = (\gamma/g)(w_p d_p + w_s d_s) v^2 \sin \theta (1 - \sin \theta \tan \delta) \tan \delta, \quad (2.31)$$

$$H_{fs} = l_\gamma (w_p d_p + w_s d_s) \tan \varphi_s \tan \delta, \quad (2.32)$$

gde je  $l$  (m) efektivna dužina plužne daske, a  $\varphi_s$  ( $^\circ$ ) ugao trenja zemlje o zemlju.

Komponenta sile otpora vuče  $H_p$  se odnosi na silu koja se javlja na vrhu raonika, a računa se kao sila koja deluje na uzani radni element (Wheeler i Godwin, 1996). Model uključuje član za predviđanje efekta inercije kao posledicu radne brzine. Izraz za  $H_p$  koristi opštu jednačinu mehanike zemljišta koju su detaljno opisali Godwin i O'Dogherty (2006). Jednačinu su izveli Godwin i Spooore (1977) i Godwin et al. (1984). Jednačina je nastala još kod ranijih istraživanja od strane Hettiaratchi et al. (1966), Hettiaratchi i Reece (1967), Hettiaratchi (1969) i Hettiaratchi i Reece (1974). Jednačinu za  $H_p$  su od tada modifikovali od strane Wheeler i Godwin (1996) na osnovu rezultata Saunders (2002) i pretpostavke da se zbog postojanja zida brazde smanjuje drobljenje zemlje za 45% pri srpastom kretanju.

Jednačina za komponentu otpora na raoniku  $H_s$  nastala je direktno iz osnovne jednačine mehanike zemljišta za široke radne elemente izvedene od strane Hettiaratchi i Reece (1974).

Komponenta otpora  $H_{mc}$  je sila potrebna za promenu stanja plastice iz mirovanja u kretanje pri pomeranju duž plužne daske. Pretpostavka je da se zemlja kreće duž daske skoro pravolinijski pod uglom  $\theta$  u odnosu na pravac kretanja sve do repa daske kada napušta dasku pod istim uglom.  $H_{mc}$  takođe predstavlja silu trenja zemlje o dasku koja je posledica sile pritiska nastale



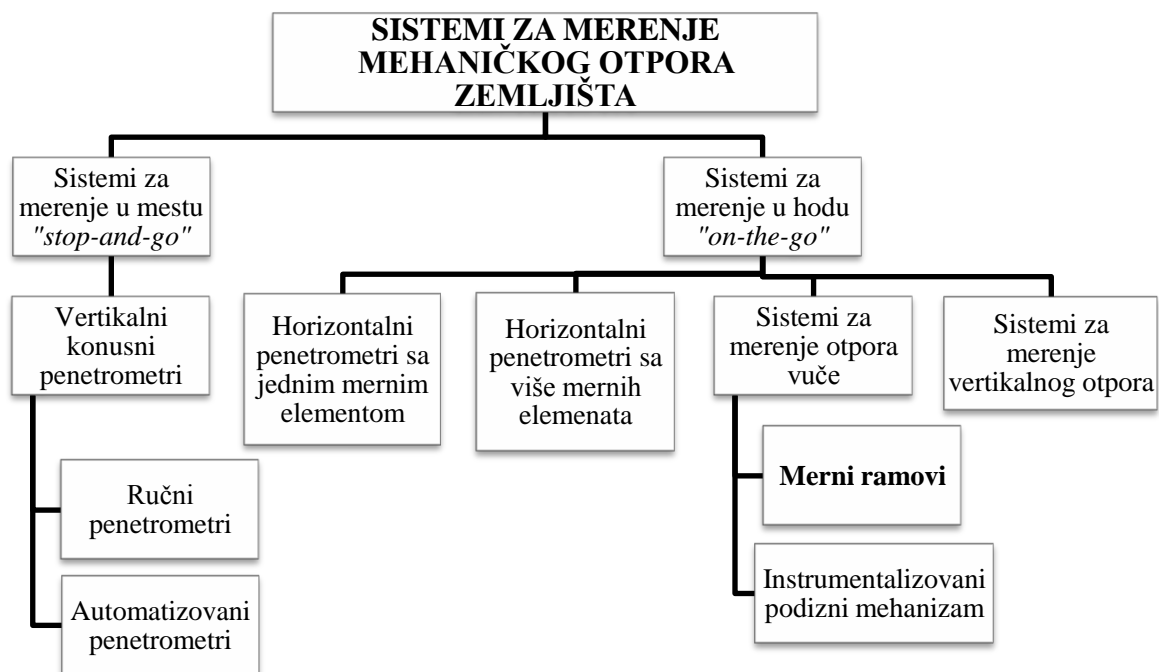


zbog promene pravca kretanja zemlje. Takođe, zbog podizanja plastice tokom kretanja po plužnom telu neophodna je dodatna sila za povećanje njene potencijalne energije. Ova komponenta je predstavljena kao  $H_e$  i ona podrazumeva silu podizanja plastice na visinu jednaku dvostrukoj dubini raonika, što je eksperimentalno utvrdio *Saunders (2002)*.

Ostale tri komponente sile otpora su sile trenja na plazu koje su posledica bočne reakcije na plužno telo. Sila  $H_{cs}$  nastaje zbog bočnih sila koje deluju na raonik, a sila  $H_{mc}$  nastaje zbog bočnih sila koje deluju na plužnu dasku. Sila  $H_{fs}$  proizilazi iz sile trenja zemlje o zemlju u poprečnom pravcu tokom napuštanja plužne daske.

### 2.3. Pregled rešenja sistema za merenje mehaničkog otpora zemljišta

Bazirana na postojećoj mernoj tehnologiji, razvijena je familija prototipnih uređaja za merenje ukupnog mehaničkog otpora zemljišta realno u vremenu i prostoru (*Gaultney, 1989*). Ti uređaji su pokazali da su u stanju da odrede fizičko stanje zemljišta. Njihova operativnost može biti predviđena za merenje na konstantnim dubinama (sistemi za merenje horizontalnog otpora) ili promenljivim dubinama (sistemi za merenje horizontalnog i vertikalnog otpora). Sistemi za merenje mehaničkog otpora zemljišta mogu se podeliti prema više kriterijuma (sl. 9).



Sl. 9. Podela sistema za merenje mehaničkog otpora zemljišta prema operativnoj koncepciji



### 2.3.1. Sistemi za merenje mehaničkog otpora u hod (on-the-go)

Veliki broj sistema razvijen je u cilju indirektnog ocenjivanja fizičkog stanja zemljišta merenjem mehaničkog otpora zemljišta prema prodiranju radnog elementa. Uređaji se međusobno konceptijski razlikuju, pa prema tome mogu biti namenjeni za: određivanje ukupnog ili lokalnog stanja u konkretnom sloju zemljišta merenjem otpora vuče konvencionalnih oruđa za obradu; vertikalne sile otpora referentnim uređajem; za merenje sabijenosti u oraničnom profilu sa mernim šiljcima ili mernim telima.

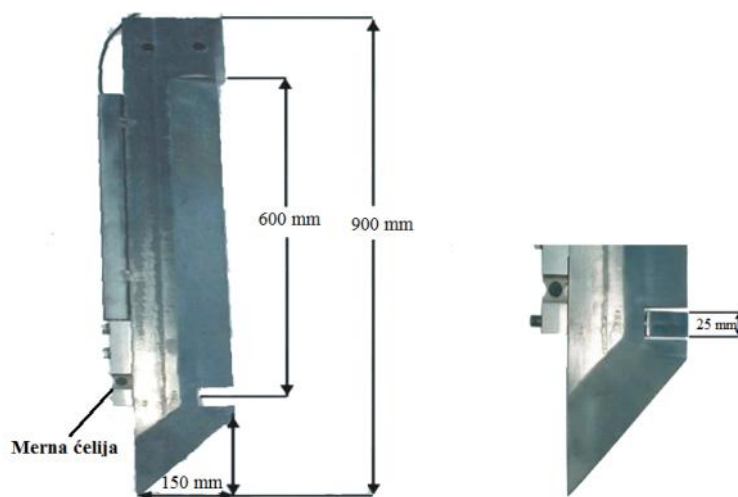
**Horizontalni penetrometri sa jednim mernim elementom.** Veza između horizontalnog i vertikalnog pritiska zemljišta zasnovana je na teoriji bočnog pritiska zemljišta. Početno stanje pritiska u zemljištu je karakterisano kao koeficijent pritiska zemlje u stanju mirovanja, koji je prihvaćen kao horizontalno-vertikalni odnos pritiska. Ekstremne vrednosti horizontalno-vertikalnog pritiska su prikazane kao pasivni i aktivni koeficijenti graničnog pritiska zemlje (*Michalowski, 2005*).

Horizontalno vođeni konusni penetrometar razvio je *Alihamsyah et al. (1990)* s ciljem dobijanja kontinualnog signala za automatsku kontrolu interaktivnih oruđa (*Alihamsyah i Humphries, 1991*).

*Alihamsyah et al. (1990)* dizajnirao je penetrometar sa specijalnim nosačem radnog tela u obliku konusnog i prizmatičnog šiljka. Poljsko ispitivanje korišćenjem obe verzije penetrometra, na tri tipa zemljišta, pri dva stanja vlažnosti zemljišta, pokazalo je izvestan stepen korelacije dobijenih podataka sa vrednostima dobijenim sa standardnog penetrometra. Oni su zaključili da prizmatični element ima manje varijacije na susednim mestima merenja u odnosu na konusni tip. Argumentaciju za prihvatanje podataka sa prizmatičnog penetrometra objasnio je isti autor na sledeći način: prizmatični element bio je opterećen na njegovim stranama, dok je konusni bio opterećen radijalno sa svih strana. Kod konusnog elementa zemljište se kretalo radijalno što je dovelo do sabijanja zemljišta ispred konusa. Kod radijalnog elementa zemljište se pomeralo u pravcu njegovih strana, što je uticalo na smanjeno sabijanje ispred vrha. *Hall i Raper (2005)* navode da je nedostatak horizontalnih penetrometara sa jednim mernim vrhom to što se merenje otpora obavlja na konstantnoj dubini, tj. vrednosti se odnose samo za konkretnu dubinu. Razvoj horizontalnih penetrometara sa više mernih mesta predstavlja unapređenje u pogledu snimanja stanja sabijenosti u više slojeva zemljišta. Međutim, relativno skupi horizontalni penetrometri sa više mernih mesta nisu u mogućnosti da daju pouzdane podatke o stanju međuslojeva u kojima se ne obavlja



merenje. Zbog toga bi trebalo raditi na razvoju uređaja koji bi mogli kontinualno meriti otpor po dubini kao što to radi standardni vertikalni penetrometar (*Raper et al., 2005*). U tom smislu, *Raper i Hall (2003)* razvili su horizontalni penetrometar sa jednim mernim vrhom koji je u stanju da u hodu meri sabijenost po čitavom profilu zemljišta. Senzor za merenje sabijenosti u hodu (OSSS) ima jedan merni vrh postavljen na vertikalni nosač koji se tokom merenja kreće gore-dole naizmenično. Kao merni element korišćen je prizmatični šiljak sa uglom vrha od  $30^\circ$  (sl. 10). Dobile vrednosti sile iskorišćene su za određivanje otpora prodiranja klina (WI) kao količnika sile i površine osnove klina. Vertikalni nosač je širine 37,5 mm sa uglom oštrice od  $30^\circ$ . Autori su prvo obavili testiranja u laboratoriji u seriji ispitivanja na konstantnim dubinama (100, 175, 250 i 325 mm) sa klinom površine osnove od  $625 \text{ mm}^2$  koji je postavljen 30 mm ispred oštrice vertikalnog nosača. Na dubini od 10 cm utvrđeno je da su vrednosti WI oko 50% niže u odnosu na odgovarajuće vrednosti otpora prodiranja konusa (CI). Ustanovljeno je da, pri merenju na malim dubinama, tok zemlje preko šiljka nije u potpunosti po boku, već se jedan deo zemljišta podiže na gore.



Sl. 10. OSSS vertikalni merni uređaj u varijanti sa različitim vrhovima

Kako bi se prevazišla ograničenja koja se javljaju pri malim dubinama, osnova mernog vrha povećana je na  $2500 \text{ mm}^2$  ( $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ). Ponovno testiranje pokazalo je da su vrednosti WI sa većim klinom manje u poređenju sa prethodnom verzijom. Ova verzija mernog klina pokazala se kao neefikasna za precizno merenje sabijenosti na dubinama manjim od 150 mm.

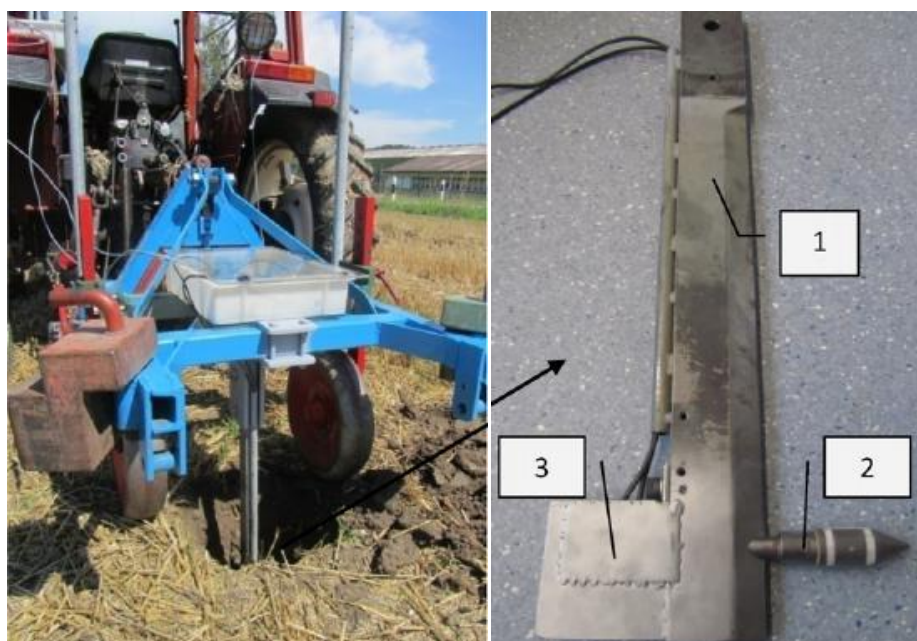
U teoriji OSSS uređaj pri radu na malim dubinama može se posmatrati kao vertikalni nosač-sečivo sa klinom. Na dubini od 100 mm klin širine 25 mm je radio u zoni srpastog pomeranja zemlje do dubine od 150 mm. Kod upotrebe klina širine 50 mm, kritična dubina bila je na oko



225 mm. Nepodudarnost između vrednosti WI i CI do dubine 150 mm za oba tipa prizmatičnih šiljaka objašnjava se različitim načinim pomeranjima zemljišta.

Ako se uporede WI vrednosti za uži tip prizmatičnog mernog vrha i CI vrednosti, dobija se razlika od 1,52 puta veća u korist standardnog penetrometra sa koeficijentom determinacije  $R^2=0,97$ . U slučaju šireg tipa mernog vrha, CI vrednosti su veće za 2,99 puta, dok je  $R^2=0,98$ . Takođe je potvrđeno da su vrednosti WI u boljoj korelaciji sa vrednostima zapreminske mase u poređenju sa vrednostima CI.

Autori *Naderi-Boldaji et al. (2012)* su u svom radu unapredili postojeći kombinovani senzor (*Naderi-Boldaji et al., 2011*) uvodeći poboljšano električno kolo za istovremeno merenje vlažnosti i horizontalnog otpora na konusnom vrhu (sl. 11). Kalibracija je obavljena u laboratorijskim uslovima u glinovitom zemljištu (gleyic Cambisol) pri gravimetriskom sadržaju vode od 0% do 28% i zapreminskoj masi 1,4-1,8 g/cm<sup>3</sup>. Rezultati testa ukazali su na kvadratnu zavisnost između vrednosti očitane sa senzora i stvarnih vrednosti vlažnosti zemljišta.



Sl. 11. Traktorski kombinovani penetrometar:

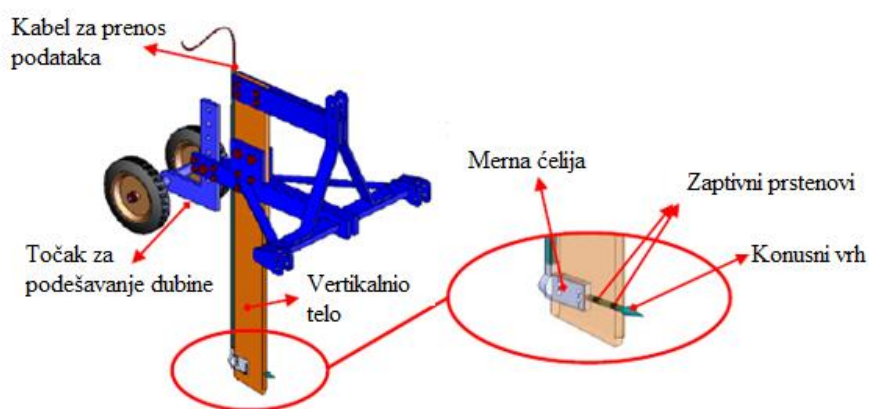
1 - radno telo; 2 - kombinovani senzor; 3 - kućište mere ćelije

Simulacija graničnih vrednosti senzora pomoću modela konačnih elemenata pokazala je da pri vrednosti dielektrične konstante 5 (suvo zemljište) zona uticaja na senzor približno 70 mm, dok je pri vrednosti dielektrične konstante 30 (vlažno zemljište) zona delovanja 40 mm. U serijama poljskih ispitivanja, dobijena je linearna zavisnost vrednosti vlažnosti i vrednosti



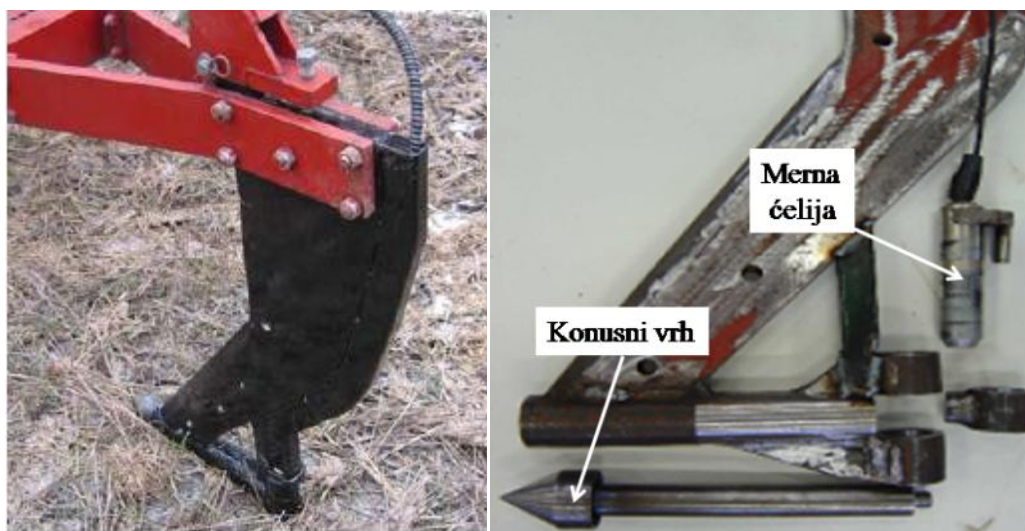
očitanih sa dielektričnog senzora, što je u skladu sa podacima dobijenim tokom kalibracije u laboratoriji. U daljim istraživanjima nije pronađena jasna korelacija između operativne brzine i izlaznih vrednosti dielektričnog senzora.

U svom radu *Topakci et al. (2010)* predstavljena je verzija horizontalnog penetrometra sa jednim mernim elementom (konusnim vrhom) (sl. 12). Sistem je predviđen za "on-the-go" merenje otpora na mernom vrhu uz primenu GPS sistema za geopozicioniranje, u cilju pravljenja 3D mapa otpora. Autori su razvili akvizicioni softver upotrebivši Microsoft Visual Basic.NET programski jezik. U poljskim testiranjima dobijene su vrednosti otpora u rasponu od 0,2 - 3 MPa na dubini od 40 cm.



Sl. 12. Arahitektura horizontalnog penetrometra

*Bölenius et al. (2006)* su testirali svoju verziju horizontalnog penetrometra na površini od 10 ha, na glinovitom zemljištu (sl. 13). Merenje je obavljeno na dubinama 10, 30 i 50 cm uz pomenost susednih prohoda od 10 m. Brzina pri merenju bila je 1,5 m/s.

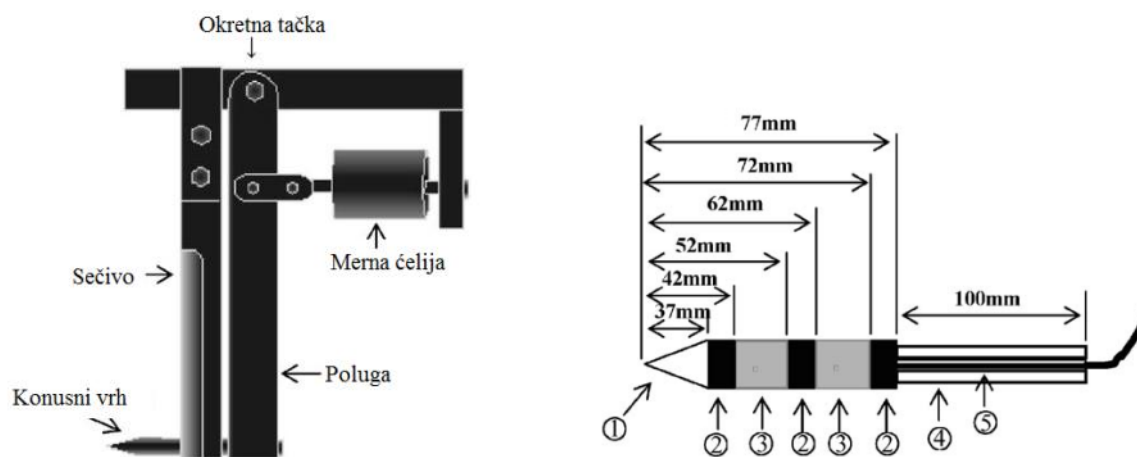


Sl. 13. Radno telo i radni element horizontalnog penetrometra



Kao merni element korićen je konvencionalni BOSCH senzor vuče kapaciteta  $\pm 25$  kN. Brzina merenja iznosila je 1 kHz, s tim što je redukovana na 1 Hz kako bi se eliminisali nepotrebni šumovi. Merni element je konusni vrh prečnika 6,3 cm i uglom izvodnice od  $30^\circ$ . Rezultate otpora konusa za dubine 10, 30 i 50 cm prikazali su u vidu 2D mapa koje su kasnije poredili sa mapama prinosa jarog ječma.

Multisenzitivan uređaj za simultano merenje horizontalnog mehaničkog otpora i vlažnosti zemljišta na konusnom radnom elementu dizajnirali su *Sun et al. (2006)*. Slično drugim konvencionalnim rešenjima horizontalnog penetrometra, ovaj uređaj se sastoji od šipke sa konusnim vrhom, vertikalne oštrice i mernog elementa. Dužina oštrice je 40 cm, a širina 5 cm. Kod ovog rešenja, funkcija oštrice je dvojaka. Na prvom mestu, omogućeno je dobijanje rezultata o horizontalnom otporu nezavisno od dubine na kojoj se nalazi merni vrh. Druga uloga je zaštita senzora od uticaja kamenja u zemljištu. Vlažnost zemljišta merena je posredno, merenjem kapacitivnosti između dva metalna prstena koja se nalaze na osovinu konusa (sl. 14). Princip rada ovog senzora zasniva se na metodu „elementarnih krivolinijskih kvadrata“ koje je prvi definisao *Thomas (1996)*. Iako nije moguće primeniti poznatu formulu za određivanje kapacitivnosti, veza između vlažnosti zemljišta i dielektrične konstante zemljišta otkrio je *Topp (1980)*.



Sl. 14. Šematski prikaz kombinovanog horizontalnog penetrometra:

1 - konus prečnika 20,27 mm, 2 - prsten izolator, 3 - metalni prsten, 4 - osovinica, 5 - koaksijalni kabel

U osnovi postoje dva metoda za kontinualno merenje vlažnosti (kapacitivnosti) zemljišta. Konvencionalni metod zasniva se na merenju frekvencije (Dean et al., 1987) na kondenzatoru, čiju promenu izaziva promena kapacitivnosti kondenzatora (sonde), odnosno dielektričnih





osobina medijuma oko sonde (zemljišta). Kod drugog metoda se određuje impedansa sonde na poznatoj frekvenciji pobude (Gaskin i Miller, 1996). Kod oba metoda radna frekvencija bi trebala biti dovoljno visoka, kako bi se eliminisao uticaj zemljišnog saliniteta. Thomas (1996), Paltineanu i Starr (1997) navode da, kako bi se izbegle smetnje zbog lošeg kontakta i provodnosti zemlje treba ići na frekvencije veće od 30 MHz. Kod ovog tipa penetrometra postoji slaba veza dobijenih podataka za sabijenost sa podacima dobijenih klasičnim vertikalnim penetrometrom ( $R^2=0,5$ ). Izmerena vlažnost zemljišta ovim sistemom u potpunosti odgovara stvarnoj ( $R^2=0,99$ ). Nedostatak kapacitivnog metoda merenja vlažnosti se ispoljava kod rada na različitim tipovima zemljišta. Kako bi greška merenja bila što manja, neophodno je vršiti kalibraciju vlagomera posebno za svaki tip zemljišta.

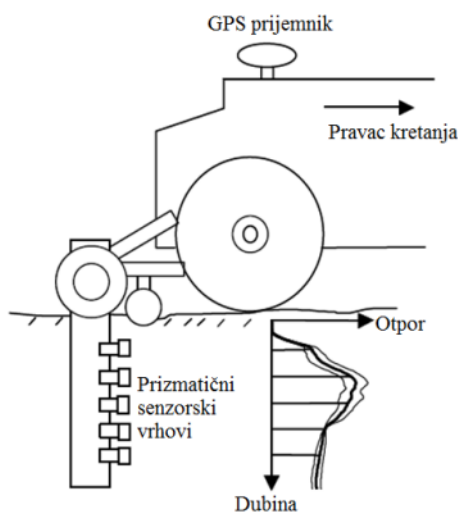
**Horizontalni penetrometri sa više mernih elemenata.** Teorija nosivosti zemljišta, pretpostavlja određeni način pomeranja površinskog sloja kod objašnjavanja interakcije sila između zemljišta i oruđa. *Chung i Sudduth (2006)* razvili su analitički model za procenu potrebne sile za prodiranje (sečenje i pomeranje) kroz zemljište sa konusnim penetrometrom upotrebom teorije nosivosti zemljišta i koncepta varijabilnog pomeranja granice. Oni su takođe osmislili analitički model za horizontalno kretanje prizmatičnog sečiva pretpostavljajući isti model pomeranja zemljišta. Na osnovu toga, model kretanja zemljišta za horizontalni penetrometar zavisi od položaja mernog-radnog elementa u odnosu na kritičnu dubinu. Takođe, pretpostavljeni model pomeranja zemljišta je validan sve dok prizmatični element radi ispod kritične dubine. U suprotnom model pomeranja zemljišta je srpast i merni element neće registrovati isti otpor kao vertikalni penetrometar. Pomenuti model je kombinacija tri prethodna modela (*Terzaghi, 1943; Meyerhof, 1951; Hu, 1965*) i predstavlja dopunsku funkciju mase zemljišta, kohezije, adhezije i operativne brzine.

Za merenje fizičkog stanja zemljišta u više nivoa-slojeva razvijeno je više sistema (*Chung i Sudduth, 2003, 2004a,b, 2005, 2006; Chukwu i Bowers 2005*). U svojim radovima, autori objašnjavaju ideju o upotrebi horizontalnog prentrometra sa više mernih elemenata radi određivanja stepena sabijenosti zemljišta na konkretnim dubinama s ciljem lociranja dubine nepropusnih-sabijenih slojeva. *Chung et al. (2006)* dizajnirao je senzor za merenje sabijenosti po dubini koga je nazvao SSPS. Senzor ima više prizmatičnih šiljaka sa uglom vrha od  $60^\circ$  i osnovom  $361 \text{ mm}^2$  ( $19 \text{ mm} \times 19 \text{ mm}$ ), montiranih na vertikalnom nosaču širine  $25,4 \text{ mm}$  i uglom oštrice od  $60^\circ$ . Ovaj SSPS uređaj konstruisan je tako da ima vertikalno u liniji raspoređene merne ćelije koje su povezane sa vertikalnim nosačem-sečivom (sl. 15). Prizmatični šiljci su postavljeni ispred oštrice vertikalnog nosača i međusobno su odvojeni, na



jednakim rastojanjima. Testirane su varijante sa različitim dužinama prizmatičnog šiljka i različitim međusobnim rastojanjima. Kao reprezentativna kombinacija odabrana je ona sa dužinom vrha 5,1 cm i međusobnim rastojanjem 10 cm, radi minimiziranja uticaja rada vertikalnog nosača i susednih vrhova. Sabijenost zemljišta koja je dobijena tokom testa upotrebom SSPS senzora na dubini od 30 cm i vrednosti dobijene primenom standardnog konusnog penetrometra na istoj dubini su u linearnoj korelaciji ( $R^2=0,6$ ), dok je na dubini od 10 cm daleko slabija relacija. Slabu statističku povezanost podataka dobijenih na dubini od 10 cm autori objašnjavaju kao posledicu male prostorne varijacije. Međutim, to se može povezati sa pojavom različitih modela kretanja zemljišta pri jednom odnosno drugom merenju. U prvih 10 cm dubine, zemljište je stanju iznad kritične dubine za vertikalni nosač debljine 25,4 mm (15,2 cm kritična dubina), dok je zemljište ispred konusnog vrha na toj dubini u permanentnoj fazi pomeranja po modelu kapaciteta nosivosti zemljišta.

Kada je dubina rada senzora takva da se on ponaša kao veoma uzan vertikalni nosač, tada se zemljište koje je iznad kritične dubine pomera prema napred i nagore. Na taj način se vrh koji prima otpore lakše kreće kroz zemljište jer na sebe prima u najvećoj meri samo otpore usled trenja. Nasuprot tome, vrh koji se postavi tako da ide ispod kritične dubine, pri kretanju gura zemljište bočno i napred, slično onome kako to radi konus tokom vertikalne penetracije. Laboratorijska testiranja senzora za horizontalno snimanje sabijenosti pokazuje da postoje razlike u odnosu na vrednosti dobijene pomoću standardnog penetrometra.



Sl. 15. Operativni koncept merenja otpora u više slojeva (a) i radno telo sa prizmatičnim mernim vrhovima na vretikalnom telu (b)





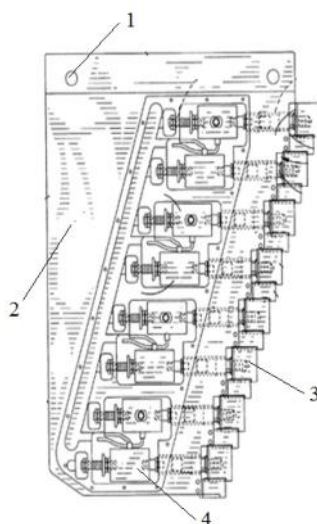
Dijagram sabijenosti standardnog penetrometra je nelinearan, dok dijagram vrednosti dobijenih upotrebom horizontalnog penetrometra pokazuje linearnu zavisnost otpora i dubine (Chung *et al.*, 2004a). Linearna zavisnost konusnog indeksa i PSSI otpora pri brzini kretanja od 0,5 m/s nije statistički značajna na dubini od 10 cm, dok je na dubini od 20 cm i 30 cm statistički značajna, ali na pragu značajnosti od  $p=0,1$ . Kada se poveća brzina na 1,5 m/s odnosno 2,5 m/s, linearna zavisnost postaje značajna na svim dubinama. Ova pojava se može objasniti činjenicom da pri brzini od 0,5 m/s prizmatični vrh na dubini 10 cm praktično radi u zoni iznad kritične dubine, gde se javlja srpast način pomeranja zemljišta, dok pri radu na višim brzinama i većim dubinama (ispod kritične) dolazi do umanjenog efekta takvog kretanja zemljišta.

Horizontalni penetrometar sa jednim mernim vrhom autora Alihamsyah *et al.* (1990) modifikovali su Chukwu i Bowers (2005) kako bi mogao simultano da meri sabijenost na tri dubine. Autori su upotrebili tri prizmatična šiljka sa uglom oštrice od  $30^\circ$  i površinom baze od  $323 \text{ mm}^2$  koje su postavili na vertikalni nosač. Takođe, pomerili su bazu šiljka za 40 mm ispred vertikalnog nosača, dok je širina nosača ostala nepromenjena. Odabrali su vertikalno rastojanje šiljaka od 10,2 cm kako bi maksimalno umanjili efekat interakcije. U laboratoriji su mereni otpori na dubinama 178, 278 i 381 mm. Pri horizontalnoj brzini od 30 mm/s, u uslovima simulirano-neujednačene zonske sabijenosti zemljišta, uređaj registruje razlike u sabijenosti zemljišta u funkciji dubine na nivou značajnosti od 5%. Korišćena je linearna regresija za poređenje otpora zemljišta dobijenog pomoću "on-the-go" senzora i standardnog penetrometra ( $R^2=0,76$ ). Relativno jaka veza može se objasniti činjenicom da su sva tri šiljka radila ispod kritične dubine. To znači da su oba penetrometra radili u modu pomeranja zemljišta po tipu nosivog kapaciteta.

Autori Andrade *et al.* (2001) razvili su senzor opterećenja usled rezanja profila zemljišta (UCD-CPS) koji meri do dubine 63 cm sa pomakom od 7,5 cm (sl. 16). Uređaj ima osam režućih oštrica koje su povezane sa nezavisnim mernim ćelijama. Istraživanja su pokazala da je na otpor zemljišta uticala vlaga, dubina na kojoj se nalazi radno telo i lokacija u profilu u kome se nalazi merna oštrica. Iscrpna poljska ispitivanja pokazuju da uticaj brzine nije značajan u granicama 0,65 i 1,25 m/s. Autori Chung *et al.* (2006) tvrde da je otpor posledica, pored ostalog, i međusobne interakcije mernih oštrica i radnog tela. Prva verzija UCD-CPS-a imala je nosač nagnut prema nazad širine 51 mm. Kao i kod prethodnih uređaja, gornje oštrice koje su radile u plitkim slojevima imale su male vrednosti otpora. Andrade *et al.* (2004) razvili su kompaktniji i jednostavniji senzor za merenje otpora u zemljišnom profilu do



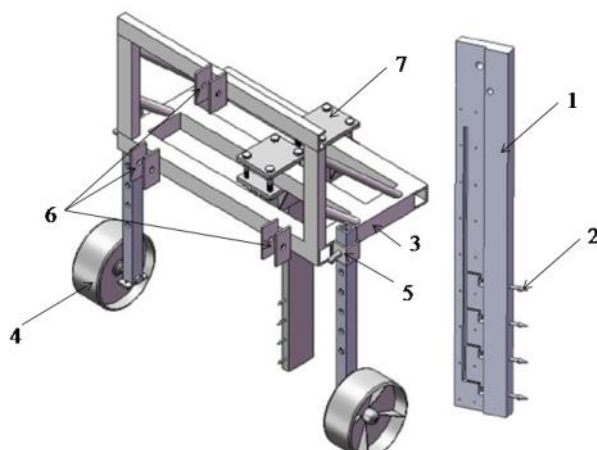
dubine 46 cm. Poboljšana verzija sistema UCD-CPS imala je vertikalno telo širine 27 mm sa uglom nagiba od  $90^\circ$ . U gornjoj zoni nisu bili postavljeni davači sile što je rezultovalo kvalitetnijem merenju u rasponu dubine od 7,5 do 47,5 cm. Autori su zaključili da novi sistem UCD-CPS ima mogućnost registrovanja različitog stepena sabijenosti u slojevima profila zemljišta. Koeficijent korelacije (R) između podataka dobijenih sa UCD-CPS sistema i standardnog penetrometra bio je u granicama od 0,44 do 0,7. U slučaju kada se uključi i faktor dubine u jednačini regresije među vrednostima UCD-CPS i CI dobija se značajno veća vrednost  $R^2$  (Andrade-Sanchez et al., 2007).



Sl. 16. Radno telo mernog uređaja UCD-CPS (Andrade et al., 2004):

1 - tačka veze radnog tela sa osnovnim ramom; 2 - radno telo, 3 - merni vrh; 4 - merna ćelija

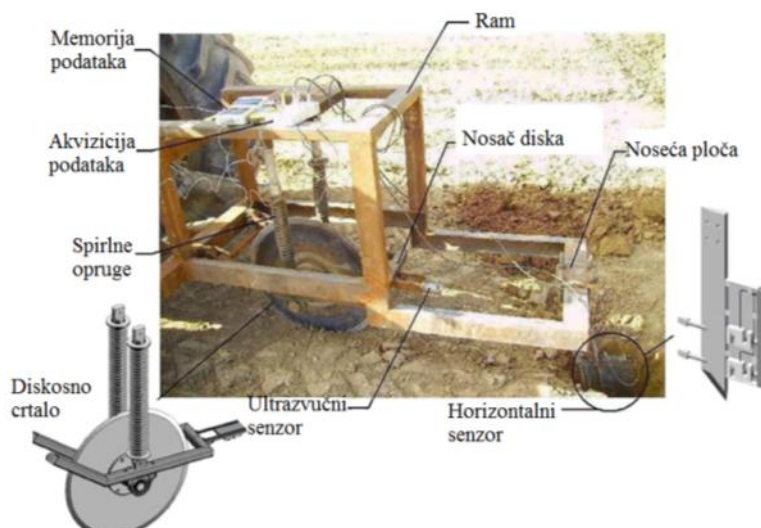
Rahimi Ajdadi et al. (2011) ispitali su tzv. OSBSMR sistem (sl. 17) za merenje otpora zemljišta. Sistem je traktorski nošeni sa ramskom konstrukcijom i vertikalnim nosačem koji na sebi ima merne vrhove na međusobnom rastojanju od 10 cm. Rezultati merenja otpora na dubinama od 10, 20, 30 i 40 cm ukazuju na značajan uticaj vlažnosti zemljišta na vrednosti otpora. Brzina kretanja ranih elemenata kroz zemljište u intervalu od 1,78 do 3,57 km/h nije značajnije uticala na vrednosti otpora. Ustanovili su dobru korelaciju između CI i vrednosti za OSBSMR-a na dubinama 20-30 cm i 30-40 cm, dok je na dubinama 0-20 cm korelacija marginalna. Ova pojava je objašnjena kritičnom dubinom zemljišta od 20 cm.



Sl. 17. Model sistema OSBSMR-a:

1-vertikalno telo; 2-konusna šipka; 3-šasija; 4-potporni točak; 5-iksni otvori za podešavanje dubine; 6-uređaj za priključivanje; 7-rastavljiva veza vertikalnog nosača i šasije

Hemmat *et al.* (2013) integrisali su vertikalni i horizontalni senzor u jedinstvenu celinu (sl. 18). Vertikalni senzor predstavlja instrumentalizovano diskosno crtalo prečnika 60 cm opremljen ultrazvučnim senzorom za merenje dubine penetracije diska u površinskom sloju zemljišta do 20 cm dubine.



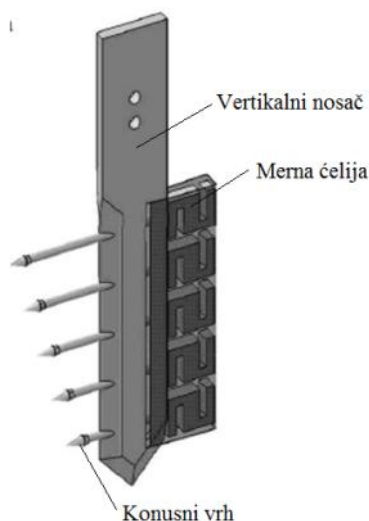
Sl. 18. Kombinovani senzor tokom poljskog testa

Za merenje mehaničkog otpora zemljišta na dubinama 20 i 30 cm integrisan je horizontalni penetrometar sa dva prizmatična vrha sa uglom vrha od  $30^\circ$ . Senzor je testiran na parcelama sa prašasto-ilovasto-glinovitim zemljištem. Prema njihovim rezultatima, dubina penetracije diska odgovarala je stepenu sabijenosti zemljišta. Pri niskim vrednostima vlažnosti zemljišta, mehanički otpor na merim vrhovima (HRI) bio je nezavisan od rastresanja zemlje ispred



diskosnog crtala. Pri srednjim vrednostima vlažnosti zemljišta, penetracija diska je bila intenzivnija shodno manjem geostatičkom pritisku, dok je vrednost HRI na dubini od 20 cm bila redukovana. Negativna linearna korelacija je ustanovljena između dubine prodiranja diska i CI. Takođe, zavisnost HRI i CI na obema dubinama bila je linearna.

*Sharifi i Mohsenimansesh (2011)* prikazali su horizontalni senzor sa pet mernih konusnih vrhova na vertikalnom telu za istovremeno merenje otpora zemljišta na više dubina (sl. 19). Površina baze konusnih vrhova bila je 323 mm<sup>2</sup>. Konusni vrhovi se nalaze na horizontalnim šipkama dužine od 51 do 202,36 mm uz smanjenje dužine po 37,84 mm od gornje zone prema donjoj. Šipke su direktno povezane sa mernim ćelijama "S" tipa koje su smeštene u kućištu vertikalnog tela.



Sl. 19. Višedubinski horizontalni penetrometar

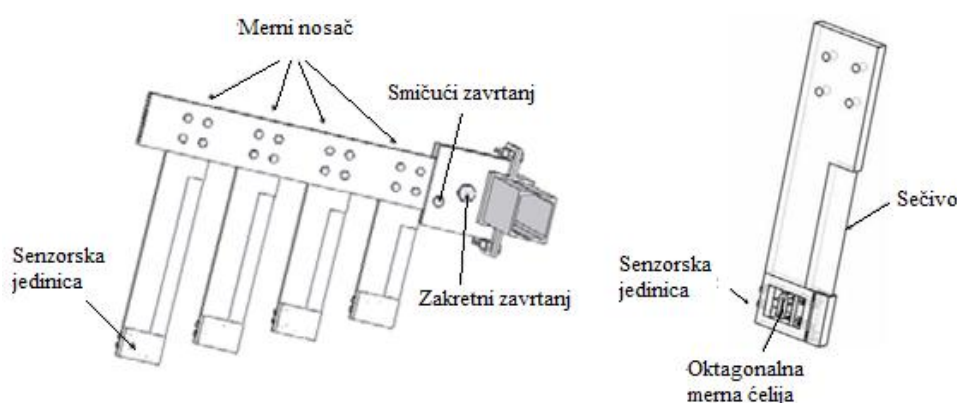
Vertikalno rastojanje vrhova je 102 mm što obezbeđuje dubinu merenja do 40 cm. Rezultati poljskog testa ukazuju na visok stepen korelacije ( $R^2=0,86$ ) između CI vrednosti i horizontalnog otpora dobijene merim uređajem.

*Abbaspour-Gilandeh (2009)* su konstruisali merni uređaj koji je po konfiguraciji sličan uređaju *Adamchuk et al. (2001a)*, a pripada grupi konzolnih mernih sistema, s tom razlikom što se kod ovog ne meri obrtni moment, već sila otpora na mernim jedinicama koje se nalaze na vertikalnim telima aktivne površine od 25 cm<sup>2</sup> (sl. 20). Merne jedinice se nalaze na krajevima vertikalnih tela u čijem sastavu su i merne ćelije. Uređaj ima četiri vertikalna tela različite dužine, koja registruju otpor u zonama 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm i 30-40 cm dubine.



Rezultati poljskog testa na peskovito-ilovastom zemljištu u kojem su obavljena komparativna poređenja vrednosti merog sistema i standardnog penetrometra pokazuju da je stepen linearnosti  $R^2=0,77$  za dubine od 0-10 cm i  $R^2=0,83$  za dubine 30-40 cm.

Autori *Khalilian et al. (2002)* razvili su drugačiji senzor sa vertikalnim telom koje ima pet nezavisnih oštrica na kojima se preko mernih ćelija registruje otpor. Prema njihovim navodima, koeficijent  $R^2$  bio je preko 75%, a za dubine ispod 22,5 i preko 90% kod poređenja vrednosti dobijenih njihovim uređajem i sa standardnim penetrometrom.



Sl. 20. Uređaj za mernje otpora zemljišta sa višestrukim instrumentalizovanim sečivom

Rešenje mernog sistema za merenje horizontalne sabijenosti nazvan "krilasti penetrometar" razvili su *Verschoore et al. (2003)*. Uređaj na sebi ima krilca dužine 50 mm za merenje otpora do dubine od 30 cm. Krilca su montirana na prednjem delu vertikalnog tela. Napadni ugao oštrice krilaca je  $30^\circ$ . Na krilcima su montirane merne trake koje mere zakretni moment. Koeficijent determinacije između vrednosti dobijenih sa standardnim penetrometrom i horizontalnim krilastim je mali i iznosi  $R^2=0,41$ .

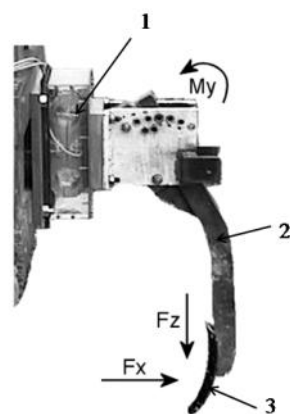
Autori *Sharifi et al. (2007)* su nastavili istraživanje uređaja sa krilcima za merenje mehaničkog otpora u osam slojeva. Senzor se sastojao od niza zakrilaca sa mernim davačima. Svaki zakrilac predstavljao je jedan merni elemenat koji čini jednu polovinu radnog elementa na vertikalnom telu. Merne ćelije postavljene su na zadnjoj strani zakrilca. Sprovedena ispitivanja pokazuju da razlike u otporu zemljišta na određenoj dubini uzrokovano različitim stepenom sabijanja traktorskim pneumatikom, može biti određeno pomoću mernog sistema. Zakrilca koja su radila u površinskim slojevima registrovala su veoma mala opterećenja. Na osnovu poljskih testiranja, autori preporučuju montiranje mernih krilaca na dubinama većim od 20 cm ili čak montiranje jednog krilca na dubini između 30 cm i 40 cm. Ovim bi se



omogućilo mapiranje sabijenosti u sloju ispod oraničnog sloja. Takođe, nije nađena korelacija između vrednosti CI i vrednosti otpora dobijenih sa senzora.

**Konzolna merna oruđa.** *Sirjacobs et al. (2002)* razvili su i testirali senzor za merenje mehaničkog otpora obrade koji je kasnije, od strane *Hanquet et al. (2004)*, upotrebljen na izrazito heterogenom zemljištu za lociranje zona sa različitim fizičkim osobinama zemljišta. Senzor je opremljen akvizicijom za prikupljanje podataka u realnom vremenu. Senzor se sastoji od jedinstvenog čizel radnog tela koji se vuče na konstantnoj dubini od 30 cm pri konstantnoj brzini od 5 km/h (sl. 21). Otpor koji se javlja na radnom telu prenosi se do osmougaone prstenaste merne ćelije koja je pričvršćena za ramsku konstrukciju. Horizontalna i vertikalna komponenta sile meri se posredno preko obrtnog momenta. Isti autori su pronašli snažnu korelaciju između otpora vuče senzora i konusnog indeksa na dubini od 25 cm ( $R=0,95$ ) i vlažnosti na dubini od 30 cm ( $R=-0,95$ ). Oni su takođe zaključili da primenjeni metod snimanja jeste adekvatan za prepoznavanje varijacija fizičkih osobina zemljišta na parceli.

Ako se pretpostavi da je moment opterećenja na konzolnom nosaču proporcionalan sili otpora koja deluje na oruđe, moguće je postavljanjem merne trake na poznato mesto duž nosača odrediti moment koji deluje na nosač (*Glancey et al., 1989*).



Sl. 21. Senzor kompaktnosti zemljišta:

1 - osmougaona merna ćelija; 2 - nosač radnog tela; 3 - radno telo

Za svaku poziciju merne ćelije, moment savijanja zavisi od distribucije otpora ispod te pozicije. Jedan takav uređaj razvili su *Glancey et al. (1989)*. Iako je oruđe razvijeno na ovim osnovama, postoji određena rezerva kod preciznosti merenja otpora u površinskim slojevima.

Izmerene vrednosti otpora su upoređene sa zapreminskom masom, vlažnošću zemljišta i konusnim indeksom do dubine 305 mm. Raspored opterećenja po dubini bio je linearan za



dubine do 153 mm na oba tretmana (orano i neobrađeno). Pri većim brzinama (3,2 km/h), procenjena distribucija opterećenja pokazala je određenu nekonzistentnost, dok na manjim brzinama (0,8 km/h) ova pojava nije primećena. To se objašnjava mogućim prelaskom sa jednog moda pomeranja zemljišta u drugi (od srpastog na kompresioni) s obzirom na dubinu rada. Kako se operativna brzina povećava, zemljišni agregati mogu biti povučeni, a potom gurnuti što izaziva povećanje sile opterećenja ispod kritične dubine. Na malim brzinama povlačenje zemljišta se verovatno ne događa (pod pretpostavkom da je dubina obrade ista kao dubina rada senzora).

Slično prethodnom senzoru, Adamchuk *et al.* (2001a) i Siefken *et al.* (2005) razvili su sistem sa mernim trakama postavljenim na zadnjem delu vertikalnih noževa poređanih u nizu (sl. 22). Sistem je prilagođen za merenje otpora na tri dubine simultano. Nedostatak ovog sistema je što je kod merenja na malim dubinama, odnos šuma i osnovnog signala nepovoljan, pa je zbog toga problematično izdvojiti vrednosti otpora iz signala. Poljsko tetstiranje pokazalo je da dubina ima značajnu ulogu u odnosu izmerenih vrednosti pomoću SMRMS-a i konusnog penetrometra. Uredna analiza pokazuje da je veza podataka dobijenih SMRMS-om i konusnim penetrometrom izuzetno jaka i linearna na srednjoj (10-20 cm) i najvećoj dubini (20-30 cm). Koeficijent nagiba regresione linije između vrednosti CI i SMRMS bio je 1,97 za dubinu do 10 cm, 1,32 za dubinu 10-20 cm i 0,93 za dubinu od 20-30 cm. Kada se koriguju vrednosti dobijene za dubinu pomoću sistema SMRMS, dobije se koeficijent determinacije  $R^2=0,76$ .



Sl. 22. Merni sistem sa više vertikalnih tela različitih dužina

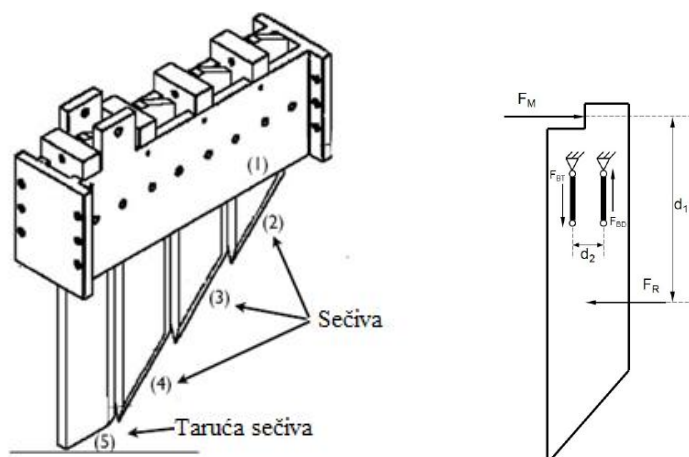
Ako se uzmu u obzir širina vertikalnih tela (18,6 mm i 15,9 mm) i dubina na kojima su senzori radili, njihov efekat je podudaran sa radom veoma uzanih radnih tela, što odgovara u





slučaju male dubine pri modu pomeranja zemljišta u srpastom obliku. Slab odnos signal-šum pri snimanju površinskih delova, posledica je kretanja senzora po već narušenom zemljištu koje pravi realno male otpore. Pored toga, svaka greška pri proceni otpora za dublje slojeve negativno se odražava na kalkulaciju otpora površinskog sloja.

Slično rešenje senzora razvili su i testirali *Agüera et al. (2013)*. Uređaj meri otpor rezanja zemljišta bez uticaja sile trenja na merne elemente. Senzor čine vertikalni segmenti sa obrnutim napadnim uglom u odnosu na zemljište (sl. 23).

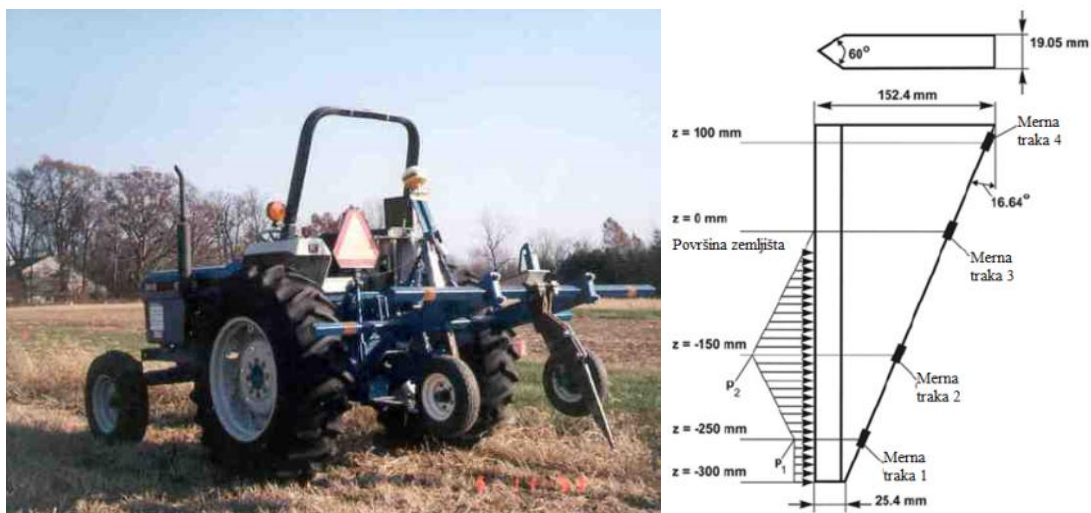


Sl. 23. Profilni senzor otpora rezanja

Segmenti se razlikuju po dužini za 100 mm, tako da im se oštrice spajaju u jedan niz. Dužina oštrice je 100 mm, a ugao u odnosu na površinu zemlje  $45^\circ$ . Segmenti su preko paralelogramske polužne veze i mernih ćelija povezani sa osnovnim ramom. Paralelogramska veza prima na sebe vertikalna opterećenja, tako da merna ćelija očitava samo horizontalne komponente otpora. Rezultati poljskog testa pokazuju slabu vezu ( $R^2=0,58$ ,  $R^2=0,45$  i  $R^2=0,54$ ) CI vrednosti otpora po slojevima 0-10 cm, 10-20 cm i 20-30 cm i vrednosti dobijene pomoću senzora. Koeficijent determinacije za prosečne vrednosti otpora u zemljišnom profilu dobijene sa senzora i CI vrednosti je 0,9.

*Adamchuk et al. (2001b)* su koncipirali prototipni uređaj sa vertikalnim krutim telom opremljen sa nizom mernih traka, namenjen za potrebe merenja prostorne varijabilnosti mehaničkih osobina zemljišta i za određivanje trenda promene otpora sa promenom dubine uz pretpostavku da je ta promena linearna (sl. 24). U drugim istraživanjima, dobijene vrednosti mehaničkog otpora obrade zemljišta po dubini bile su značajno niže od vrednosti dobijene standardnim vertikalnim penetrometrom (*Adamchuk et al., 2004a,b*).





Sl. 24. Vertikalno nožasto merno telo

Kod ovog sistema, korišćen je klasičan podrivač sa ravnim telom u kome su smeštene merne jedinice. Širina radnog tela je 5,1 cm, a radni element je trougaoni vrh sa širinom osnove od 6,6 cm. Radna dubina sistema je u rasponu od 35-50 cm. I kod ovog sistema merenja otpora postoji problem merenja otpora na malim dubinama (iznad kritične dubine) jer se pomeranje zemlje odigrava po modelu srpa, a ne po modelu kapaciteta nošenja kao što je to slučaj kod konusnog penetrometra. Otpor zemljišta pri kretanju bočno i unapred pri vertikalnom podiranju konusa je značajno veći nego pri kretanju unapred i na gore kao kod podrivača kada rade iznad kritične dubine (*Spoor i Godwin, 1978*). Zbog toga se razlike koje su nastale pri merenju otpora zemljišta pripisuju prirodi ponašanja zemljišta pri kretanju različitih objekata, a ne pravcem delovanja (horizontalno i vertikalno).

Još jedan sistem razvio je *Christenson et al. (2004)* u svrhu mapiranja otpora zemljišta. Sistem se sastojao od noža koji prima na sebe otpor rezanja kojeg prenosi na nosač koji na sebi ima davače sile. Sila otpora se prenosi preko nosača na tri mesta. U narednoj fazi razvoja, *Adamchuk i Christenson (2005)* izgradili su prototipni sistem za mapiranje fizičkih osobina zemljišta (ISPPMS) i testirali u seriji oglada gde su u višegodišnjoj primeni različiti sistemi obrade. Sistem je istovremeno merio otpor zemljišta, kapacitivnost i refleksiju (sl. 25). Otpor je upoređivan sa vrednostima dobijenim pomoću traktorskog automatizovanog konusnog poenetrometra. Koeficijent determinacije za podatke otpora i vrednosti konusnog indeksa posmatrano po dubini profila, kretao se do 0,24 za manje odnosno do 0,55 za veće dubine.



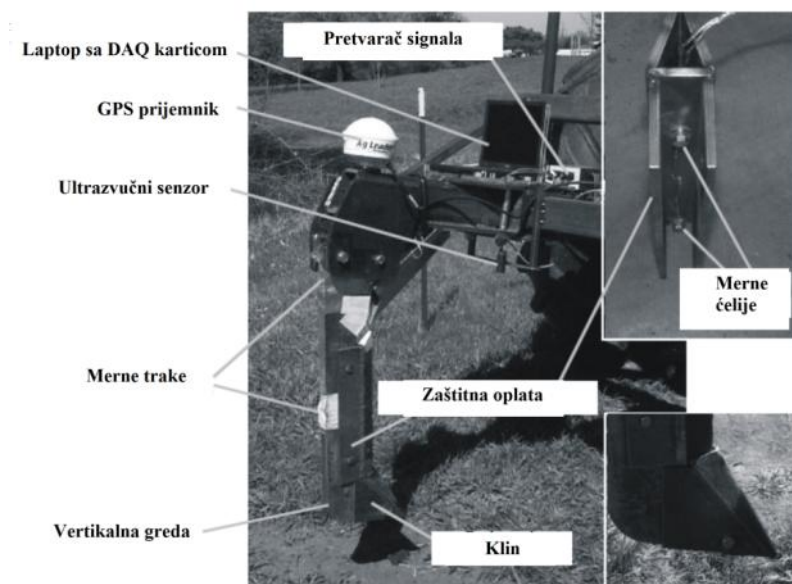
Sl. 25. Integrisani sistem za mapiranje fizičkih karakteristika zemljišta

Adamchuk *et al.* (2006) je poredio podatke dobijene pomoću dva različita senzora za merenje otpora u hodu (ISPPMS i SSPMS). Podaci sa oba senzora upoređivani su sa podacima dobijenim sa standardnim vertikalnim penetrometrom. Saopšteno je da su vrednosti otpora za dubinu do 10 cm dobijene sa SSPS uređajem u slaboj korelaciji sa CI vrednostima, dok su vrednosti otpora sa ISPPMS na istoj dubini bile čak u negativnoj korelaciji sa CI. Uzrok je najverovatnije proces srpastog pomeranja zemljišta kao i velika količina biljnih ostataka kako to autori tvrde.

Razvoj koncepcije sistema za detektovanje mehaničkog otpora zemljišta u okviru radnog oruđa ima za cilj komercijalnu primenu kod grupe mašina za promenljivu obradu (VRT tehnologije). Adamchuk *et al.* (2004) su konstruisali merni uređaj u vidu konvencionalnog podrivačkog oruđa na kome su postavljena četiri merna mesta za detektovanje sile (sl. 26). Dubina obrade meri se senzorom dubine. Ispod zaštitne oplata koja, na sebi ima vertikalno sečivo, postavljene su dve merne ćelije, koje služe za „predviđanje“ toka promene otpora sa promenom dubine obrade. Na oruđu su postavljene još dve merne trake, koje detektuju opterećenje u formi obrtnog momenta na vertikalnoj gredi, kao rezultat sile pritiska na radnom elementu (šiljku). Vrednost otpora na radnom telu nazvana je „izmerena“ vrednost. Iz ovog proizilazi da se otpor i trend promene po dubini detektuju u tri merne tačke. Merne ćelije određuju nagib krive otpora po profilu, dok merne trake registruju vršna opterećenja na radnom telu. Na osnovu brojnih ispitivanja pokazalo se da postoje određena ograničenja na sistemu pre svega u odstupanju „izmerenih“ vrednosti i „predviđenih“ na gredi nosaču radnog tela. Taj nedostatak je naročito izražen kod pliće i kod suviše duboke obrade. Takođe, nije

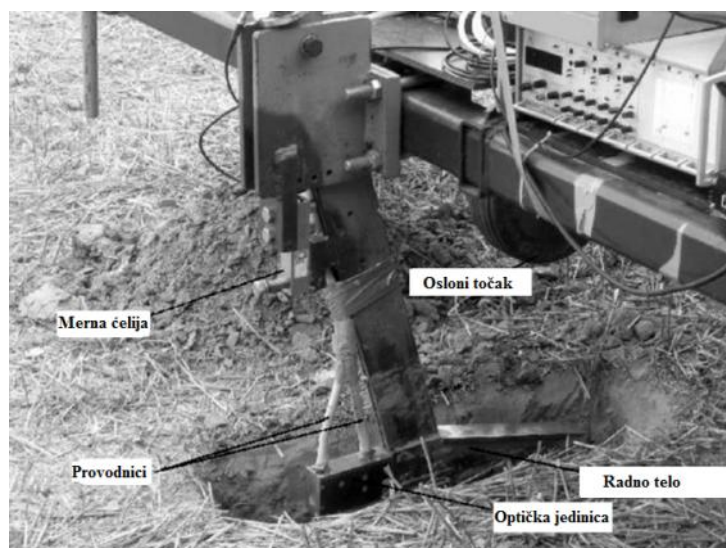


utvrđena veza između vrednosti dobijenih klasičnim konusnim penetrometrom i sistemom za dinamičko merenje otpora zemljišta.



Sl. 26. Oprema za merenje mehaničkog otpora na standardnom podrivačkom oruđu

Mouazen and Roman (2006) su dizajnirali i izradili kompaktan multisenzitivni uređaj za merenje zapreminske mase, vlažnosti zemljišta, sile otpora na radnom elementu i radne dubine u hodu (sl. 27). Uređaj predstavlja vertikalno podrivačko telo koje u sebi ima ugrađenu mernu ćeliju za merenje opterećenja na radnom elementu i infracrveni spektrofotometar za merenje vlažnosti zemljišta.



Sl. 27. Sistem za merenje otpor obrade, zapreminske mase i vlažnosti zemljišta



Zapreminska masa se posredno određuje pomoću prethodno razvijenog matematičkog modela (Mouazen et al., 2004a,b), na osnovu izmerenih vrednosti tri parametra koja se paralelno mere. U razdvojenim studijama, Mouazen i Roman (2006) nisu uspeli uočiti jasnu korelaciju između otpora vuče i zapreminske mase, odnosno vlažnosti zemljišta. Oni su iskazali sumnju da otpor nije pravilno meren da bi mogao poslužiti kao indikator sabijenosti iako nisu uzeli u obzir tip zemljišta, vlažnost i radnu dubinu.

Hall i Raper (2005) su utvrdili da otpor vuče, ako se posmatra nezavisno od drugih parametara, nije dobar pokazatelj stanja zemljišta, ali ukazuje na razlike u fizičkom stanju (Gill i Vnden Berg, 1968; Smith et al., 1994).

**Sistemi za merenje otpora vuče.** Merenje otpora vuče mašina za obradu zemljišta se može obavljati uz primenu univerzalnih mernih ramova ili pomoću instrumentalizovanih traktora na svojim podiznim hidrauličnim polugama imaju postavljene davače sile. Oba sistema imaju određene prednosti i nedostatke, ali se uopšteno može reći da je merenje otpora vuče primenom mernih ramova više zastupljeno u naučnim istraživanjima u odnosu na instrumentalizovane traktore. Osnovni razlog tome je jeftina izrada mernog rama, mobilnost i univerzalnost primene. Pored pomenutog, opterećenja koja se javljaju na mernim ramovima mere se u konkretnim ravnima bez razlaganja, dok su opterećenja koja se mere na podiznim hidrauličnim polugama traktora prostorno orjentisana i teško ih je prostorno odrediti.

Merni ramovi se koriste za merenje otpora vuče na standardnim mašinama i kroz istraživanja su se pokazali kao veoma korisna platforma za ispitivanje stanja zemljišta i efekata rada mašine. Merenje otpora vuče raonog pluga može biti potencijalno korisna alatka za kontinualno mapiranje i služiti kao reprezentativna promenljiva zemljišnih karakteristika kao što je sabijenost zemljišta (Hayhoe et al., 2002; Lapen et al., 2002). Filtracija signala i spektralna analiza sirovih podataka primenom brze Furijerove transformacije (FFT) omogućava bolju procenu prostornih pojava (Hayhoe et al., 2002). Isti autori dokazuju da su visokofrekventne oscilacije obično rezultat interakcije zemljišta i oruđa usled pojave mrvljenja zemljišta tokom obrade. Stafford (1981) je utvrdio da je periodično opterećenje oruđa za obradu posledica krte deformacije zemljišta, dok je izostanak periodičnosti u signalu posledica plastične deformacije. Owen et al. (1990) utvrdio je da prelazak sa krte deformacije zemljišta na plastičnu predstavlja znak da je nadmašena kritična dubina pri kojoj se zemljište podiže i pada bočno od radnog tela po modelu Godwin i Spoor (1977). Sa druge strane, niske frekvencije promene opterećenja pri obradi ukazuju na varijaciju trenutnih fizičkih osobina zemljišta kao što su: vlažnost, mehanički sastav, i/ili sabijenost (Owen et al., 1990; Hayhoe et



al., 2002). *Andrade et al.* (2003) analizirao je podatke o sili otpora koja deluje na instrumentalizovani merni-radni organ korišćenjem FFT i doneo zaključak da frekventni spektar amplituda zavisi od uslova u kojim je testiranje obavljeno. Dalja analiza podataka ukazuje da osnovni fenomen pomeranja zemljišta ne predstavlja determinisani haos, već obično Braunovo kretanje (*Brownian motion*). Regresiona analiza *Lapen et al.* (2002) govori da se varijabilnost otpora vuče pluga najbolje objašnjava lokacijom na parceli, vrstom preduseva, konusnim indeksom i teksturom zemljišta u oraničnom sloju. Utvrđeno je da otpor vuče raonog pluga generalno raste sa porastom vrednosti konusnog indeksa i sadržaja gline. *Lapen et al.* (2002) predlaže da podaci o otporu vuče prikupljeni tokom normalne operacije obrade mogu biti korišćeni od strane proizvođača, koji su zainteresovani za prepoznavanje delova parcele gde sabijenost može ograničiti prinos.

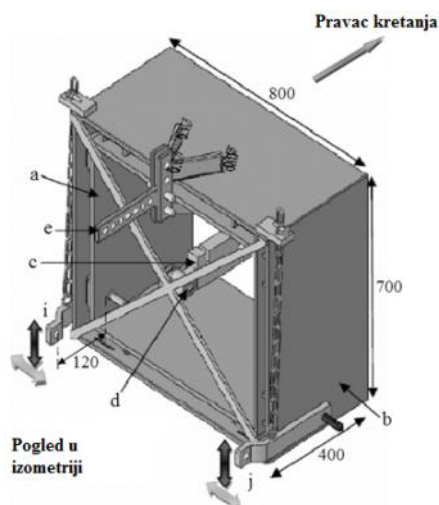
Metod za unapređivanje načina određivanja fizičkih osobina zemljišta upotrebom podataka o otporu vuče predložio je *van Bergeijk et al.* (2001). U njegovim istraživanjima, informacije koje se prikupljaju automatski tokom oranja služe za predviđanje sadržaja gline u oraničnom sloju. Oni su utvrdili da upotreba otpora vuče pluga kao ko-varijabile tokom ko-kriging interpolacije daje mogućnost redukcije broja uzoraka zemljišta radi utvrđivanja sadržaja gline sa 60 na 18 po hektaru uz porast greške za 20%. Na istom polju, utvrdili su da je prostorna raspodela gline odgovara mapi prinosa.

Poznati sistemi za merenje otpora vuče se u literaturi uglavnom klasifikuju prema mestu i načinu postavljanja davača sile (force transducers) u dve (*Askari et al., 2011; Kheiralla et al., 2003*), odnosno tri kategorije (*Bentaher et al., 2008*). Kod prve kategorije sistema, senzori su postavljeni na radnoj mašini bez dodatne modifikacije mašine. Osnovni smisao ovih sistema je određivanje interakcije mašine i zemljišta (*Adamchuk et al., 2004; Formato et al., 2005*). Druga kategorija sistema su merni ramovi koji se priključuju između traktora i radne mašine. Ram je merni element na kome se nalaze instalirane merne ćelije, a oslanja se između traktora i mašine (*Kheiralla et al., 2003; Askari et al., 2011; Alimardani et al., 2008; Scholtz 1966*). Prednost merenja sile otpora mernim ramom je lako dekomponovanje na horizontalnu, vertikalnu i bočnu silu. Takođe, omogućava univerzalnu primenu na različitim traktorima i priključnim mašinama. Nedostatak predstavlja porast ukupne mase sistema i promena polaznih geometrija agregata. Treća kategorija su sistemi koji su najmanje zastupljeni, a kod kojih se merne ćelije montiraju na poluge hidrauličnog sistema traktora (*Bentaher et al., 2008; Al-Janobi et al., 1998*). Kod ovog sistema se ne remeti početna geometrija, ali je analiza sila složena i podrazumeva korišćenje specijalnog, instrumentalizovanog traktora.



Autori *Askari et al. (2011)* razvili su merni ram za merenje otpora vuče na nošenim priključnim mašinama pomoću jedne merne ćelije mernog opsega do 50 kN (sl. 28). Merni ram je projektovan na principu dvostrukog rama koji se montira između traktora i priključne mašine. Merna ćelija je postavljena u horizontalnoj tački veze između ramova. Sistem omogućava širok opseg podešavanja tačaka veze po visini i širini kako bi se prilagodio konfiguraciji širokog spektra priključnih mašina i trakora. Praktično sve mašine za obradu kategorije II i III kao što su plugovi, kultivatori, drljače i tanjirače mogu biti sa lakoćom prikopčane, izuzev mašina koje dobijaju pogon preko PVT. Merni ram je kalibrisan u laboratorijskim uslovima i u nekoliko poljskih testova gde su mereni otpori vuče raonog pluga na glinovito ilovastom zemljištu. Kalibracija je pokazala visok stepen linearne zavisnosti opterećenja i izmerenog otpora ( $R^2=0,99$ ). Poljskim testom je potvrđena funkcionalna pouzdanost i visoka preciznost u radu.

Autori *Kheiralla et al. (2003)* su razvili, kalibrisali i opisali nošeni merni ram za merenje horizontalne i vertikalne komponente sile otpora koja dejstvuje na uređaj za priključivanje poljoprivrednog traktora.

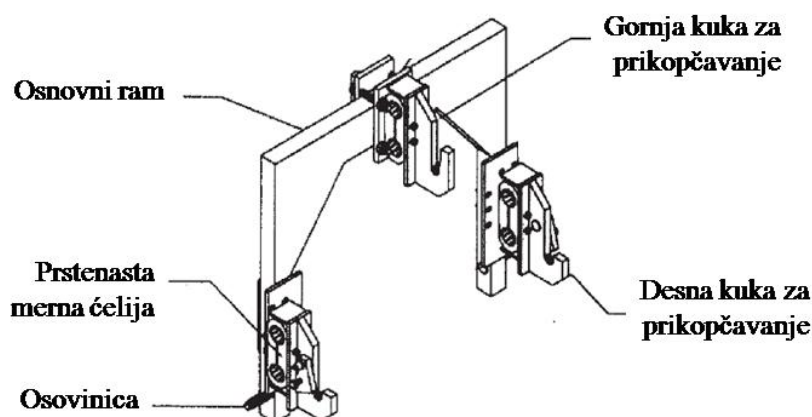


Sl. 28. Nošeni merni ram u izometriji sa dispozicijom elemenata:

*a* - unutrašnji kutijasti ram; *b* - spoljašnji kutijasti ram; *c* - merna ćelija; *d* - veza merne ćelije sa unutrašnjim ramom; *e* - gornja veza sa mašinom; *i, j* - donje veze sa mašinom

Dizajn rama je koncipiran kao "II" ram koji se montira između traktora i priključne mašine. Dizajn omogućava prilagođavanje tačaka veze na ramu prema potrebama i konfiguraciji priključne mašine. Takođe, omogućeno je lako priključivanje radnih mašina kategorije I i II preko tzv. automatskih kuka koje se nalaze na ramu (sl. 29). Merni elementi se sastoje od tri osmougaone prstenaste merne ćelije koje su postavljene između "II" rama i ležišta kuke.

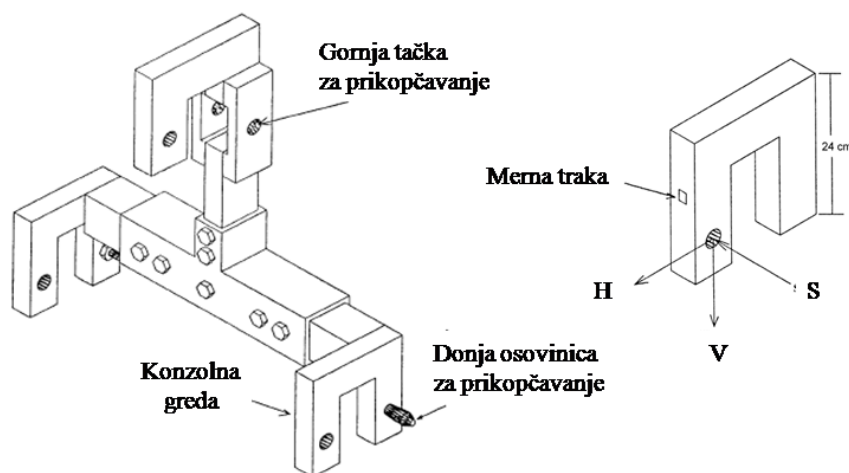




Sl. 29. "II"merni ram sa automatskim kukama za priklućivanje

Elektro-otporne merne trake postavljene su na osmougaone prstenaste merne ćelije u ćvorišta ugaonog naprezanja radi registrovanja opterećenja koje je proporcionalno sa horizontalnim i vertikalnim opterećenjem u centru prstena. Svaka merna ćelija predviđena je za merenje do 25 kN horizontalnog i 10 kN vertikalnog opterećenja pri srednjoj osetljivosti od 25,19  $\mu\text{Strain/kN}$  i 25,60  $\mu\text{Strain/kN}$ . Poljski demonstracioni test sa dinamometrom i test kalibracije ( $R^2=0,99$ ) pokazali su visok stepen pouzdanosti i preciznosti pri radu.

Autori Al-Jalil (2001) su merni ram u obliku obrnutog slova "T" (sl. 30). Dinamometar se sastoji od tri teleskopske grede povezane u centralnu "T" kutiju. Ramska konstrukcija se može prilagođavati po visini i širini zavisno od dimenzija priključne mašine i time omogućiti rad sa mašinama I i II kategorije.



Sl. 30. Model "T" mernog rama sa "II" mernim konzolama

Merne trake su postavljene na konzolama II oblika na kojima su postavljene merne trake sa mernim elementima povezanim u rasporedu *Wheatstone*-ovog mosta, zbog ćega se meri samo horizontalna komponenta sile otpora vuće. Vertikalna sila može biti registrovana, ali za

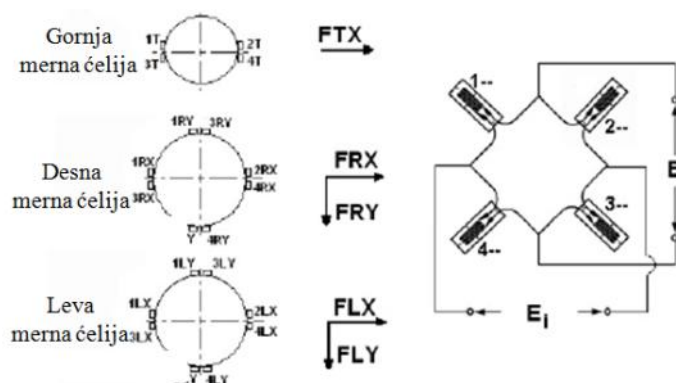


razliku od momenta savijanja sile otpora vuče i bočne sile, uz manju osetljivost zbog pojave aksijalnog efekta vertikalne sile. Maksimalni kapacitet merenja je 35 kN sile otpora vuče. Kalibracija mernog rama pokazala je visokom podudarnost primenjenog opterećenja i izmerenih vrednosti. Uređaj je testiran u nekoliko serija poljskih ispitivanja sa čizel plugom u uslovima glinovito-ilovastog zemljišta pri različitim radnim dubinama i brzinama.

Autori *Alimardani et al. (2008)* konstruisali su nošeni merni ram u obliku slova "II" za kategorije traktora 0 i I, mase 49 kg (sl. 31). Uređaj je koncipiran tako da istovremeno meri otpore vuče i po potrebi pogoni preko PVT. Na osovinicama za priključivanje rama za traktor postavljene su merne trake čime je omogućeno merenje opterećenja u X i Y ravni. U gornjoj osvinici postavljena je jedna merna traka i ona meri samo uzdužno opterećenje. Uređaj se sastoji od tri dela: šasijske, mernih elemenata i sistema za zapisivanje. Sistem je kalibrisan u laboratorijskim uslovima i atestiran u radu sa više modela nošenih plugova. Kalibraciona procedura pokazala je visok stepen linearne zavisnosti opterećenja i izmerenih vrednosti ( $R^2=0,99$ ). Poljski testovi pokazali su da uređaj može da snima otpor obrade zemljišta sa različitim mašinama za obradu u realnom vremenu bez sistemskih anomalija.



a)



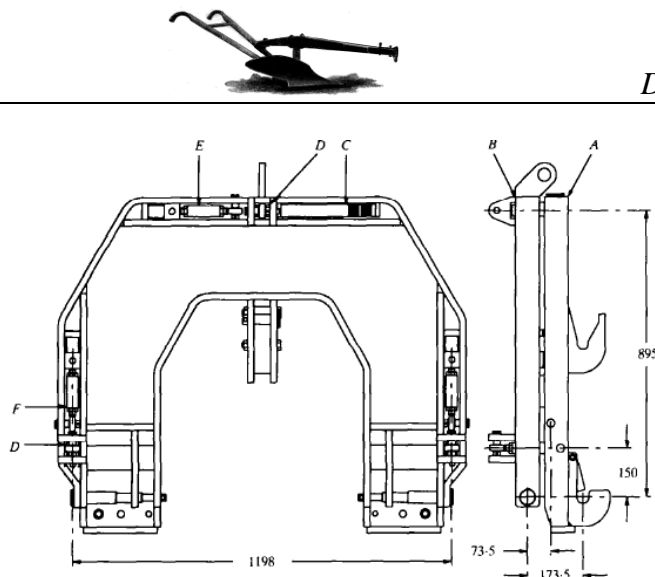
b)

Sl. 31. Arhitektura mernog uređaja:

a - merni ram; b - raspored mernih traka na osovinicama za priključivanje

Autor *Palmer (1991)* razvio je "II" merni ram standardne konstrukcije sa automatskim kukama za priključivanje (sl. 32). Uređaj je predviđen za rad sa nošenim oruđem I, II i III kategorije. Masa uređaja od 350 kg i udaljenost tačaka veze za 173,5 mm limitira upotrebu malih traktora i lakih oruđa zbog velikog dinamičkog opterećenja hidrauličnog sistema i otežanog uravljanja traktorom



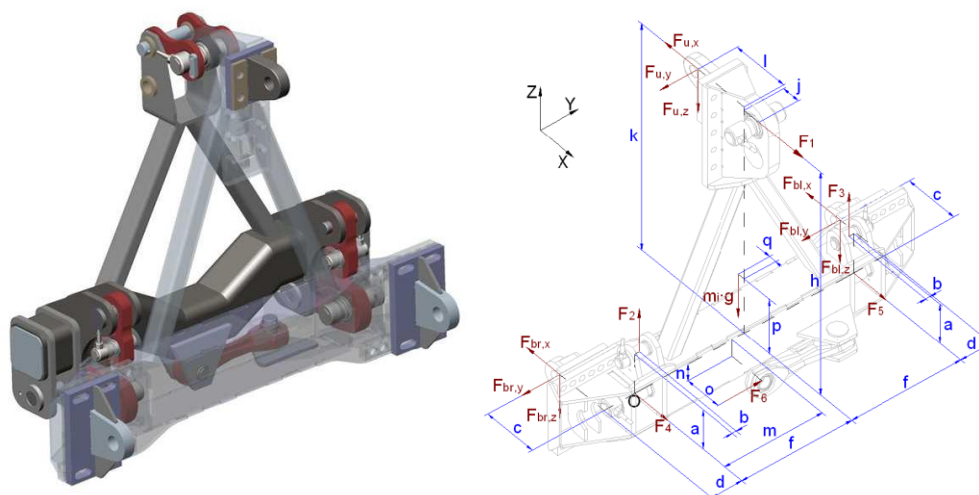


Sl. 32. Nošeni merni ram sa dispozicijom mernih ćelija:

A - zadnji ram sa automatskim kukama; B - prednji ram sa brzovezujućim kopčama; C - kućište mernog pojačala; D - merna ćelija uzdužnog opterećenja; E - merna ćelija bočnog opterećenja; F - merna ćelija vertikalnog opterećenja

. Merne elemente čine komercijalne merne ćelije koje se povezuju na merno pojačalo za pretvaranje analognog u digitalan signal. Uređaj ima mogućnost merenje horizontalnih, vertikalnih i bočnih komponenti otpora. Sprovedeni kalibracioni testovi pokazuju da je maksimalna greška pri merenju vertikalnih sila 3,9%, a pri merenju horizontalnih 2,3%.

Autori Pijuan *et al.* (2012) su projektovali i testirali merni ram za merenje horizontalnih, vertikalnih i bočnih opterećenja na uređaju za priključivanje radnih mašina II i III kategorije (sl. 33).



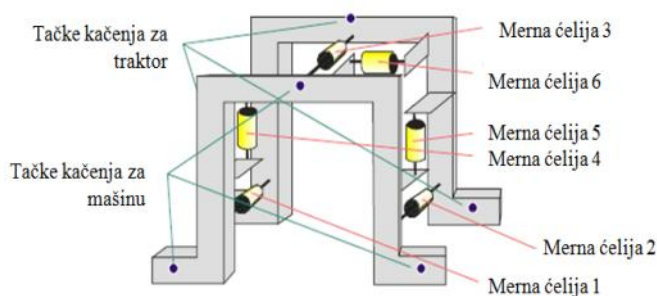
Sl. 33. 3D model mernog rama

Merni opseg horizontalnih opterećenja je 80 kN, vertikalnih 80 kN i bočnih 45 kN. Konceptijski je projektovan da minimalno utiče na dinamiku sistema kako težinom tako i



minimalnom širinom. Geometrijski je prilagođen da može da obavi priključivanje sa širokim spektrom mašina, pa čak i onih koje se pogone preko PVT. U radu su takođe prikazani rezultati prvog testa sa kombinovanim razrivačem. Rezultati pokazuju da je uređaj veoma koristan kod ocenjivanja energetske-ekonomskih pokazatelja rada mašina za obradu.

Papathanassiou *et al.* (2002) su razvili dinamometar u vidu dvostrukog "II" rama (sl 34). Dinamometar ima dvostruku piramidu za priključivanje, sa prednje strane za traktor, a sa zadnje strane za radnu mašinu. Na veza ramova je preko 6 standardnih merih ćelija koje eliminišu stepene slobode kretanja jednog rama u odnosu na drugi u sve tri ravni uz istovremeno merenje sile otpora u sve tri ravni. Tri merne ćelije horizontalno su postavljene i paralelne su pravcu kretanja, dve vertikalno i jedna poprečno.



Sl. 34. Konstrukcija dvostrukog "II" mernog rama

Al-Suhaibani *et al.* (1994) razvili su mobilni instrumentalizovani paket na traktoru MF3090 za merenje performansi traktora i priključne mehanizacije.

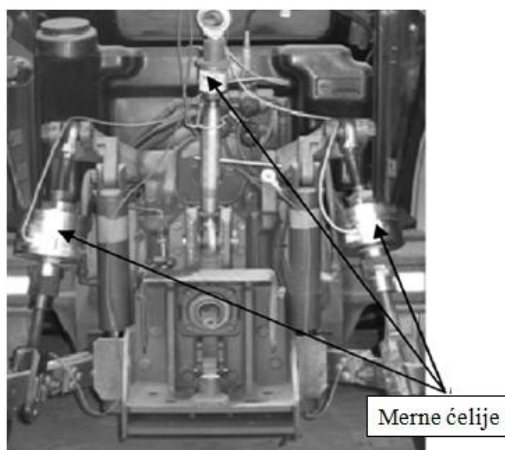


Sl. 35. Merni sistem instaliran na priključnim polugama hidrauličnog podizača traktora MF3090



Al-Suhaibani i Ghaly (2010) su u svojim istraživanjima koristili instrumentalizovan traktor MF3090 (sl. 35) za merenje otpora vuče na razrivačkom oruđu u uslovima peskovitog zemljišta, koje je obrađeno raonim plugom na različitim dubinama i radnim brzinama. Oni su zaključili da se oko 16,6% sile vuče troši na otpore rezanja, dok se 83,4% sile vuče troši na mrvljenje zemljišta. Prema njihovim navodima, vrednosti vertikalne sile otpora su u svim varijantama daleko veće od horizontalnih vrednosti sile otpora. Rezultati govore da je dubna oranja imala najveći uticaj na otpor vuče razrivača u svim tretmanima i da je optimalna brzina u uslovima testa bila 1,75 m/s.

U cilju istraživanja potrebne snage vuče za pojedine priključne mašine, *Bentaher et al.* (2008) su izgradili sistem za merenje otpora na mašinama za obradu. Sistem se sastoji od tri merne ćelije postavljene na polugama podiznog mehanizma traktora i pomoću njih se mere komponente otpora vuče u sve tri ravni (sl. 36).



Sl. 36. Instrumentalizovani podizni mehanizam traktora

Kalibracija sistema obavljena je u laboratoriji i u polju uz visok procenat linearne korelacije primenjenog opterećenja i izmerenih vrednosti. S obzirom na to da je analiza sila koje deluju na merne ćelije kompleksna zbog prostorne orijentacije davača sila na polugama, autori su u tu svrhu razvili poseban softver za obradu i zapisivanje podataka. Oni ističu da se prednosti ovakvih sistema ogledaju u malom broju davača i neremećenju geometrije sistema traktor-mašina.

**Uređaji za merenje vertikalnog otpora.** Za ocenu vertikalne varijacije fizičkih osobina zemljišta, korišćeni su uređaji koji su koncipirani kao podrivačko telo. Cilj njihove upotrebe je detekcija sabijenih slojeva kretanjem radnog tela gore-dole tokom kretanja po parceli. *Stafford i Hendrick (1988)* poredili su dve metode za lociranje dubine najsabijenijeg sloja zemljišta u laboratorijskim uslovima simulirajući različite tipove zemljišta i njihovo stanje.



Njihov zaključak je da sila otpora zemljišta koja deluje na takav tip oruđa (uzano telo) nije u stanju sa sigurnošću da prepozna prisustvo sabijenog sloja. Drugo rešenje je sa veoma tankim nožastim radnim telom sa negativnim nagibom. Ovo rešenje se pokazalo kao pogodno za snimanje varijacija kompaktnosti zemljišta po dubini, a time i pozicioniranje sabijenih slojeva. *Manor i Clark (2001)* dizajnirali su merni podrivač za detektovanje otpora zemljišta i dubine sabijenih slojeva merenjem vertikalne sile na podrivaču i radne dubine. Autori su zapazili da kada je radno telo na dubini iznad sabijenog sloja, reakcija zemljišta je vertikalna nagore, a u slučaju kada je radno telo na dubini ispod sabijenog sloja, tada je dominantna reakcija zemljišta nadole.

Takođe, veoma tanki radni elementi u vidu diskosnog crtala korišćeni su za ocenjivanje sabijenosti zemljišta. Diskosno crtalo prečnika 81 cm (sl. 37) za merenje otpora zemljišta korišćeno je od strane *Pitla i Wells (2006)*. Za variranje dubine u granicama od 10 do 33 cm koristili su hidraulični cilindar.



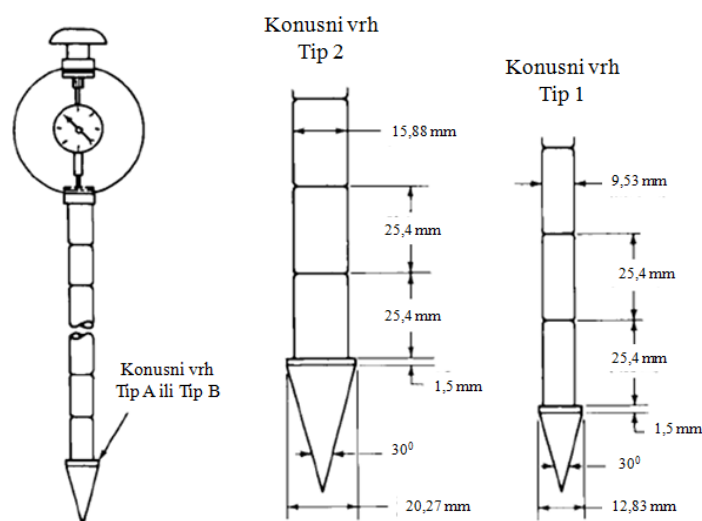
Sl. 37. Instrumentalizovano diskosno crtalo

Vertikalna reakcija zemljišta snimana je kontinualno u vremenu. Prosečna vrednost indeksa konusa između dubina 10 i 33 cm bila je poređena sa prosečnom vrednosti diskosnog indeksa (DI) koji zapravo predstavlja silu prodiranja segmenta diska koji je u kontaktu sa zemljištem. Dobijeni koeficijent korelacije iznosio je  $R^2=0,51$ . Maksimalna vrednost CI na površini od 0,4 ha izmerene površine bila je na dubini 15,2 cm, dok je diskosni penetrometar izmerio maksimalnu sabijenost na dubini od 10,2 cm. Autori su dokazali da je moguće predvideti CI pomoću diskosnog indeksa primenom empirijskog linearnog obrasca.



### 2.3.2. Sistemi za merenje mehaničkog otpora u mestu (*in-situ*)

Konusni penetrometar se tradicionalno koristi za ocenu sabijenosti zemljišta u slojevima. Prema standardu ASAE S313.3 (ASAE, 2004), konusni penetrometar se sastoji od štapa sa konusnim vrhom poznatog prečnika osnove, čiji ugao šiljka može biti  $30^\circ$  ili  $60^\circ$  (sl. 38). Širina osnove konusa može biti 20,27, 15,88, 12,83 i 9,53 mm. Izbor vrha konusnog penetrometra zavisi od sabijenosti zemljišta i osetljivosti koja se želi postići tokom merenja. Za sabijenija zemljišta ide se na uže konuse, dok se na rastresitijim biraju širi. Standardno se za većinu poljoprivrednih zemljišta koriste konusi prečnika 12,83 i 15,88 mm. Brzina utiskivanja konusnog vrha je konstantna i iznosi 3 cm/s.



Sl. 38. Konusni penetrometar prema standardu ASAE S313.3 (2004)

Penetrometri su suštinski dinamometri koji mere silu utiskivanja konusnog vrha u zemljište pri konstantnoj brzini. Konusni indeks (CI) kao pokazatelj sabijenosti zemljišta se računa kao količnik penetracione sile i površine osnovice konusa (jedinica kPa, MPa). Po definiciji, indeks konusa predstavlja srednju vrednost otpora prodiranja konusa u sloju zemljišta dubine 150 mm. Indeks konusa je empirijski pokazatelj stanja zemljišta i proizvod je nekoliko svojstava zemljišta. Postoje dva tipa penetrometara koji se koriste u komercijalnoj upotrebi i to penetrometar sa ručnim utiskivanjem i automatskim utiskivanjem u zemljište.

Nekoliko različitih studija (Farrell i Greacen, 1965; Rohani i Baladi, 1981; Yu i Mitchel, 1998; Tekeste et al., 2007) bavilo se ponašanjem zemljišta pri testiranju pomoću vertikalnog penetrometra. Te studije bazirane su na: teoriji nosivosti zemljišta, teoriji kavitacionog



širenja, deformaciji u stabilnom stanju, analizi konačnih elemenata i na laboratorijskim eksperimentalnim metodama.

Za merne uređaje koji mere u horizontalnoj ravni, komponenta kohezije je dominantna, dok je za penetrometre koji mere u vertikalnoj ravni, gravitaciona komponenta jednako važna kao koheziona.

*Tekeste et al. (2007)* su utvrdili da analitički pristup ne mora biti idealan za objašnjavanje dinamike zemljišta tokom vertikalne konusne penetracije, naročito u heterogenim zemljištima. Oni ukazuju na poteškoće koje nastaju kod definisanja oblika pomeranja zemljišta pre analize sila. Povodom toga, razvili su osnosimetričan model konačnog elementa u svrhu simulacije konusne penetracije. Simulacija pokazuje da veličina zone plastične deformacije varira saglasno sabijenosti slojeva zemljišta. Zona plastične deformacije bila je veća ispod sabijenog sloja u odnosu na sabijeni sloj. Plastična deformacija koja nastaje prolaskom konusnog elementa ukazuje da je otpor prodiranja možda mera reakcije zemljišta u zoni delovanja koja je bila oko tri puta veća od širine konusa. Drugi autori (*Garciano et al., 2005*) merili su zonu kretanja zemljišta (zona dejstva) oko vertikalnog konusnog penetrometra u laboratorijskim uslovima. Oni su saopštili da zona kretanja zemljišta za konus prečnika 12,83 mm ima poluprečnik oko 76,2 mm oko centralne šipke penetrometra. Razlika između predviđene (*Tekeste et al., 2007*) i izmerene (*Garciano et al., 2005*) zone delovanja može biti posledica razlika u strukturi zemljišta i metodologiji.

**Ručni vertikalni konusni penetrometri.** Kod ovog tipa penetrometra rukovalac utiskuje konusni šiljak silom koju sam proizvodi i prenosi sa ruku na rukohvate, odnosno vertikalnu šipku. U praksi se sreću dve klase ovih uređaja. Prva klasa penetrometara su manometarski uređaji koji zahtevaju više angažovanog vremena i dva operativca, jedan radi utiskivanje, a drugi beleži silu i dubinu. Druga klasa uređaja su penetrometri koji se ručno utiskuju, ali automatski zapisuju silu i dubinu u sopstvenu memoriju. *Bajla et al. (2012)* su opisali novo rešenje ručnog penetrometra sa sofisticiranim dizajnom (sl. 39). Uređaj spada u klasu "datalogger"-a što znači da automatski zapisuje dubinu i silu u svoju memoriju, koja se naknadno isčitava ili povezuje sa PC-om radi prenošenja podataka. Uređaj u sebi ima integrisan GPS uređaj koji određuje geografsku poziciju tokom merenja, a koordinate se istovremeno zapisuju sa vrednostima sile otpora. Iako je standardizovana, upotreba ručnog konusnog penetrometra ima određene nedostatke. Pri merenju, brzina utiskivanja bi trebala biti konstantna, što je praktično nemoguće obzirom da se utiskivanje obavlja ručno.





Pogodnost ručnog penetrometra je mogućnost njegove upotrebe bez ograničenja u svim fazama razvoja useva.

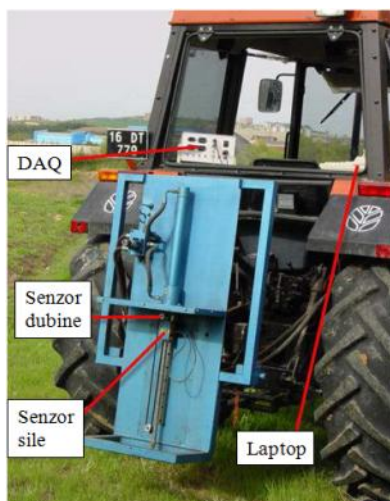


Sl. 39. Originalno rešenje vertikalnog ručnog penetrometra (Bajla et al., 2012)

S obzirom da se merenje obavlja u jednoj diskretnoj tački, a da je zemljište vrlo heterogena sredina, da bi se dobila verna slika prostorne raspodele sabijenosti neophodno je ponoviti merenje na velikom broju lokacija na parceli što zahteva znatno vremensko angažovanje.

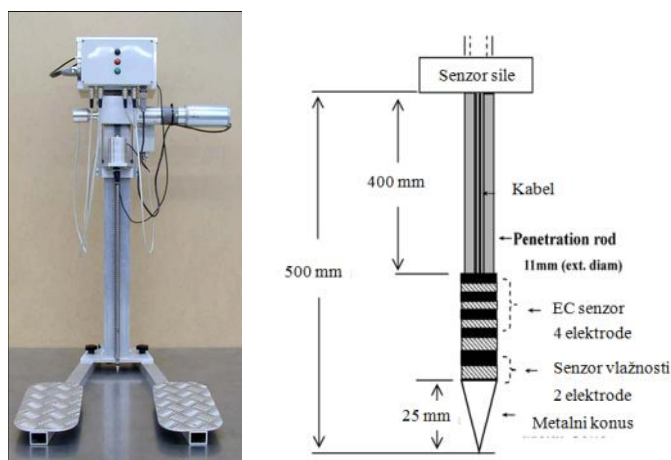
**Automatizovani vertikalni konusni penetrometri.** Automatizovani penetrometri se obično montiraju na traktor, kamion ili prikolicu, a sila utiskivanja se proizvodi mehanički, hidraulički ili električnim aktuatorima, dok se sila i dubina automatski zapisuju pomoću sistema za akviziciju podataka. Zbog mogućeg neujednačenog utiskivanja kod hidraulično pogonjenih penetrometara, rezultati dobijeni sa tim uređajima mogu biti slični kao kod ručno pogonjenih (Morrison i Bartek, 1987). Automatski pogonjeni penetrometri omogućavaju prikupljanje drastično veće količine pouzdanijih podataka u poređenju sa ručnim. Nedostaci se ogledaju u nemogućnosti primene u visokim usevima u kasnijim fazama razvoja, izuzev ukoliko se montiraju na vozila visokog klirensa (Tollner i Verma, 1984). Takođe, njihiva cena je daleko veća, a konstrukcija znatno složenija i zahtevaju dodatni izvor snage u poređenju sa ručnim penetrometrima.

Yücel Tekin et al. (2008) su razvili sopstveno rešenje automatizovanog penetrometra za potrebe generisanja 2D i 3D mapa sabijenosti (sl. 40). Merenje sabijenosti se obavlja u intervalu od 0 do 40 cm dubine sa rezolucijom od 1 cm. Uređaj se montira na zadnji traktorski podizač, a utiskivanje obavlja hidraulični cilindar. Pored mehaničkog dela opreme, uređaj čine i GPS prijemnik i softver za akviziciju podataka i generaciju mapa.



Sl. 40. Automatizovani hidraulični penetrometar

Yurui et al. (2008) prikazali su novu, originalnu verziju električno pogonjenog vertikalnog penetrometra za simultano merenje sabijenosti, vlažnosti i električne kapacitivnosti zemljišta (sl. 41). Utiskivanje konusa obavlja se pomoću jednosmernog elektromotora, a merenje utrošene struje pomoću Hall-ovog strujomera. Određivanje sile penetracije je indirektno, preko utrošene električne energije, odnosno trenutnog protoka struje kroz DC motor.



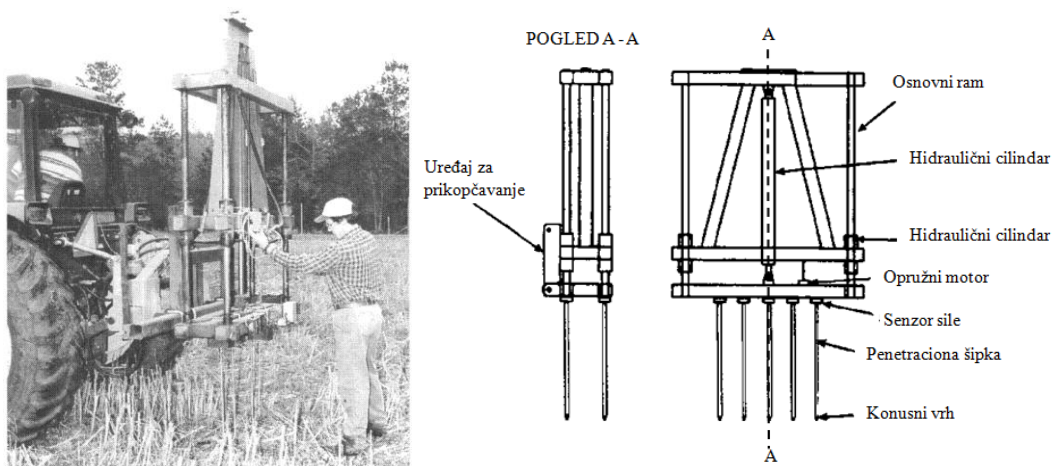
Sl. 41. Vertikalni automatizovani kombinovani penetrometar na električni pogon

Raper et al. (1999) uspešno su testirali novi uređaj za merenje sabijenosti zemljišta. Uređaj se montira na zadnji hidraulični podizač traktora i omogućava dobijanje više podataka o sabijenosti zemljišta u jednom ciklusu merenja. Na jedinstvenom ramu postavljeno je deset mernih šipki sa konusim vrhovima koje se istovremeno utiskuju pri brzini 3 cm/s pomoću hidrauličnih cilindara (sl. 42). Brzina utiskivanja se reguliše preko regulatora protoka hidrauličnog ulja i brojem obrataja motora traktora. Maksimalna dubina penetracije je 0,91 m.





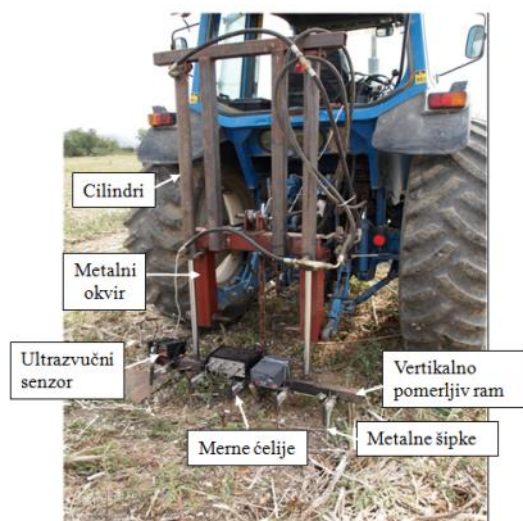
Merne ćelije su montirane direktno na šipkama sa maksimalnim kapacitetom od 7 MPa. Dubina prodiranja se meri pomoću opružnog motora.



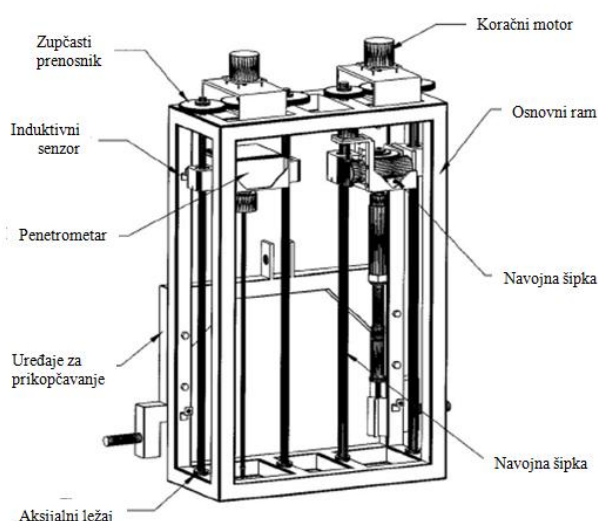
Sl. 42. Hidraulični višestruki vertikalni penetrometar

Slično rešenje automatizovanog penetrometra prezentovali su u svom radu *Fountas et al.* (2013). Robusni sistem montira se na podizni mehanizam traktora i pogoni se uz pomoć hidrauličnog sistema (sl. 43). Maksimalna dubina merenja je 0,85 m. Razmak između šipki je 0,25 m. Jednim ubodom dobijaju se podaci sa pet nezavisnih mernih šipki. Podaci o otporu prikupljaju se paralelno sa zapisivanjem GPS koordinate lokacije. Za potrebe zapisivanja podataka sa senzora napisan je program u Microsoft Visual Basic-u, verzija 6.0.

*Boon et al.* (2005) su konstruisali traktorski uređaj za potrebe *in-situ* merenja, odnosno merač sabijenosti i smicajne čvrstoće tla (sl. 44).



Sl. 43. Vertikalni hidraulični penetrometar



Sl. 44. Konstrukcija vertikalnog penetrometra-merača napona smicanja



Uređaj se priključuje na zadnji podizni mehanizam traktora. Uređaj se kači u tri tačke za traktor. Dve merne šipke sa konusnim vrhom se utiskuju pri merenju sabijenosti, a za merenje napona smicanja jedna se utiskuje i istovremeno rotira. Pogon je izveden od koračnog motora i zupčastih prenosnika. Za kontrolu kretanja sonde koriste se logički kontroler (PLC) i druga spoljna elektronika kao i senzorski uređaji. Lociranje pozicije merenja je pomoću GPS prijemnika, a akvizicija i memorisanje podataka obavlja se pomoću PC-a.

Kako bi automatizovali konusnu penetrometriju, autori *Raper et al. (1999)* razvili su višemerni sistem koji se sastoji od pet nezavisnih sonde u liniji. *Hall i Raper (2005)* zaključuju da automatizovani "stop-and-go" merni sistemi nisu u stanju da daju dovoljnu gustinu merenja koja je potrebna za mapiranje velikih površina. *Takeste et al. (2006)* tvrde da je za uspešnu varijabilnu obradu potrebno posedovati pouzdane podatke o sabijenosti zemljišta i o dubini sabijenog sloja. Npr. za Pacolet peskovito-ilovasto zemljište u jugoistočnom delu USA, predlaže se gustina merenja u mreži 20 m x 20 m. U odvojenim studijama, *Domsch (2006)* predlaže interval merenja od 10 m za određivanje dubine obrade neophodne da bi se eliminisao sabijeni sloj. Takođe, ista veličina mreže merenja se predlaže prilikom mapiranja.

Veliki broj rešenja mernih sistema ne umanjuje potrebu za daljim produbljivanjem saznanja vezanih za problematiku merenja otpora vuče. Postoje i istraživanja koja ukazuju da veza između otpora obrade i osobina zemljišta ne mora biti potpuno određena (*McLaughlin i Burt, 2000*). Jedan od razloga je nekonzistentnosti metode merenja otpora vuče sa metodama merenja drugih fizičko-mehaničkih osobina zemljišta. Neizvesna je relacija veličine koja se meri „in-situ“ u anizotropnom medijumu kakvo je zemljište sa veličinom otpora vuče dobijenog obradom celokupne zapremine zemljišta nekom od mašina za obradu. Stoga, sve veći broj autora razvija multisenzitivne sisteme, koji pored mehaničkih osobina zemljišta, prate i druga svojstva (*Sun et al., 2004, Mouazen i Herman 2006*). Pored prethodno pomenutog, postavlja se pitanje koliko je tehnika merenja otpora vuče zaista pouzdana, a metoda adekvatna u datim zemljišnim uslovima. U tom smislu, razvoj sistema za merenje otpora vuče predstavlja veliki izazov, jer osim projektovanja mehaničkog i mernog dela opreme, ima za cilj da odredi karakteristike sistema i njegovu interakciju sa oruđima odnosno zemljištem, kako bi se primenio adekvatan metod merenja. Za određivanje karakteristika sistema koriste se standardne procedure za mernu opremu, dok za ispitivanje sadejstva mernog sistema, oruđa i zemljišta, potrebna su terenska ispitivanja i naknadna detaljna analiza podataka.



### 3. Radne hipoteze

O bzirom je da je svaki komad zemljišta specifikum u pogledu sadržaja vlage, sabijenosti, strukture, mehaničkog sastava, sadržaja humusa, itd, proizilazi da je i mehanički otpor prostorno varijabilan shodno promenljivom stanju zemljišta. Dosadašnje tehnike merenja otpora obrade zemljišta pružale su informaciju o prosečnim vrednostima bez prostorne orijentacije podataka. Nedostatak takvog merenja mehaničkog otpora ogleda se u „malom broju“ dobijenih podataka koji ne daju prostornu sliku rasporeda otpora, tj. na osnovu kojih se ne može pronaći zakonitost koja bi sa visokom pouzdanošću opisala promene otpora na čitavoj parceli. Da bi se moglo sagledati u kojoj meri su otpori zemljišta u korelaciji sa stanjem drugih fizičko-mehaničkih osobina zemljišta, potreban je drugačiji pristup problematici merenja otpora na parceli. Bolja slika prostorne raspodele otpora na parceli dobija se ako se merenim vrednostima pridruže atributi geografske pozicije i realnog vremena.

Za realizaciju prethodno postavljenih ciljeva, pošlo se od sledećih hipoteza:

- 1. da je moguće izvesti efikasno tehničko rešenje mehaničke ramske konstrukcije za potrebe merenje otpora obrade zemljišta različitim priključnim mašinama kategorije II i III, a da se tokom merenja ne menja kvalitet obrade i učinak traktorskog agregata,**
- 2. da je moguće formirati merni sistem koga će činiti mehanički merni ram sa merno-akvizicionom opremom koji će imati visoku pouzdanost izmerenih vrednosti otpora vuče,**
- 3. da je moguće na osnovu prostorne analize vrednosti otpora vuče i vrednosti parametara fizičkog stanja zemljišta utvrditi međusobnu povezanost i**



- 4. da je moguće primeniti metode geostatističke analize na georeferenciranim podacima otpora zemljišta za potrebe naknadne izrade tematskih karata otpora.**



## 4. Materijal i metode

**T**okom razvoja mernog sistema, sprovedena su višestruka poljska i laboratorijska ispitivanja, primenjivane su standardizovane procedure, korišćena savremena merna oprema, konvencionalni traktori i mašine za obradu zemljišta.

Celokupan postupak razvoja i ocena valjanosti mernog sistema realizovan je po prethodno utvđenom planu koji se sastojao od sledećih faza:

- analiza postojećih rešenja opreme za merenje vučnih otpora,
- projektovanje i izrada mernog rama,
- kalibracija merne opreme i mernog rama,
- ispitivnje mehaničke pouzdanosti mernog rama tokom merenja sa nošenim i polunošenim priključnim mašinama za obradu kategorije II i III,
- pilot ispitivanja i verifikacija dobijenih vrednosti,
- razrada metoda obrade, analize i prikaza podataka i
- konačna ispitivanja na definisanim lokalitetima i priključnim mašinama.

Poljska testiranja obavljena su tokom 2011, 2012. i 2013. godine na dva različita lokaliteta na zemljištu tipa livadska crnica karbonatna na lesnoj terasi (Ravno Selo) i zemljištu tipa ritska crnica beskarbonatna (Vajska).

### 4.1. Eksperimentalne metode ispitivanja mernog sistema

U cilju provere valjanosti mernog sistema kao celine, bilo je neophodno obaviti detaljnu proveru svih funkcija, a to je obavljeno kroz seriju merenja u različitim zemljišnim uslovima i sa različitim priključnim mašinama i traktorima. Ispitivanja su sprovedena kao nezavisna testiranja, što znači da je svaki test imao drugačiju svrhu. Ukupno je sprovedeno 6 testova, s tim što su 4, 5. i 6. kao jedan test, dok su 1, 2. i 3. bili potpuno nezavisni.



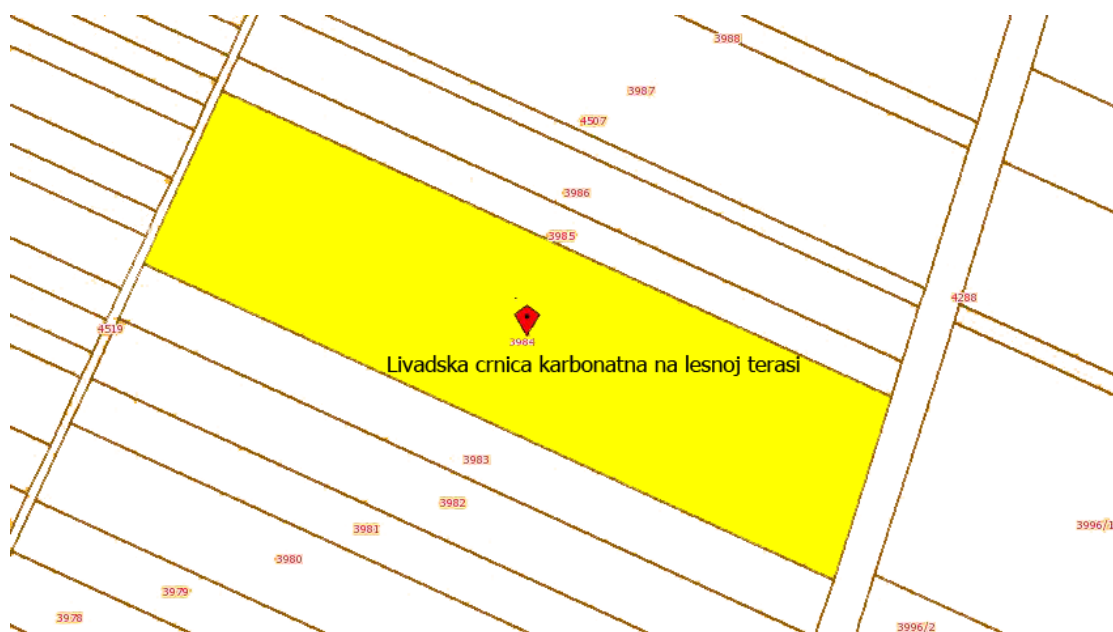
#### 4.1.1. TEST 1 - Preliminarno testiranje mernog sistema u operaciji oranja

Razvoj sistema za merenje otpora predstavlja veliki izazov, jer osim projektovanja mehaničkog i mernog dela opreme, važno je odrediti karakteristike sistema i njegovu interakciju sa oruđima odnosno zemljištem, kako bi se primenio adekvatan metod merenja. Za određivanje karakteristika sistema koriste se standardne procedure za mernu opremu (kalibracija), dok su za ispitivanje sadejstva mernog sistema, oruđa i zemljišta, potrebna terenska ispitivanja i naknadna detaljna analiza podataka.

Savremena merna tehnika pruža mogućnosti prikupljanja podataka u velikom frekventnom opsegu, što je značajna pogodnost za korisnika. Kada su u pitanju dinamična merenja, po pravilu se merni uređaji podešavaju na veće frekvencije zbog bolje rezolucije podataka. Negativna strana visokofrekventnih merenja, a u slučaju da se ne primene adekvatne metode filtriranja osnovnog signala, jesu neizbežna pojava visokofrekventnih signala koji potiču od nepoznatih izvora, a čiji uticaj dovodi do izobličenja osnovnog signala otpora vuče (*Chung i Suddth, 2004*). Takođe, velika frekvencija merenja podrazumeva ogromnu količinu podataka što može dovesti do komplikacija u prenosu, čuvanju i obradi podataka pa čak i do njihovog gubitka.

Cilj rada u okviru ovog poglavlja je bio da se testira novi merni uređaj u realnim uslovima i potvrdi njegova pouzdanost. Takođe, težnja je bila da se optimizuje metod merenja sa aspekta brzine očitavanja senzora.

**Zemljišni uslovi na parceli u momentu testa.** Poljski eksperiment obavljen je novembra 2011. godine u 19 prohoda, 400 m dužine ( $45^{\circ}25'20,62''\text{N}$ ,  $19^{\circ}37'14,75''\text{E}$ ). Parcela je po konfiguraciji horizontalna, sa minimalnim talasanjem površine, koristi se za redovnu ratarsku proizvodnju. Prethodni usev na parceli je bio merkantilni kukuruz proizveden konvencionalnom tehnologijom. Za ocenu prethodnog stanja zemljišta korišćeni su uzorci uzeti sa slučajno odabраних lokacija na parceli. U okviru *on-line* informativne podrške koju pruža zvanični internet portal Republičkog geodetskog zavoda Srbije, a koja je dostupna široj javnosti, na pedološkoj karti Vojvodine, za lokalitet testa, utvrđeno je da je zemljište tipa livadska crnica na lesnoj terasi (sl. 45). To zemljište odlikuje mrvičasta struktura i stabilnost strukturnih agregata obezbeđuje i dobru propustljivost za vodu ovom zemljištu.



Sl. 45. Geodetski plan parcela na lokalitetu Ravnog Sela sa pedološkom klasifikacijom zemljišta po tipu (izvor: <http://www.geosrbija.rs>)

U pogledu hemijskih svojstava karakteriše se neutralnom do slabo alkalnom hemijskom reakcijom, karbonati su prisutni od površine, dobro je obezbeđen humusom i biljnim hranivima. Livadska crnica se nalazi u prvoj bonitetnoj klasi. Ovoj klasi pripadaju vrlo dobra zemljišta, sa moćnim humusno-akumulativnim horizontom, ilovastim mehaničkim sastavom i dobrom strukturom. Na osnovu rezultata mehaničkog sastava i klasifikacije po Tommerup-u, konstatovano je da se radi o zemljištu tipa ilovasta glina (tab. 1).

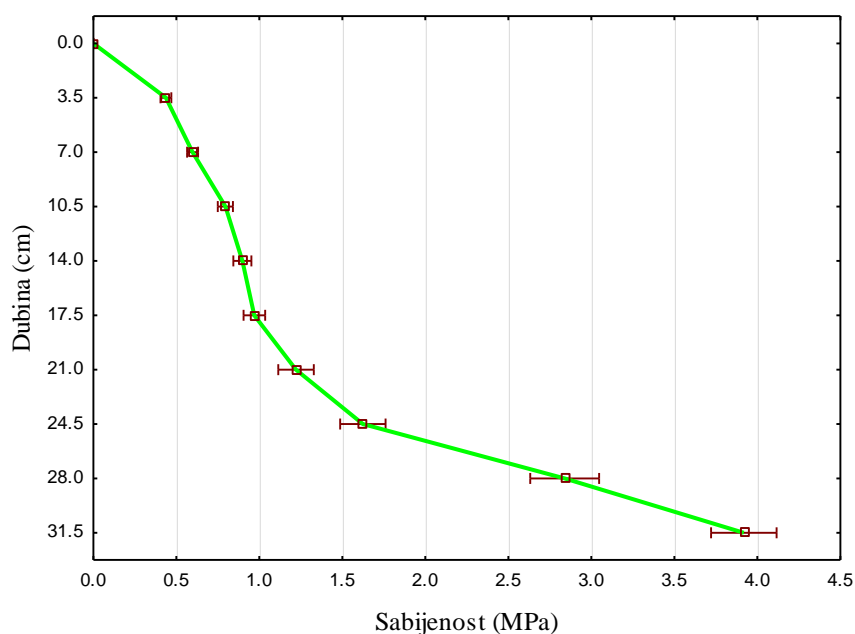
Tab. 1. Procentuali udeo pojedinih frakcija u zemljištu

	Krupan pesak	Sitan pesak	Prah	Glina	Ukupan pesak	Prah+glina
Sr. vred.	0,60	38,29	35,37	25,73	38,89	61,11
St. dev.	0,10	0,57	1,11	1,38	0,62	0,62
CV	16,67	1,49	3,13	5,37	1,60	1,02

Vlažnost zemljišta za trenutne uslove testa iznosila je  $17,4 \pm 1,6\%$ . Stanje sabijenosti zemljišta po slojevima prikazano je na slici 46. Neposredno pre testiranja merne opreme, jedan deo parcele je obrađen lakom tanjiračom do dubine 12 cm radi dobijanja dva različita početna stanja zemljišta-dve varijante. Neobrađeno polje je nazvano "polje A", a obrađeno "polje B". Podešena frekvencija očitavanja tokom testa bila je 50 Hz (Desbiolles et al., 1999) što je rezultiralo ukupnom broju sirovih podataka od  $2 \times 10^6$  prikupljenih sa svih kanala, a nakon eliminacije zapisa koji se odnosi na periode okretanja agregata, podaci su svedeni na



oko  $1,3 \times 10^6$ . Na signalima sa mernih ćelija primenjen je Bassel-ov niskopropusni filter kojim su eliminisani signali frekvencije veće od 20 Hz. *Hayhoe (2002)* ističe u njegovim istraživanjima da se značajna periodičnost otpora javlja pri frekvencijama između 5 Hz i 10 Hz. Detaljan opis merne opreme, akvizicije podataka i obrade, prikazan je u poglavlju 4.2.



Sl. 46. Sabijenost zemljišta po slojevima na parceli

Za potrebe poljskog testiranja korišćen je traktor MTZ 820 (tab. 7) i tro brazni raoni plug (tab. 8). Radni parametri (dubina obrade i radni zahvat) tokom testiranja bili su konstantni, a njihova kontrola urađena je merenjem u svakom proходу u više ponavljanja. Prosečna dubina obrade iznosila je  $0,25 \pm 0,05$  m, radnog zahvata  $1,05 \pm 0,13$  m i brzine  $1,82 \pm 0,09$  m/s. Saglasno tvrdnjama vodećih autora (*Adamchuk et al., 2001* i *Alihamsyah 1990*) da se stanje zemljišta može ocenjivati mernim oruđima samo za konkretne dubine, krenulo se od hipoteze da ukoliko se oruđe vuče kroz zemljište na konstantnoj dubini i širini radnog zahvata, pri konstantnoj radnoj brzini, sila otpora biće u korelaciji sa fizičkim stanjem zemljišta (*Godwin et al. 2007; Sahu i Raheman 2006*). Dubina obrade zadnjeg plužnog tela je limitirana pomoću kopirnog točka, a prednjeg sa hidrauličnim podizačem traktora čiji je radni položaj ograničen dopunskim mehaničkim fiksatorom.

**Postupak simulacije smanjene učestanosti merenja otpora.** Simulacijom smanjene frekvencije merenja želeo se postići efekat merenja sa manjom frekvencijom kako bi se utvrdilo da li je izabrana frekvencija merenja optimalna. Simulacija je rađena postupkom





smanjivanja obima uzorka, pri čemu je vršeno poređenje procena otpora zemljišta i brzine traktora dobijenih iz početnog i redukovanih uzoraka. Takođe, međusobno su poređene i dobijene vrednosti iz uzoraka sa redukovanim obimom. Ovim su detaljno ispitane mogućnosti zamene početnog uzorka sa proizvoljnim uzorkom manjeg obima.

Skup uzoraka sa redukovanim obimom je formiran na sledeći način. Početni uzorak dobijen očitavanjem podataka na 20 ms označen je sa  $W$ . Uzimanjem podataka sa svake parne i svake neparne pozicije iz uzorka  $W$  dobijeni su uzorci  $H1$  i  $H2$  sa dvostruko manjim obimom u odnosu na  $W$ , čime uzorci  $H1$  i  $H2$  odgovaraju uzimanju podataka na 40 ms. Takođe, posmatrani su i uzorci dobijeni uzimanjem svakog četvrtog podatka iz  $W$  i oni su označeni sa  $Q1$ ,  $Q2$ ,  $Q3$  i  $Q4$ , što odgovaraju uzimanju podataka na 80 ms. Procene za otpor zemljišta i brzinu traktora dobijene iz navedenih 7 uzoraka ( $W$ ,  $H1$ ,  $H2$ ,  $Q1$ ,  $Q2$ ,  $Q3$  i  $Q4$ ) su poređene statističkim metodama analize varijansi (ANOVA), korelacija (korelaciona analiza) i Pirsonovim testom za poređenje raspodela. Za statističku obradu korišćen je programski paket STATISTICA 12.

**JTFA (Joint time frequency analysis) analiza signala.** Kod obrade signala, vremenska analiza frekvencija obuhvata tehnike koje sagledavaju signal u vremenskom ili frekventnom domenu, pri tome koristeći različite vremensko-frekventne prikaze. Iako je prikaz signala u frekventnom domenu izuzetno koristan i najčešće korišćen, on ne daje informaciju o strukturi frekventnog spektra osnovnog signala tokom vremena. Umesto prikazivanja jednodimenzionog signala, JTF analiza proučava dvodimenzionalni signal čiji je domen dvodimenzionalna površ dobijena od signala koji je vremenski-frekventno transformisan (L. Cohen, "Time-Frequency Analysis," *Prentice-Hall*, New York, 1995. [ISBN 978-0135945322](#)).

Primenom ove analize se istovremeno posmatraju funkcija i njene transformacije (koje su često čvrsto povezane), kvalitetnije se prouče i bolje razumeju kao dvodimenzionalni objekat, nego ako se posmatraju odvojeno.

Praktična svrha primene vremensko-frekventne analize je to što klasična Furijeova analiza pretpostavlja da su signali beskonačni u vremenu ili periodično, dok su u praksi mnogi signali kratkotrajni i promenljivi tokom njihovog trajanja.

Za primenu JTF analize signala korišćena je posebna opcija u okviru programa *Catman AP* (HBM) koja omogućava spektralnu obradu signala.



#### 4.1.2. TEST 2 - Uporedno merenje otpora vuče dva različita pluga

Obrada zemljišta najvećim udelom učestvuje u potrošnji energije tokom ciklusa njivske proizvodnje što doprinosi značajnom umanjenju kranje dobiti proizvođača. Jedan od mogućnosti za smanjenje negativnih posledica izvođenja obrade je izbor optimalne mehanizacije koja će za konkretnu veličinu poseda, tip zemljišta, strukturu proizvodnje, itd. imati minimalne troškove upotrebe uz maksimalne kvalitativne efekte. U tom smislu, proizvođači sve više poklanjaju pažnju tom pitanju, mada još uvek sami nisu u stanju da donesu pravu odluku jer ne raspolažu konkretnim informacijama. Greške pri nabavci imaju velike negativne posledice na porast kako fiksnih tako i varijabilnih troškova (*Grisso et al. 1996*). Da bi se napravio pravi izbor mašine za obradu, neophodno je posedovati informacije o vučnim otporima za određeni tip zemljišta (*Alimardani et al. 2008, Al-Janobi et al. 1998*). Razvojem novih priključnih mašina sa povećanim radnim zahvatom i radnim brzinama, prethodno znanje i iskustvo farmera je malo upotrebljivo. Merenje otpora vuče u konkretnim zemljišnim uslovima je važan parametar za ocenu performansi konkretne mašine (*Naderloo et al., 2009*). Merenja vučnih otpora različitih priključnih mašina daju korisnu informaciju o energetske potrebama različitih sistema obrade i sistema menadžmenta na polju (*Perfect et al., 1997*). Istraživanja autora sa uspehom definišu potošnju energije na osnovu srednje vrednosti otpora vuče. Podaci o otporu vuče mašina za obradu u različitim zemljišnim uslovima mogu pomoći proizvođačima kod racionalne nabavke traktora i mašina za obradu i njihove efikasnije eksploatacije (*Alimardani et al., 2008; Kheiralla et al., 2003; Onwualu et al., 1998; Sahu et al., 2006*). Ova merenja mogu poslužiti i za bolje razumevanje interakcije zemljišta i mašine za obradu (*Upadhyaya et al., 1987; Owen et al., 1990*).

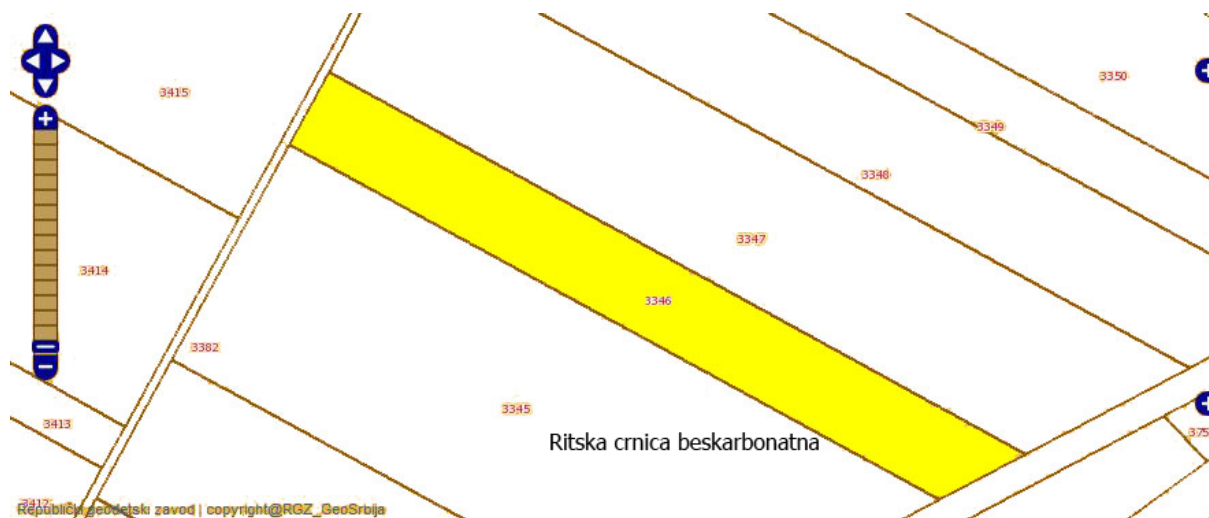
Jedan od metoda za povećanje poljske efikasnosti mašine za obradu je povećanje njenog učinka. Da bi se to ostvarilo, neophodno je pre svega povećati radnu brzinu. Međutim, jedan od osnovnih problema koji se javlja pri obradi zemljišta raonim plugom pri povećanim radnim brzinama je veliki otpor vuče koji raste eksponencijalno sa porastom brzine. *Hunt (1973)* navodi da je otpor vuče raonog pluga pri brzini od 20 km/h za 150% veći nego pri brzini od 5 km/h. Istraživanja Iowa Statate University ukazuju da zavisnost otpora vuče pluga od radne brzine nije univerzalna za sve tipove plužnih dasaka (*Eidet, 1974*).

Veliki broj autora se bavio problematikom određivanja otpora vuče raonog pluga. Kod većine autora, rezultati ukazuju da se otpor vuče može predstaviti kao kvadratna funkcija radne brzine (*Gill i Vanden Berg 1968; Kepner et al., 1982; Goryachkin 1968; Godwin 2007*).



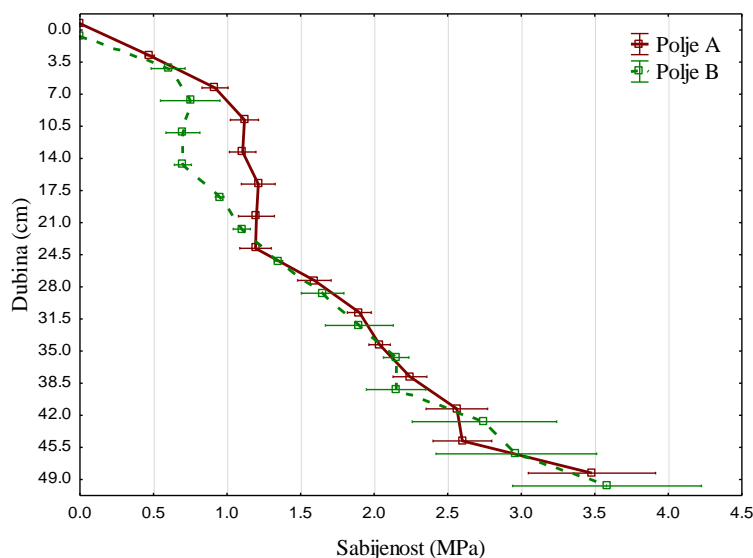
Cilj rada bio je utvrditi da li postoji razlika u otporu vuče dva identična pluga od kojih je jedan opremljen rešetkastom, a drugi sa punom plužnom daskom u identičnim zemljišnim uslovima.

**Zemljišni uslovi na parceli u momentu testa.** Poljski eksperiment obavljen je novembra 2012. godine u pokrajni Vojvodina, severna Srbija ( $19,1^0$  E,  $45,4^0$  N) na površini od 1,12 ha. Na osnovu „on-line“ pedološke klasifikacije zemljišta na kome se nalazi parcela, zemljište pripada tipu ritske crnice (sl. 47). Prethodni usev na parceli bila je merkantilna soja proizvedena konvencionalnom tehnologijom. Da bi se stvorili različiti zemljišni uslovi na istoj parceli, a istovremeno eliminisale lokalne ekstremne specifičnosti zemljišta, na polovini od ukupne površine je obavljeno podrivanje, dok je druga polovina bila neobrađena. Podrivanje je izvedeno na dubini od oko 35 cm nakon skidanja preduseva. Neobrađeno polje nazvano je „polje A“, a podrivano „polje B“, dok je plug sa punom plužnom daskom označen sa „MP“, a sa rešetkastim plužnom daskom „SMP“. Sa oba pluga napravljena su po tri prohoda na svakom od tretmana (neobrađeno i podrivano) što je ukupno 12 prohoda tokom testa. Za ocenu prethodnog stanja zemljišta korišćeni su uzorci uzeti sa slučajno odabranih lokacija na parceli.



Sl. 47. Geodetski plan parcela sa pedološkom klasifikacijom zemljišta po tipu na lokalitetu sela Vajska (<http://www.geosrbija.rs/rga/default.aspx?gui=1&lang=2#>)

Trenutna vlažnost zemljišta je za konkretan slučaj iznosila na „polju A“ iznosila je  $19,3 \pm 0,42\%$ , a na „polju B“  $17,3 \pm 0,2\%$ .



Sl. 48. Sabijenost zemljišta na varijantama ogleda A i B

Dijagram sabijenosti zemljišta po slojevima prikazan je na slici 48. Tokom poljskog testiranja korišćen je traktor John Deere 6930 sa neto snagom motora od 98 kW i dva četvorobrazdna raona pluga, istog tipa, proizvođača i geometrije plužnih tela (univerzalan tip plužne daske), s tim što je jedan bio opremljen rešetkastom, a drugi punom plužnom daskom (tab. 8). Radni zahvat se može podešavati u granicama 1,44-1,92 m. Oba pluga radila su pri istim radnim parametrima koji se nisu menjali tokom testa kako bi efekat pužnog tela maksimalno došao do izražaja kod pojave vučnih otpora. Ostvareni prosečni zahvat tokom merenja za oba pluga je  $1,47 \pm 0,08$  m.

Tab. 2. Realizovane radne brzine tokom testa

Tretman Plug	GPS brzina (m/s)			
	Polje A		Polje B	
	MP	SPM	MP	SPM
Min	1,16	1,32	1,57	1,53
Max	2,16	2,09	2,57	2,34
Sr.vred.	1,76	1,71	2,24	2,06
St. dev.	0,16	0,15	0,16	0,17

Istraživanja drugih autora pokazuju da nekontrolisana varijacija radnog zahvata prvog plužnog tela naročito ako se radi o višebraznom plugu, ne utiče značajno na promenu otpora vuče (*van Bergeijk et al., 2001*). Kontrola dubine obrade i širine radnog zahvata obavljena je na svakom proходу u deset ponavljanja. Dubina obrade zadnjeg plužnog tela limitirana je



pomoću kopirnog točka i tokom merenja iznosila je za MP plug  $0,3\pm 0,012$  m, a za SMP plug  $0,29\pm 0,02$  m. Realizovane brzine tokom merenja na oba tretmana prikazane su u tabeli 2.

Tokom planiranja eksperimenta pošlo se od hipoteze da ukoliko se dva oruđa vuku kroz zemljište pri konstantnoj dubini i širini radnog zahvata, pri konstantnoj radnoj brzini, prosečna sila otpora zavisiće od konstrukcije radnih tela oruđa i od lokalne varijacije fizičkog stanja zemljišta.

Kako bi se izbegao uticaj stanja oštrice raonika na krajnji ishod merenja, na oba pluga montirani su potpuno novi raonici.

**Prikupljanje i obrada podataka.** Tokom merenja otpora vuče podaci su prikupljeni simultano sa senzora sile i GPS prijemnika. Poljsko merenje otpora vuče obavljeno je pri frekvenciji očitavanja vrednosti sa davača od 10 Hz što je rezultovalo prikupljanju približno 52.000 podataka. Prikupljeni podaci su u programu *Catman Easy (HBM)* namenjenog za obrdu i analizu, svedeni na značajno manji broj (1/10 od početog) primenom postupka linearne interpolacije.

#### 4.1.3. TEST 3 - Merenje otpora vuče po principima precizne poljoprivrede

Proizvodnja ratarskih kultura je još uvek u velikoj meri podređena stanju zemljišta na parceli. Ono je po svojoj prirodi vremenski dinamičan i kompleksan sistem sa stalnom tendencijom anizotropije u svim smerovima. Prosesi u zemljištu se razlikuju po intenzitetu i prostornoj raspodeli. Zbog stohastičnog karaktera međusobne interakcije velikog broja različitih gradivnih elemenata u zemljištu i njihove interakcije sa spoljnim uticajnim faktorima (klima, čovek), pouzdana predikcija određene pojave unutar zemljišnog sistema radi primene preventivnih agrotehničkih mera, još uvek nije dostignuta. Zato se može konstatovati, da je stepen kontrole procesima u zemljištu u ratarskoj proizvodnji, suštinski ograničen i zasnovan je na *post festum* popravnim merama. To jeste jedan od osnovnih razloga zbog kojeg još uvek nije moguće postići apsolutni maksimum efikasnosti primenjene mere u njivskoj proizvodnji.

Da bi svaka biljka dala svoj maksimum u toku proizvodnog ciklusa, neophodno je sve ključne parametare dovesti do optimalnog nivoa na svim delovima parcele (*Hemmat i Adamchuk, 2008*). Važnu ulogu u realizaciji tog cilja imaju sistemi koji omogućavaju praćenje parametara realno u prostoru i vremenu. Prema *van Bergeijk et al. (2001)* prostornom determinacijom podataka otpora vuče i definisanjem međuzavisnosti sa ostalim



fizičkim svojstvima zemljišta, moguće je pojednostaviti postupak nadzora zemljišta na parceli. *Lapen et al. (2002)* navode da ukoliko je moguće pronaći pouzdanu vezu između otpora i sabijenosti zemljišta na čitavoj parceli, onda se šablon mapa otpora može primeniti za pravljenje mapa sabijenosti. *Buchter (1991)* navodi da su pojedinačni uzorci zemljišta najčešće prostorno zavisni i da ih treba tretirati kao prostorno povezana merenja što predstavlja osnovu za kompleksnu analizu prostorne varijabilnosti zemljišta. Samo razumevanje i modelovanje varijabilnosti zemljišnih osobina ima malu upotrebnu vrednost u preciznoj poljoprivredi, ukoliko se one ne mogu staviti u korelaciju sa fenomenima kao što su vlažnost zemljišta, mehanički sastav, bilans hraniva, itd. Geo-vremenski zapis otpora vuče dobijeni tokom normalne operacije obrade predstavlja pouzdani faktor prostornog predviđanja diskontinualnih zemljišnih parametara (zapreminska masa, vlažnost, sabijnost, itd.) primenom geostatističkih tehnika interpolacije. Otpor zemljišta, može biti korišćen kao alat za prepoznavanje različitih tipova zemljišta (*van Bergeijk et al., 2001*).

Iskustva govore da su, iako postoje brojne studije na temu izučavanja i tumačenja relacija otpora vuče i osobina zemljišta (*Oskoui et al., 1982; Dawidovski et al., 1988; Girma, 1992; Canarache, 1993; Desbiolles et al., 1999*), neophodna dalja istraživanja jer osobine zemljišta, a naročito međusobne interakcije mogu značajno doprineti otporu (*Kuczewski, 1981*).

Ovo ispitivanje predstavlja drugi deo procesa validacije mernog sistema kroz njegovu primenu u realnim proizvodnim uslovima sa ciljem dobijanja verodostojnih prostornih informacija (otpora vuče) koje će poslužiti za pouzdaniju procenu fizičko-mehaničkih osobina zemljišta na delovima parcele koji nisu bili predmet opservacije.

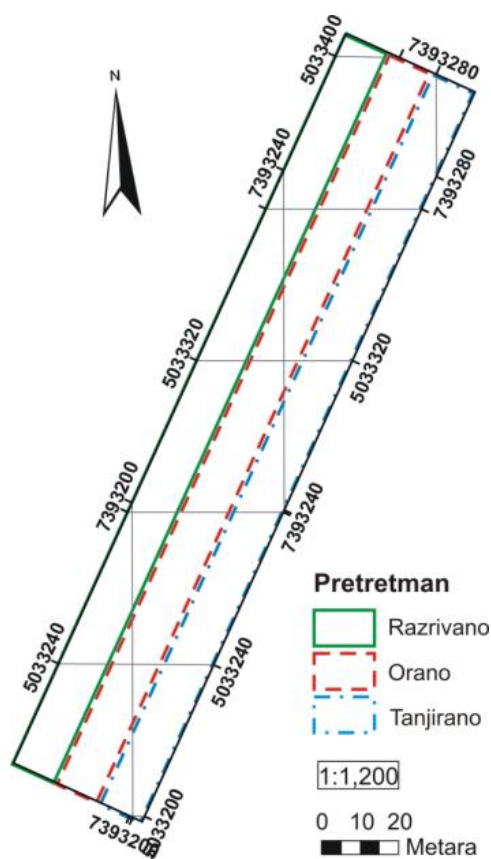
**Planiranje i priprema poljskog testa.** Planiranje eksperimenta započeto je 2011. godine odabiranjem parcele koja po konfiguraciji, obliku i veličini odgovara potrebama istraživanja. Odabrana parcela locirana je u rejonu južne Bačke, katastarska opština Ravno Selo ( $45^{\circ}26'1''N$ ,  $19^{\circ}37'47''E$ ). Površina parcele je bez nagiba i talasanja, površine od 0,8 ha, 200 m dužine. Predusev na parceli bila je merkantilna soja proizvedena konvencionalnom tehnologijom obrade i setve (tab. 3). Zemljište u području ogleda se po pedološkoj klasifikaciji (sl. 49) svrstava u tip livadske crnice karbonatne na lesnoj terasi. S obzirom da je zemljište u ovom potezu uopšteno posmatrano, prilično ujednačeno po fizičko-mehaničkim osobinama, namera tokom planiranja bila je da se primenom odgovarajućih mera stvore različiti zemljišni uslovi na parceli, odnosno lokalne varijabilnosti koje je moguće utvrditi standardnim metodama, a istovremeno prostorno locirati primenom sistema za merenje otpora vuče. S tom namerom su u jesen 2011. godine primenjena tri različita sistema obrade



zemljišta (oranje, tanjiranje i razrivanje) u fazi obrade i pripreme za setvu pšenice (preduseva).



Sl. 49. Geodetski plan parcela sa pedološkom klasifikacijom zemljišta po tipu na lokalitetu Ravnog Sela (<http://www.geosrbija.rs/rga/default.aspx?gui=1&lang=3>)



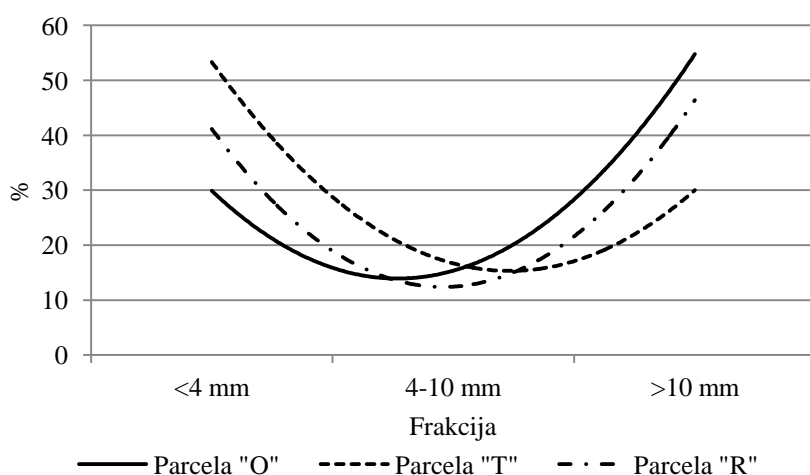
Sl. 50. Dispozicija parcele u prostoru sa prikazom rasporeda tretmana



Tretmani obrade su primenjeni na jednakim delovima, tako što je parcela prethodno podeljena na tri jednaka dela (sl. 50).

Tab. 3. Primenjena agrotehnika u proizvodnji pšenice (predtretmani parcele)

Osnovna obrada	Oranje	Razrivanje	Tanjiranje
Datum obrade	09.10.2011.	10.10.2011.	
Dubina obrade	20-25 cm	18-20 cm	10-15 cm
<b>Predsetvena priprema</b>			
Datum	11.10.2011.		
Broj prohoda	3	2	2
Struktura agregata			
>10 mm	54,77	30	46,41
4-10 mm	15,35	16,67	12,44
<4 mm	29,87	53,33	41,15
Vlaga zemljišta u momentu setve (12.10.2011.)	15%	18%	18%
<b>Hemijska analiza</b>			
pH u KCl	7,48		
pH u H <sub>2</sub> O	8,07		
CaCO <sub>3</sub> , %	11,26		
Humus, %	3,81		
N, %	0,26		
AL-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/100g	11,60		
AL-K <sub>2</sub> O mg/100g	20,90		
<b>Đubrenje NP</b>	135 / 90 kg/ha		
<b>Setva</b>			
Datum/Norma	17. 10. 2011. / 221 kg/ha		



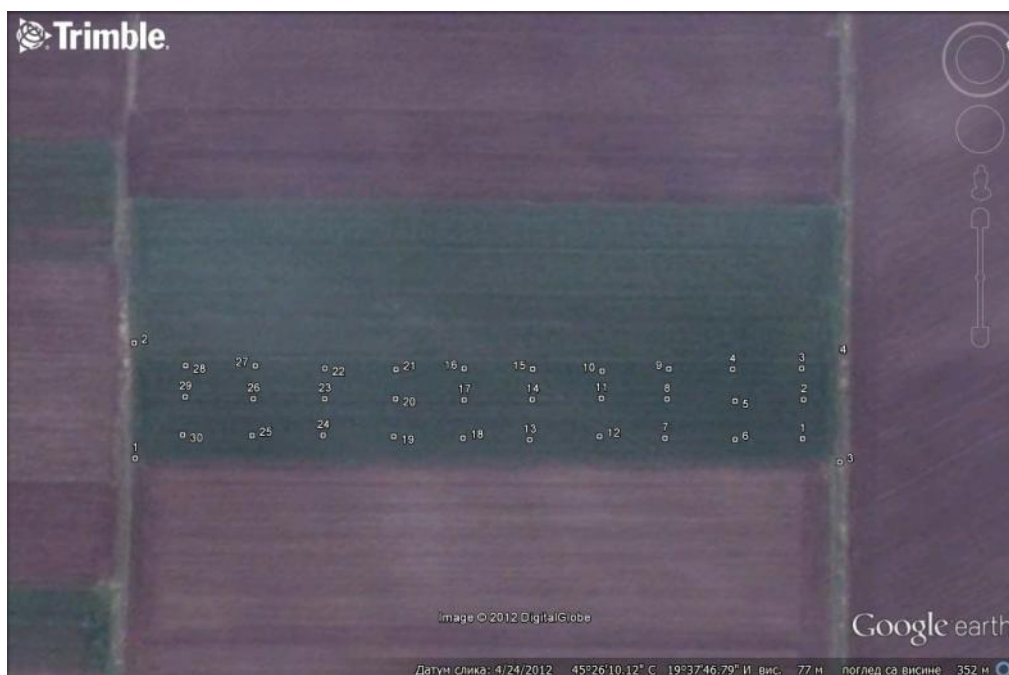
Sl. 51. Udeo pojedinih frakcija po tretmanima nakon predsetvene pripreme





Zbog niskog sadržaja vlage u momentu obrade i grube strukture zemljišta, priprema zemljišta je obavljena u dva prohoda standardnim setvospremačem na delu parcele koji je tanjiran i razrivan, a u tri prohoda gde je obavljeno oranje. Pre operacije setve urađeno je poljsko merenje frakcionog sastava zemljišta do dubine 30 cm, po 10 ponavljanja na svakom tretmanu metodom prosejavanja, u tri ponavljanja za svaki tretman (sl. 51). Na sitima su razdvajane frakcije manje od 4 mm, od 4 mm do 10 mm i preko 10 mm. Jedna trećina parcele obrađena je plitkim tanjiranjem na 10-15 cm dubine (parceta T), druga trećina oranjem na dubini 28 cm (parceta O) i treća trećina razrivanjem na 18-20 cm dubine (parceta R).

**Pozicioniranje kontrolnih tačaka na parceli.** Po skidanju useva pšenice, bilo je važno utvrditi početno stanje zemljišta na parceli po tretmanima. U tu svrhu korišćene su standardne metode određivanja zapreminske mase, vlažnosti, mehaničkog sastava i sabijenosti.



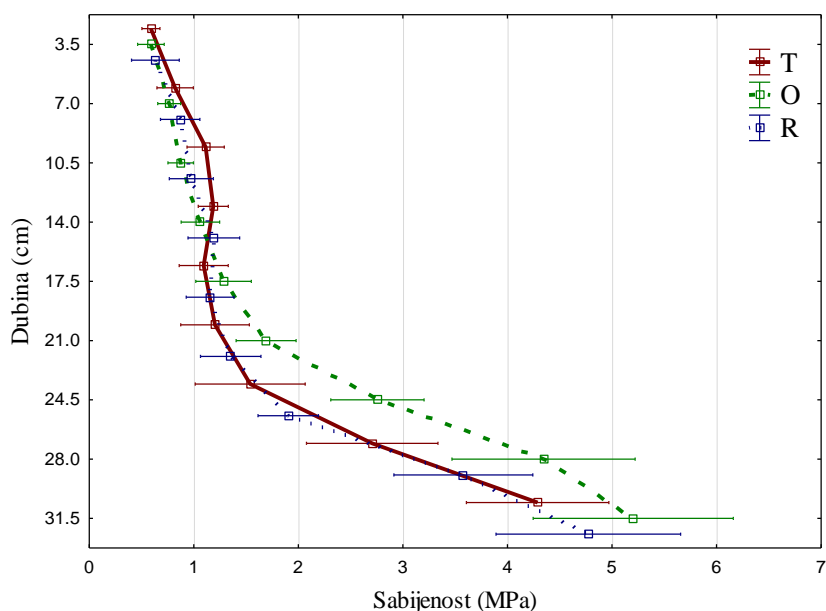
Sl. 52. Google Earth prikaz tačaka opservacija na parceli

Pre uzimanja uzoraka, parcela je geografski referencirana kako bi se precizno definisale tačke u prostoru u kojima će biti obavljeno uzorkovanje-merenje fizičkih osobina. Određivanje geografske lokacije mesta uzorkovanja obavljena je u više koraka. Prvo su premerene tačke-granice parcele pomoću GPS prijemnika Trimble Easy Guide 500. Nakon premera WGS koordinata, u programu Trimble Business Center su iste transformisane u dravne GKZ7 koordinate i generisan je vektorski podatak (*shapefile*). Potom je u programu Manifold napravljen sloj u kojem su ručno pozicionirane potencijalne tačke (njih 30, po 10 za svaku varijantu) na pravilnom geometrijskom rasporedu. Tako forimana karta, preneti je u



memoriju ručnog GPS prijemnika Trimble Juno SB sa kojim se vršila navigacija na tačke od interesa na parceli (sl. 52).

**Metod kontrole stanja zemljišta.** Ocena fizičkog stanja zemljišta rađena je na osnovu uzetih uzoraka u poremećenom i neporemećenom stanju. Pre uzimanja uzoraka označena su mesta na parceli na kojima će se obaviti uzorkovanje. Nakon obeležavanja, obavljeno je merenje sabijenosti zemljišta pomoću ručnog penetrometra u šest ponavljanja za svaku od obeleženih lokacija (ukupno 240 penetracija) (sl. 53).



Sl. 53. Grafik sabijenosti zemljišta po slojevima za različite pretretmane

Za određivanje zapreminske mase uzeti su uzorci u slojevima 0-15 cm i 15-30 cm u tri ponavljanja za svaki sloj. Isti uzorci su iskorišćeni za određivanje vlažnosti uzorka metodom sušenja do konstantne mase.

Tab. 4. Prosečno stanje pokazatelja fizičkog stanja zemljišta

	Sr. vred.±St. dev.	CV	Min	Max
Zapreminska masa ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,45±0,04	2,51	1,37	1,54
Vlažnost (%)	18,16±1,35	7,45	16,54	24,28
Sabijenost (MPa)	1,88±0,31	16,74	1,21	2,39
Pesak (%)	36,55±5,59	15,29	0,30	51,32
Prah (%)	35,29±2,89	8,20	23,12	38,24
Glina (%)	27,59±1,03	3,74	25,36	30,52

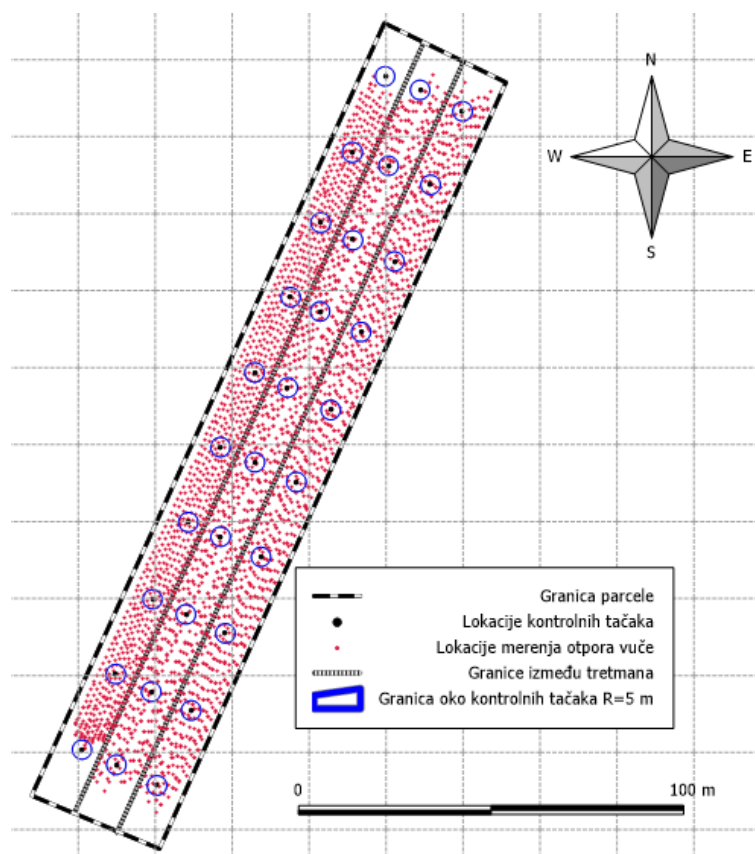
Za određivanje mehaničkog sastava uzeti su uzorci u poremećenom stanju paralelno sa uzimanjem uzoraka u neporemećenom stanju. Rezultati deskriptivne statističke obrade



osnovnih fizičkih osobina zemljišta prikazani su u tabeli 4. Na osnovu rezultata mehaničkog sastava zemljišta iz uzoraka, konstatuje se da zemljište pripada ilovasto glinovitom tipu.

**Postupak merenja otpora vuče.** Opor vuče trobraznog raonog pluga meren je po proceduri koja je objašnjena u poglavlju 4.2 uz lociranje tačaka merenja pomoću GPS-a. Dubina obrade i radni zahvat bili su konstantni tokom testa (0,27 m i 1,07 m). Brzina je takođe bila kontrolisana i u proseku je iznosila  $6,78 \pm 0,28$  km/h. Merenje otpora obavljeno je pri frekvenciji od 10 Hz. Kao vučno-pogonski agregat korišćen je traktor snage 61 kW (tab. 7) i trobrazni raoni plug (tab. 8). Merenje otpora vuče sprovedeno je na 30 prohoda. Paralelno sa merenjem stvarne brzine traktora, merena je i teoretska brzina točka, kako bi se izračunao procenat klizanja.

**Poređenje otpora vuče sa fizičkim osobinama zemljišta.** Kako bi se mogli porediti podaci o otporu i parametri zemljišta za istu lokaciju, obavljeno je izdvajanje (georeferenciranih) podataka o otporu vuče oko lokacija na kojima je obavljena kontrola fizičkog stanja zemljišta.



Sl. 54. Prikaz karte parcele sa lokacijama tačaka u kojima su obavljena merenja fizičkih osobina zemljišta i lokacijama interpoliranih vrednosti otpora vuče

Izdvajanje je podrazumevalo selektivno odabiranje podataka o otporu oko svake kontrolne tačke u krugu od 5 m. Ovaj postupak obavljen je u GIS programu *Manifold System* po



sledećoj proceduri: prvobitno su podaci o otporu i rasporedu kontrolnih tačaka vektorski prikazani u vidu slojeva čijim je preklapanjem napravljena mapa. Na mapi su potom selektovane tačke (podaci) u kojima je meren otpor oko kontrolnih tačaka (sl. 54).

#### **4.1.4. TEST 4, 5 i 6 - Utvrđivanje zavisnosti otpora vuče, spektralne karakteristike signala otpora i signala sa akcelerometra od faktora radne brzine**

Mnogi parametri utiču na dinamiku primene otpora vuče, između ostalih jedni od dominantnijih su tip i stanje zemljišta i radni parametri (brzina, dubina obrade i zahvat). Generalno se može reći da otpori vuče rastu sa porastom udela finijih frakcija u strukturi zemljišta, kao i sa porastom radne brzine, dubine i radnog zahvata (*Kepner et al., 1978* i *Macmillan 2002*). Karakter uticaja brzine na otpor vuče uslovljen je tipom zemljišta i tipom mašine za obradu (*Grisso et al., 1994*). Odnos brzine kretanja i promene otpora pri krtoj deformaciji (*Stafford 1984*) je rezultat sila koje su posledica pojave smičućih ravni, trenja i ubrzanja tj. pokretanja zemljišta iz stanja mirovanja. *Ryan (1972)* je utvrdio da promena radne brzine tokom oranja dovodi do promene režima kretanja zemlje po površini plužnog tela što za posledicu ima drastičnu promenu otpora vuče. *Schlegel i Morlin (1969)* navode da u procesu obrade zemljišta raonim plugom, najveći deo disipacije utrošene energije je funkcija radne brzine. *Girma (1991)* navodi da radna brzina igra važnu ulogu u dinamičnoj stabilnosti pluga. *Shöne (1966)* i *Gee-Clough (1977)* su zasnovali istraživanja o uticaju faktora brzine na pojavu otpora vuče, na kvadratnoj jednačini koju je razvio *Goryachkin (1968)*. Uopšteno govoreći, veliki broj istraživanja dokazuje da otpor predstavlja eksponencijalnu funkciju radne brzine kada se govori o većim rasponima brzine (*Gill i Vanden Berg 1968; Kepner et al., 1982; Stafford, 1979; Makanga, 1990*). Autori *Reaves i Schafer (1975), Summers et al. (1986)* i *Siemens et al. (1965)* u svojim istraživanjima pokazuju da je promena otpora linearnog karaktera ukoliko se otpori posmatraju u granicama eksploatacionih brzina. *Taniguchi et al. (1999)* je pri utvrđivanju uticaja brzine na otpor vuče plužnog tela u laboratorijskim uslovima, došao do smanjenog porasta vrednosti otpora što se tumači smanjenom adhezijom zemlje na plužnom telu zbog kraćeg zadržavanja, odnosno tzv. hidrodinamičkog efekta smanjenog trenja.

Mehanička svojstva zemljišta su karakteristika određenog tipa zemljišta koja u interakciji sa spoljnjim uticajima (klima, čovek, biljni i životinjski svet) poprimaju vrlo promenljivu prostornu kategoriju. Upravo je to osnovni razlog zbog čega je opterećenje na mašinama za



obradu periodičnog karaktera. Periodičnost je posledica varijabilnosti fizičkih osobina zemljišta kao i karaktera deformacije strukturnih agregata. Priroda deformacije zemljišnih agregata prilikom njihovog kretanja po radnom telu, dovodi do pojave smičućih ravni i stvaranja zemljišnih "blokova". Periodičnost formiranja smičućih ravni uzrokuje periodična opterećenja na alatima za obradu. Razmaci između ravni drobljenja zavise od tipa zemljišta, vlažnosti zemljišta, zapreminske mase zemljišta i brzine radnog tela (*Owen et al., 1990*). Manja frekvencija periodičnosti opterećenja na radnim telima, pod pretpostavkom da je radna dubina relativno konstantna, najčešće je odraz lokalne prostorne varijabilnosti u fizičkim osobinama zemljišta kao što su vlažnost zemljišta, tekstura zemljišta i sabijenost odnosno zapreminska masa (*Lapen et al., 2001a*).

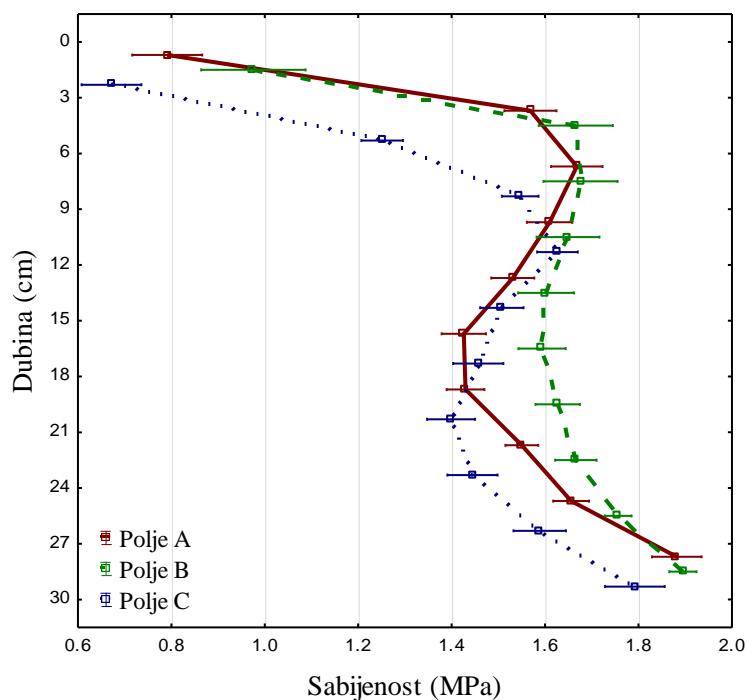
Iako je otpor vuče parametar koji bitno utiče na skoro sve segmente tehnološkog procesa u njivskoj proizvodnji kao i na radni vek mašina i traktora, može se reći da se raspolaže sa malo podataka o otporima vuče mašina za obradu za konkretne tipove zemljišta, odnosno radne brzine. Na osnovu prethodno navedenog, nameće se potreba za analiziranjem periodične prirode otpora sa stanovišta lokalnih (*Lapen et al., 2001b*) i globalnih osobina zemljišta i režima obrade.

Cilj ovog dela istraživanja je da se odredi matematička funkcija otpora vuče i radne brzine za različite uslove istog tipa zemljišta, zatim da se istraži spektar signala u realnim uslovima operacije jesenje osnovne obrade; da se odrede dominantne periodične komponente kako bi se objasnili signali koji su pouzdaniji u objašnjavanju fizičkih osobina zemljišta.

**Plan poljskog eksperimenta.** Testiranje je obavljeno u novembru 2013. godine na parcelama površine, 4,88 ha (parcela A), predkultura soja ( $45^{\circ}27'58,76''N$ ,  $19^{\circ}35'19,08''E$ ), 4,08 ha (parcela B), predkultura kukuruz ( $45^{\circ}25'20,62''N$ ,  $19^{\circ}37'14,75''E$ ) i 3,78 ha (parcela C), predkultura pšenica ( $45^{\circ}24'58,89''N$ ,  $19^{\circ}37'45,51''E$ ). Dispozicija parcela u realnom prostoru prikazana je na slici 55. Merenje otpora vuče obavljeno je pri približno konstantnim brzinama u više ponavljanja, sa slučajnim rasporedom prohoda po parceli. Gore navedene parcele se po pedološkoj klasifikaciji zemljišta Vojvodine, svrstavaju u tip livadske crnice beskarbonatne na lesnoj terasi (<http://www.geosrbija.rs>). Neposredno pre testa urađena je kontrola fizičkih parametara zemljišta. Na svim parcelama izmerena je sabijenost po slojevima u 30 ponavljanja. Grafik sabijenosti po zonama za parcele prikazan je na slici 56.



Sl. 55. Dispozicija parcela u realnom prostoru na orto-foto snimku



Sl. 56. Sabijenost zemljišta po slojevima na parcelama

Zapreminska masa i vlažnost su određeni na osnovu uzoraka u neporemećenom stanju. Parametri deskriptivne statistike i ANOVA osnovnih fizičkih osobina zemljišta na parcelama prikazani su u tab. 5.



Tab. 5. Statistička analiza fizičkih osobina zemljišta na oglednim parcelama

Sabijenost (MPa)				
Parcela	Sr. vred.±St. dev	Min	Max	CV
A	1,48 <sup>b</sup> ±0,44	0,00	2,41	29,89
B	1,59 <sup>c</sup> ±0,44	0,00	2,19	27,65
C	1,40 <sup>a</sup> ±0,45	0,00	2,31	31,98
Vlažnost (%)				
A	19,10 <sup>a</sup> ±0,41	18,44	19,63	2,14
B	19,42 <sup>ab</sup> ±0,48	19,14	20,27	2,47
C	19,79 <sup>b</sup> ±0,70	18,85	20,33	3,56
Zapreminska masa (g/cm <sup>3</sup> )				
A	1,51 <sup>b</sup> ±0,04	1,42	1,58	2,87
B	1,48 <sup>a</sup> ±0,08	1,40	1,59	5,42
C	1,39 <sup>a</sup> ±0,06	1,31	1,45	4,04

U slučaju sabijenosti primećena je statistički značajna razlika među svim tretmanima (parcelama), kod vlažnosti razlikuju se tretman A i C, dok kod zapreminske mase parcela A se statistički razlikuje od druge dve parcele.

Na osnovu analize mehaničkog sastava uzorkovanog zemljišta, ocenjeno je da sve parcele pripadaju istoj teksturnoj klasifikaciji, odnosno tipu prašaste glinovite ilovače (tab. 6).

Tab. 6. Rezultati analize mehaničkog sastava zemljišta po parcelama

Parcela	Krupan pesak (%)	Sitan pesak (%)	Prah (%)	Glina (%)	Uk. Pesak (%)	Prah+ glina (%)	Tekstura
A	1,1	37,06	40,08	21,76	38,16	61,84	Prašasta glinovita ilovača
B	0,8	34,88	44,28	20,04	35,68	64,32	Prašasta glinovita ilovača
C	1,1	37,7	41,72	19,48	38,8	61,2	Prašasta glinovita ilovača

Pretpostavka prilikom planiranja testa je da prostorna udaljenost parcela (do 5 km), različiti predusevi, a time i primenjena tehnologija i agrotehnika, predstavljaju dobru polaznu osnovu za sprovođenje kvalitetnog poljskog eksperimenta na osnovu čijih rezultata će se moći doneti pouzdani zaključci po pitanju odnosa otpora i radne brzine, odnosno interakcije brzine i zemljišta na karakter oscilacija radnog tela. Rezultati takvog ispitivanja nemaju samo naučni već imaju i veliki praktičan značaj.





**Traktor/plug podešavanje i poljska operacija.** Otpor vuče meren je pomoću mernog rama. Za potrebe testa korišćen je traktor neto snage motora 61 kW (tab. 7) i trobrazni, raoni, nošeni plug (tab. 8). Promene u dubini obrade su minimizirane ograničavanjem vertikalnog pomeranja piramide za priključivanje sa mehaničkim blokatorom dodatim na hidraulični podizač. Dubina obrade i širina zahvata kontrolisani su na 30 lokacija. Prosečna dubina obrade iznosila je  $0,28 \pm 0,015$  m, a radni zahvat  $1,06 \pm 0,02$  m.

**Akvizicija i obrada podataka.** Akvizicija podataka objašnjena je u poglavlju 5.1. Podešena frekvencija merenja bila je 600 Hz. Pri obradi podataka, signali sa senzora sile propušteni su kroz nisko-propusni Bassel-ov filter kojim su eliminisane frekvencije veće od 50 Hz. Signal sa akcelerometra je propuštan kroz Butterworth-ov visoko-propusni filter 4. reda, kojim su eliminisane frekvencije manje od 300 Hz.

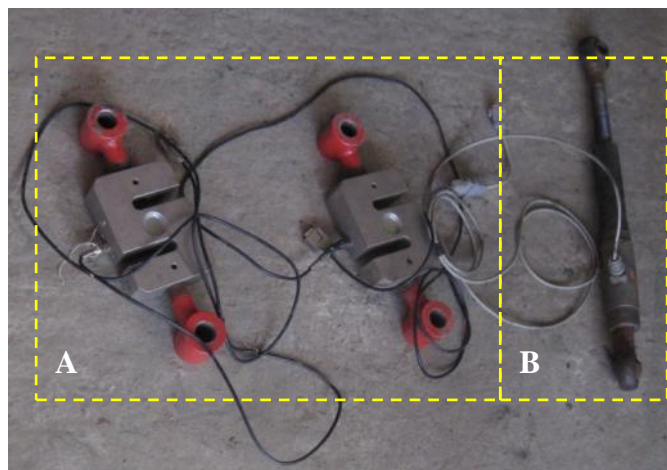
**Analiza periodičnosti signala-spektralna analiza.** Spektralna analiza podrazumeva proučavanje cikličnih oblika u vremenskoj seriji podataka, uz identifikaciju njihove relativne značajnosti. Cilj njene primene u okviru problematike merenja otpora vuče, bio je da se prepoznaju karakteristične frekvencije u signalu otpora vuče i signalu sa akcelerometra postavljenog na nosač plužnog tela koje potencijalno mogu biti u korelaciji sa brzinom obrade odnosno stanjem zemljišta. *Nielsen et al. (1989)* predlaže spektralnu analizu kao koristan alat za ocenu primenjenih frekvencija u postupku merenja otpora vuče. Spektralna analiza signala urađena je programskom paketu *CatmanAP 3.4.1*. Ovaj prilaz zahtevao je da ceo signal bude transformisan u frekventni domen korišćenjem brze Furijerove transformacije (FFT).

## 4.2. Postupci merenja i merna oprema

### 4.2.1. Merenje sile

Za merenje sile u donjim tačkama veze rama i traktora korišćene su merne ćelije „S“ tipa, nosivosti 100 kN, rezolucije 0,1 N i tačnosti  $\pm 0,5\%$ . Za merenje sile u gornjoj upornoj poluzi (top-link) korišćena je merna ćelija nosivosti 200 kN rezolucije 0,1 N i tačnosti  $\pm 0,5\%$  (sl. 57).





Sl. 57. Senzori sile otpora:

A - "S" merne ćelije (donja veza); B - dinamometar postavljen na gornjoj poluzi (top-link)

#### 4.2.2. Merenje stvarne brzine ( $v_s$ ) i geografskih koordinata

Za merenje stvarne brzine i određivanje geografske pozicije agregata tokom merenja otpora vuče, korišćen je GPS uređaj *Trimble EasyGuide 500* (sl. 58a). Uređaj je komercijalnog tipa i namenjen je za navigaciju traktora po parceli u cilju pravilnog sklapanja prohoda. Posедуje standardni izlazni port RS232 za komunikaciju i prenos podataka. Podaci sa GPS-a se direktno šalju na PC preko USB konektora. Frekvencija očitavanja vredosti sa GPS-a bila je podešena na 10 Hz (maksimalna). Tokom merenja korišćen je korekcionni DGPS signal EGNOS/WAAS.



a)



b)

Sl. 58. GPS uređaji korišćeni u poljskim testovima:

a - *Trimble Easy Guide 500*; b - *Trimble Juno SB*

Za određivanje koordinata lokacija pri poljskom uzorkovanju, odnosno merenju sabijenosti, korišćen je ručni GPS prijemnik *Trimble Juno SB* (sl. 58b). GPS uređaj *Trimble JunoSB* je



ručni (*hand-held*), prenosni, jednofrekventni uređaj iz klase GIS DataLogger uređaja. Karakterišu ga preciznost od 2 do 5 metara u obe ravni u autonomnom modu merenja, odnosno od 0,8 do 1,5 metara ukoliko se koriste diferencijalne korekcije. Moguće je kodno i fazno merenje.

#### 4.2.3. Merenje teorijske brzine pogonskih točkova traktora, $v_t$

Teorijska brzina pogonskih točkova merena je pomoću brojača obrtaja (inkremental enkodera) koji je bio postavljen na naplatak levog zadnjeg točka traktora (sl. 59).



Sl. 59. Enkoder postavljen na naplatak zadnjeg točka traktora tokom poljskog testa

Pomoću senzora-brojača obrtaja mereno je ugaono pomeranje zadnjeg pogonskog točka. U softveru za akviziciju, istovremeno sa zapisivanjem, preračunavana je obimna brzina točka na osnovu broja impulsa u jedinici vremena i dinamičkog prečnika točka (jed. 4.1). Korišćeni senzor-brojač ima rezoluciju 60 impulsa po obrtu.

$$\partial v_t = \frac{\partial S_t}{\partial t} \cdot 3,6 \text{ [km/h]}, \quad (4.1)$$

$$S = \left| \frac{N_{imp} R_D \pi}{60} \right| \text{ [m]}, \quad (4.2)$$

gde je:  $S_t$  - pređeni put (m);  $N_{imp}$  - broj impulsa;  $R_D$  – dinamički prečnik točka (m);  $t$  - vreme (s).

#### 4.2.4. Merenje proklizavanja pogonskih točkova traktora, $\delta$

Klizanje pogonskih točkova na poljoprivrednim traktorima izaziva povećanu potrošnju energije tokom operacije obrade kada te vrednosti prelaze čak i 20% zavisno od uslova na parceli. Ovaj parametar je određen računskim putem, na osnovu poznate vrednosti teoretske brzine  $v_t$  pogonskog točka i stvarne brzine agregata  $v_s$  (jed. 4.3).

$$\delta = \left( 1 - \frac{v_s}{v_t} \right) \cdot 100 \text{ [%]}, \quad (4.3)$$



gde je:  $v_s$  - stvarna brzina (m/s);  $v_t$  - teoretska brzina (m/s).

#### 4.2.5. Merenje frekvencije oscilovanja konstrukcije radne mašine

Spektralna karakteristika frekvencije oscilovanja merne konstrukcije je posledica interakcije radnih elemenata mašine i zemljišta. S obzirom da je ramska konstrukcija konstantna kategorija tokom merenja otpora, otuda je pretpostavljeno da će spektralna karakteristika biti promenljiva tokom merenja zavisno od fizičko-mehaničkog svojstva zemljišta (*Hayhoe et al. 2002*). Upotrebljeni akcelerometar (sl. 60a,b) bio je postavljen na prvo plužno telo koje trpi najveća opterećenja tokom oranja i shodno tome ima najveće deformacije odnosno oscilacije. Deformacija plužnog tela zavisi od intenziteta otpora obrade zemljišta, a karakter oscilacija od fizičkog stanja zemljišta, odnosno prostorne varijabilnosti.



a)



b)

Sl. 60. Akcelerometar korišćen tokom merenja:

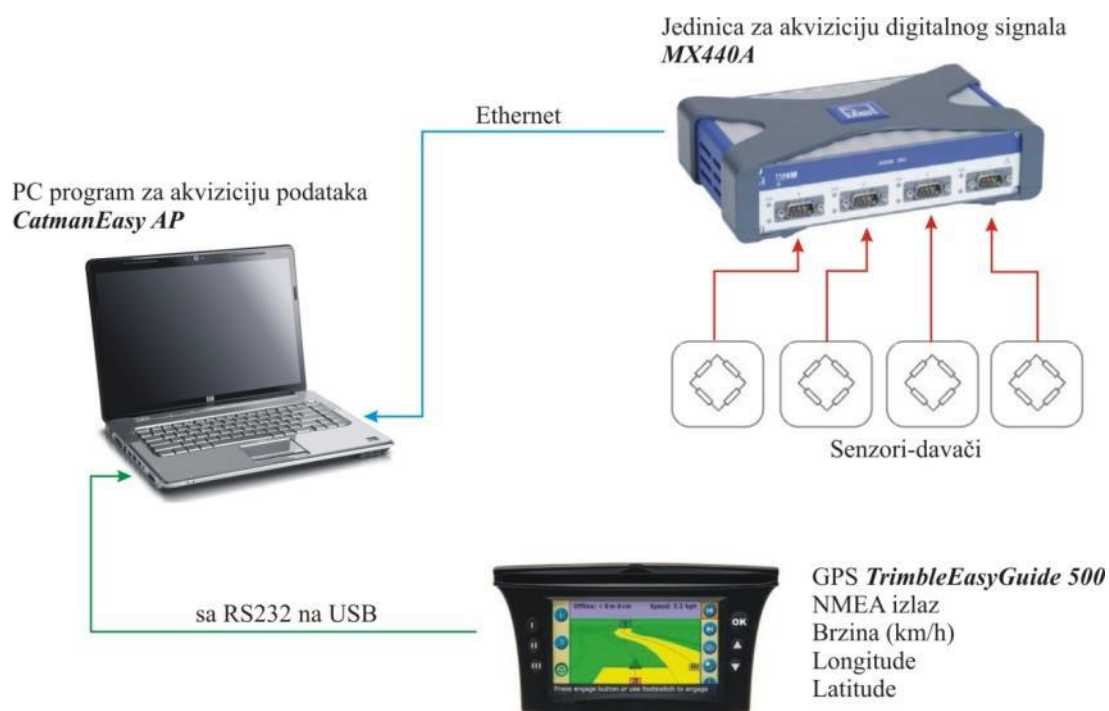
a - piezorezistivni akcelerometar MTN 7000; b - na nosaču plužnog tela

#### 4.2.6. Akvizicija podataka

Za pretvaranje signala i akviziciju podataka sa senzora korišćen je savremen DAQ uređaj poslednje generacije *Quantum MX440A* (sl. 61) proizvođača *Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM)*. Merna akvizicija je visoke rezolucije (24 bit) sa mogućnošću podešavanja brzine uzorkovanja (do 19200 Hz). Uređaj ima ugrađene niskopropusne filtere signala, čija je funkcija eliminacija signala visoke frekvencije, odnosno interferencije osnovnog signala i signala šuma koji se javlja kao redovna pojava tokom visokofrekventnih merenja. Parametri filtera se podešavaju prema prirodi osnovnog signala i udela šuma. Interfejs između pojačala i PC-a je preko aplikacionog programa *CatmanEasy AP3.3.1.* (*HBM*). Program omogućava



sinhrono zapisivanje podataka sa senzora, realno u vremenu. Program se istovremeno koristi i za postprocesnu analizu podataka. Komunikacija između akvizicije i mernih davača je preko standardne RS232 konekcije, a između akvizicije i PC data logger-a je preko *ethernet* veze.



Sl. 61. Šematski prikaz povezivanja merne opreme

#### 4.2.7. Merenje dubine obrade

Tehnika merenja dubine obrade zemljišta zavisi od sistema obrade. U sprovedenim testovima merenje je obavljano u više ponavljanja za svaku varijantu testa. Kada je za merenje otpora korišćen raoni plug, kontrola dubine se svodi na merenje visine zida brazde iza svakog plužnog tela (sl. 62).



Sl. 62. Merenje dubine obrade raonog pluga




Merenje dubine obrade tokom operacije razrivanja i tanjiranja zemljišta je vremenski zahtevnije i tehnički kompleksnije za izvođenje iz više razloga. Za razliku od pluga, ove mašine ne obrađuju čitavu zapreminu zemljišta, jer je širina zahvata pojedinačnih radnih tela manji od međusobnog rastojanja na ramskoj konstrukciji. Takođe, efekat obrade se razlikuje zavisno od stanja i tipa zemljišta. U svakom slučaju, da bi se pravilno odredila dubina, odnosno zapremina obrađena zemlje, neophodno je iskopati profil zemljišta na širini radnog zahvata i dubini obrade.

#### 4.2.8. Pogonske i mašine za obradu zemljišta korišćeni tokom poljskih testiranja

U poljskim merenjima otpora korišćene su dve kategorije traktora. Tehničke karakteristike date su u tabeli 7. Tehnički podaci mašina za obradu zemljišta tokom merenja otpora prikazani su u tabeli 8.

Tab. 7. Tehničke karakteristike traktora korišćenih u toku ispitivanja

Parametar	Jedinica mere		
		MTZ 820	JD 6930
Nominalna snaga motora	kW	60	115
Kategorija	-	II	II/III
Radna zapremina motora	cm <sup>3</sup>	4750	6800
Nominalni broj obrtaja motora	min <sup>-1</sup>	2200	2100
Brzina kretanja	km/h	1,89–33,4	2,4–38,6
Transmisija	–	Mehanička 18/4	Delimični powershift 20/20
Oznaka pneumatika zadnjih točkova	–	11.2R20, 16.9R38	16.9/R28, 20.8R38
Masa traktora	kg	4440	5633



Tab. 8. Tehničke karakteristike plugova

TIP	Razmak pl. tela (cm)	Zahvat pl. tela (cm)	Klirens (cm)	Masa (kg)
VN M 950	95	36/40/44/48	72/78	1010
Leopard 3	85	35	65	350

#### 4.2.9. Analiza hemijskog sastava

Prilikom ocene stanja zemljišta neposredno pre merenja mehaničkog otpora, korišćena je metodologija i laboratorijska oprema Laboratorije za zemljište i agroekologiju, akreditovane prema standardu *SRPS ISO/IEC 17025:2006*, Instituta za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad. Uzorci zemljišta uzimani su u rasutom (poremećenom) stanju u prirodnom neporemećenom stanju pomoću cilindra Kopecki, saglasno standardu *ISO 7256/1*.

Osnovna hemijska svojstva zemljišta izmerena su iz prosečnog uzorka do dubine 30 cm. Određena su sledeća osnovna hemijska svojstva:

- aktivna kiselost, pH u vodi određena je u suspenziji (10g:25cm<sup>3</sup>) zemljišta sa vodom, potenciometrijski, pH metrom, (*Hadžić et al., 2004*),
- potencijalna kiselost, pH u 1 M KCl određena je u suspenziji (10g:25cm<sup>3</sup>) zemljišta sa kalijum hloridom, potenciometrijski, pH metrom, (*Hadžić et al., 2004*),
- slobodni kalcijum karbonat CaCO<sub>3</sub> određen je volumetrijski, pomoću Scheibler-ovog kalcimetra, (*Hadžić et al., 2004*),
- sadržaj humusa određen je metodom Tjurin-a oksidacijom organske materije, (*Hadžić et al., 2004*),
- sadržaj ukupnog azota automatskom metodom određen je CHNS analizatorom, (*The Scientific Association Dedicated to Analytical Excellence, 2002*),
- sadržaj amonijum laktatnog P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i K<sub>2</sub>O, određivanje lako pristupačnog fosfora izvedeno je spektrofotometrijski, a lako pristupačnog kalijuma plamenfotometrijski, (*JDPZ, 1966*).

#### 4.2.10. Mehanički sastav zemljišta

Mehanički sastav zemljišta određen je korišćenjem pipet metode iz prosečnog uzorka sa dubine do 20 cm. Uzorak je pripremljen natrijum-pirofosfatom po Thun-u, a teksturna klasa određena je na osnovu klasifikacije po Tommerup-u, (*Hadžić et al., 2004*).





#### 4.2.11. Određivanje zapreminske mase zemljišta i vlažnosti zemljišta

Određivanje stanja zapreminske mase i vlažnosti zemljišta u terenskim ispitivanjima obavljeno je na osnovu uzoraka zemljišta u neporemećenom stanju. Uzorci zemljišta u neporemećenom stanju uzeti su pomoću Kopecki cilindra, saglasno standardu *ISO 7256/1*. Zavisno od potreba eksperimenta, uzorci su uzimani dvojako. U eksperimentima gde je bilo neophodno porediti fizičke karakteristike po slojevima, one su određene na osnovu uzoraka uzetih u slojevima od 0 do 15 cm i do 15 do 30 cm u tri ponavljanja za svaki sloj. U slučaju određivanja prosečnog stanja zemljišnog sloja do dobine obrade, uzeti su uzorci u jednom sloju i to od 10 do 30 cm u tri ponavljanja za svaki sloj.

Procedura uzimanja neporemećenih uzoraka zemlje se sastoji od kopanja profila u dubini od 0,5 m i utiskivanja cilindra u određenim zonama. Svaki cilindar se obeleži i adekvatno obradi, tj. očisti od viška zemlje tako da bude ispunjen samo u delu koji obuhvata metalni plašt. Za uzimanje uzoraka kao alat koristi se ašov, nož, drveni čekić i stalak za utiskivanje cilindra (sl. 63).



Sl. 63. Postupak uzimanja uzoraka zemljišta u neporemećenom stanju u cilju određivanja zapreminske mase i trenutne vlažnosti.

Nakon uzimanja uzoraka sa parcele, uzorci se odnose u laboratoriju gde se premerava njihova masa (zemljište+cilindar), a potom se stavljaju u sušnicu. Sušenje traje do momenta postizanja konstantne mase uzorka, odnosno dok smanjenje mase ne bude manje od hiljaditog dela mase početnog uzorka mereno u vremenskom rasponu od jedan čas (*JDPZ, 1997*). Kada se završi proces sušenja, meri se masa cilindra sa zemljištem i masa praznih cilindara kako bi se dobila masa suvog zemljišta. Na osnovu mase cilindra sa zemljištem izmerene pre sušenja i mase praznog cilindra, dobija se masa vlažnog uzorka zemlje.



Kada su poznati ovi parametri, zapreminska masa ( $ZM$ ) dobija se po obrascu:

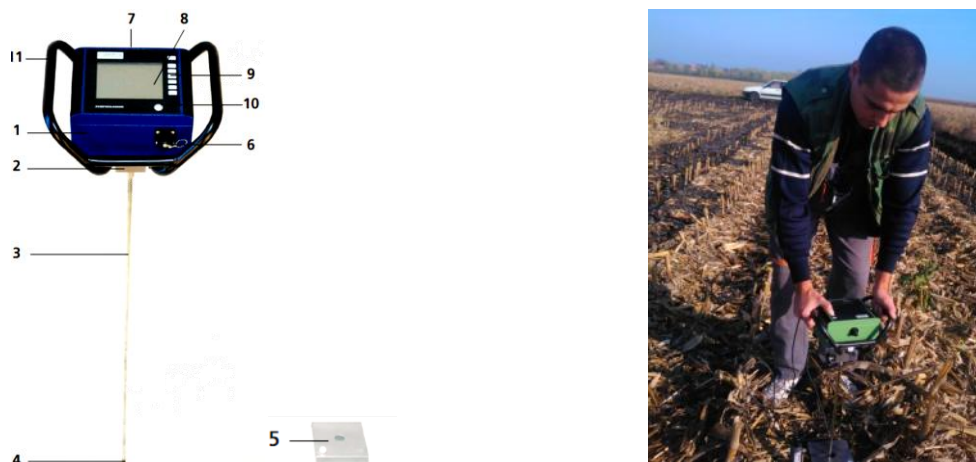
$$ZM\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{\text{Masa suvog uzorka zemljišta (g)}}{\text{Zapremina cilindra (cm^3)}} \quad (4.4)$$

dok se trenutna vlažnost ( $Wz$ ) u odnosu na vlažnu osnovu određuje po obrascu:

$$Wz(\%) = \frac{\text{Masa vlažnog uzorka} - \text{Masa suvog uzorka zemljišta (g)}}{\text{Masa vlažnog uzorka (g)}} \cdot 100 \quad (4.5)$$

#### 4.2.12. Određivanje sabijenosti zemljišta

Za merenje sabijenosti slojeva zemljišta u poljskim merenjima korišćen je ručni prenosni uređaj - penetrometar prema standardnoj metodi *ASAE S313.3 (2004)*. Korišćeni penetrometar (*Penetrologger 6.00*) je uređaj poslednje generacije renomiranog proizvođača *Eijkelkamp*. U ispitivanjima korišćen je konusni vrh površine osnove od  $1\text{ cm}^2$  i uglom od  $60^\circ$  (sl. 64).



Sl. 64. Konusni penetrometar "Penetrologger":

1 - vodootporno kućište; 2 - amortizer udara; 3 - sondirna šipka; 4 - konusni šiljak; 5 - ploča referentne dubine; 6 - komunikacioni priključak; 7 - gps prijemnik; 8 - lcd ekran; 9 - kontrolna tabla; 10 - nivelator; 11 - izolovane ručke

Penetrometar je koncipiran za merenje sabijenosti zemljišta u slojevima uz istovremno zapisivanje izmerenih podataka. Kapacitet memorije je 1500 merenja. Projektovan je za merenje sabijenosti do 1000 N uz rezoluciju 1 N i dubine do 80 cm uz rezoluciju 1 cm. Kako bi se smanjila greška pri merenju usled nekontrolisane brzine utiskivanja, na ekranu uređaja projektuje se bar indikator koji grafički, u svakom momentu prikazuje trenutnu brzinu, a u slučaju da se prekorači kritična brzina, uključuje se zvučni signal. Uređaj u sebi ima integrisan GPS prijemnik kojim se određuje pozicija merenja uz tačnost od 2-3,5 m zavisno od





primljenog korekcionog signala. Opciono, na uređaj se može priključiti kapacitivni merač vlažnosti zemljišta. Kao komunikacijski interfejs između penetrometra i PC-a korišćen je program "Penetroviewer 6.03".

### 4.3. Primenjeni metodi statističke analiza podataka

Za izračunavanje, prikazivanje i opisivanje vrednosti numeričkih podataka dobijenih iz uzoraka primenjivane su metode deskriptivne statistike kao što su:

- pokazatelji centralne tendencije
  - srednja vrednost (Sr. vred.),
  - interval poverenja,
  - Median,
- pokazatelji rasipanja
  - standardna devijacija (St. dev.),
  - koeficijent varijacije (CV),
  - minimalna vrednost (Min),
  - maksimalna vrednost (Max),
- pokazatelji oblika raspodele
  - Pirsonov koeficijent,
  - Asimetričnost,
  - Kurtosis,
  - 1. Quartile,
  - 3. Quartile.

Za utvrđivanje značajnosti veze između posmatranih promenljivih u eksperimentu, rađena je korelaciona analiza, u okviru koje su određivani Pirsonov koeficijent korelacije ( $R$ ) i koeficijent determinacije ( $R^2$ ).

Za testiranje statistički značajnih razlika između srednjih vrednosti i disperzija različitih grupa podataka primenjeni su Duncan-ov, Tucky-ev i F-test sa pragom značajnosti od 5%.

Regresiona analiza korišćena je za grafičko prikazivanje linearne zavisnosti posmatranih parametara i opisivanje matematičkih modela linearne prave.

Rezultati su prikazani tabelarno i grafički u vidu dijagrama i histograma. Za statističku obradu korišćen je programski paket STATISTICA 12.



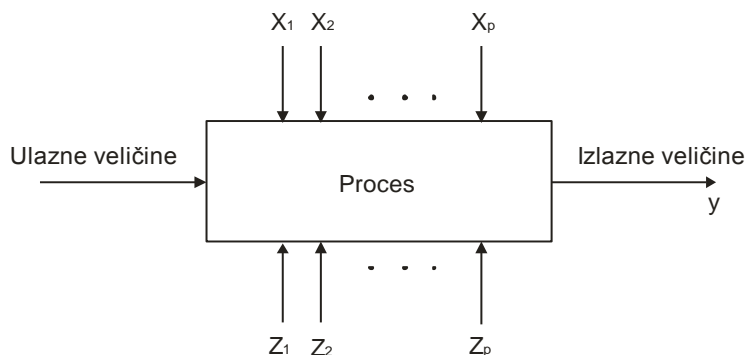
#### 4.4. Planiranje eksperimenta (DoE-design of experiment)

Planiranje eksperimenta (*Design of Experiments - DoE*) je opšte prihvaćena metoda, prvenstveno u inženjerskim istraživanjima, koja podrazumeva istovremeno posmatranje promena više ulaznih faktora i analizu njihovog uticaja na rezultate eksperimenta u početnoj fazi. Metoda obuhvata zadavanje kombinacija vrednosti ulaznih faktora pri kojima će se vršiti eksperiment, zatim se za svaku od kombinacija određuju vrednosti izlaznih faktora, nakon čega se primenom statističkih metoda analize varijansi (ANOVA) i rezidualne analize ispituje značajnost uticaja datih ulaznih faktora na promenu izlaznih faktora. Kao krajnji rezultat dobija se model, tj. funkcionalna zavisnost izlaznih faktora od linearne kombinacije faktora na ulazu i njihovih interakcija. Posebno, u slučaju metode odzivne površine (*response surface method - RSM*) dobijena veza je kvadratna, a ova metoda dalje omogućava i optimizaciju vrednosti ulaznih faktora u odnosu na željene vrednosti faktora na izlazu.

Uopšteno, proces ili sistem može biti predstavljen šematski kao na slici 65. Sam proces čini kombinacija mašina, metoda, ljudi i drugih izvora koji transformišu više ulaznih u jednu ili više posmatranih izlaznih veličina izlaznih informacija. Razlikujemo procesne promenljive  $x_1, x_2, \dots, x_p$  koje se mogu kontrolisati, i ulaze  $z_1, z_2, z_3 \dots z_q$  na koje nemamo uticaj. Izlazne veličine su označene sa  $y_1, y_2 \dots y_n$ . Za cilj eksperimenta može se postaviti:

- ispitivanje jačine uticaja ulaznih promenljivih na izlaz,
- određivanje nivoa uticaja promenljivih  $x_i$  pri kojem je promena  $y_i$  blizu očekivane nominalne vrednosti,
- određivanje kombinacija vrednosti  $x$ -ova pri kojem je promena  $y$ -na mala,
- određivanje vrednosti promenljive  $x$  za koje su efekti promenljivih koje ne kontrolišemo  $z_1, z_2, z_3 \dots z_q$  minimalne.

Pri planiranju izvođenja eksperimenta postoji nekoliko strategija koje istraživači mogu da koriste. Jedna od najzastupljenijih je strategija jedan faktor u vremenu (*one-factor-at-a-time - OFAT*). Ova metoda podrazumeva postavljanje početnih vrednosti (nivoa) za svaki faktor, pri čemu se ispituju jedan po jedan faktor tako što se posmatrani faktor menja po nivoima, dok se svi ostali drže konstantni, na osnovnom nivou. Nakon izvedenih testova, grafički se prikazuje kako faktor čije su se vrednosti menjale utiče na izlazne promenljive. Glavna mana ovakvog pristupa planiranja eksperimenta jeste da ona ne obuhvata ispitivanje interakcija između faktora.



Sl. 65. Šematski prikaz procesa ili sistema

Napredniji pristup rešavanju problema je sastavljanje faktorijalnog eksperimenta. U ovoj strategiji ulazni faktori se menjaju istovremeno, umesto jedan po jedan. Pri faktorijalnom dizajnu uzimaju se sve kombinacije faktora A i faktora B i određuju vrednosti izlazne veličine u svim slučajevima.

Planiranje eksperimenta je pristup za utvrđivanje uzroka i posledica odnosa i može biti primenjen u bilo kojem procesu sa mogućnošću kontrole ulaznih i izlaznih veličina, gde ulazne vrednosti mogu biti numeričke ili kategoričke. DoE je primenio Roland Fisher, ranih dvadesetih godina XX veka, na Rothamsted Agricultural Field Research Station u Londonu (Fisher, 1971). Njegov eksperiment je obuhvatao ispitivanje uticaja različitih đubriva na različitim parcelama zemljišta. Međutim, konačni kvalitet useva nije zavisio samo od uticaja đubriva, nego i od drugih faktora (stanja zemljišta, sadržaja vlage u zemljištu) na svakoj od posmatranih parcela. Fisher je koristio DoE da bi mogao da razlikuje efekte nastale kao posledice đubriva od efekata koji nastaju od drugih faktora. Dakle, DoE je prvo prihvaćen i primenjivan u biologiji i poljoprivredi, a kasnije postaje značajna metoda za kvalitativno unapređenje procesa. Do 1980 uglavnom je korišćen u procesnoj industriji (hemijskoj, prehrambenoj, farmaceutskoj) zbog mogućnosti manipulisanja procesnim faktorima (vreme, pritisak, protok,...). Ogromnim razvojem elektronske i automobilske industrije, DoE doživljava renesansu, a posebno je pojava personalnih računara još više ubrzala korišćenje numeričkih metoda, koje su ga dodatno unapredile (Anderson et al., 2007).

Moderni eksperimenti se posmatraju kao deo naučnog procesa. Postupno se kroz serije aktivnosti dobijaju informacije o procesu, na osnovu kojih se definišu parametri, koji vode do novih eksperimentata. Na ovaj način se poboljšavaju performanse proizvodnog procesa čime DoE postaje važna metoda u razvoju novog procesa. Korišćenje tehnike dizajna ekperimenta u ranim fazama razvoja procesa može dovesti do:



- povećanja prinosa procesa,
- smanjenja odstupanja i približavanja nominalnim vrednostima,
- smanjenja vremena razvijanja sistema,
- smanjenja sveukupne cene istraživanja.

**Rezidualna analiza i model provere.** Da bi rezultati dobijeni analizom varijansi bili pouzdani pretpostavka je da su eksperimentalno dobijene vrednosti normalno i nezavisno raspoređene sa konstantnom varijansom po nivoima faktora (*Montgomery et al., 2011*). Ove pretpostavke trebaju da budu proverene i u tu svrhu se vrši analiza ostataka (*residual analysis*). Ostatak (rezidual)  $e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij}$  ( $i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n$ ), je razlika između posmatranih i odgovarajućih procenjenih (fitovanih) vrednosti faktora. Pretpostavka normalnosti raspodele ostataka može biti proverena konstrukcijom grafika normalne raspodele reziduala. Ukoliko su vrednosti raspoređene oko prave linije, zaključujemo da su reziduali raspoređeni po pravilima normalne raspodele.

**$2^k$  i  $3^k$  faktorijalni dizajni.** Faktorijalni dizajni se veoma često koriste u istraživanjima, u kojima je uključeno više ulazih faktora, sa ciljem da se ispita njihov efekat na izlazne veličine. Najzastupljeniji je slučaj sa  $k$  ulaznih faktora, gde svaki ima vrednosti na dva ili tri nivoa. Ovi nivoi mogu biti kvantitativni (numerički, vrednosti temperature, pritiska, vremena itd.) ili kvalitativni (kategorički, tip mašine, operatora, minimalni i maksimalni nivoi faktora, prisustvo i odsustvo faktora). Kompletan eksperiment dizajniran na ovaj način obuhvata  $2^k$  ( $3^k$ ) posmatranja, i naziva se  $2^k$  ( $3^k$ ) faktorijalni dizajn ( $2^k$ ,  $3k$  factorial design). Ovi, specijalni slučajevi uopštenog faktorijalnog dizajna, su od velike važnosti kako zbog svoje široke primene u istraživačkom radu, tako i zbog činjenice su oni osnova za mnoge druge dizajne koji imaju značajnu praktičnu primenu. Pri ovim dizajnima najčešće se pretpostavlja: (1) da su faktori fiksirani, (2) da je redosled obavljanja eksperimenta potpuno nasumični i (3) da je pretpostavka normalne raspodele ostataka zadovoljena.

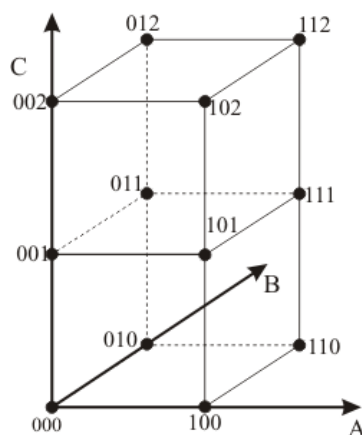
Posebno,  $2^k$  dizajn je koristan u ranim fazama rada na eksperimentu, kada obično postoji mnogo faktora koje treba istražiti. Metoda obezbeđuje najmanji mogući broj ponavljanja sa kojom  $k$  faktora može biti kompletno ispitano faktorijalnim dizajnom. S obzirom da se posmatraju samo dva nivoa za svaki faktor, pretpostavlja se da se izlazne vrednosti ponašaju po približno linearnoj vezi ulaznih veličina.



Tab. 9. Setovi faktora u kombinovanom dizajnu

Ponavljjanje	A	B	C	A	B	C
1	-	-	-	0	0	0
2	+	-	-	1	0	0
3	-	+	-	0	1	0
4	+	+	-	1	1	0
5	-	-	+	0	0	1
6	+	-	+	1	0	1
7	-	+	+	0	1	1
8	+	+	+	1	1	1
9	-	-	0	0	0	2
10	+	-	0	1	0	2
11	-	+	0	0	1	2
12	+	+	0	1	1	2

Kada počinjemo da istražujemo proces ili sistem, ovo se može uzeti za razumnu pretpostavku.



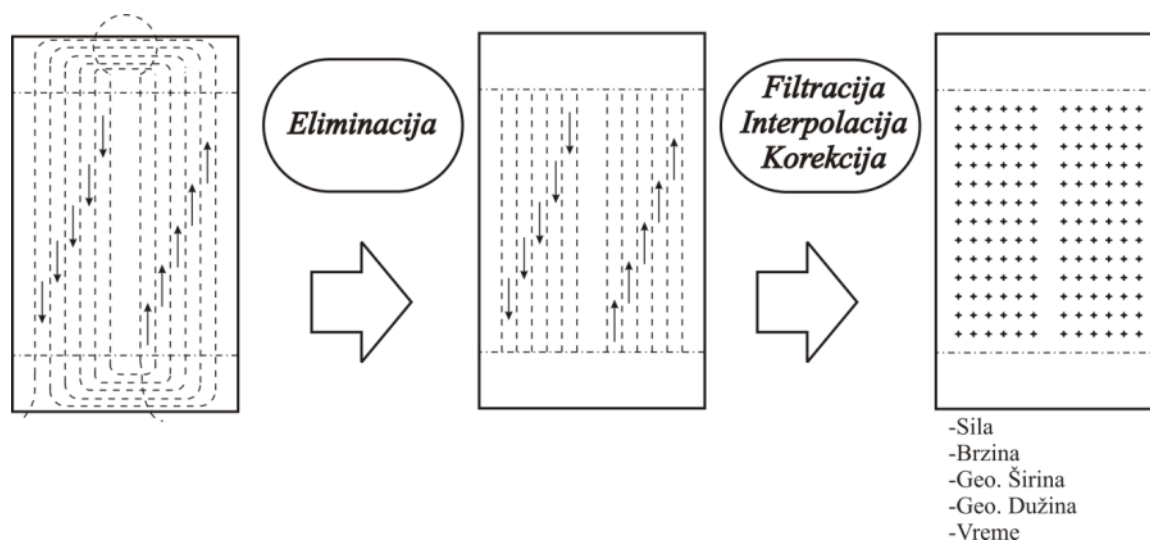
Sl. 66. Geometrijski prikaz setova faktora u kombinovanom dizajnu

Dalje konstruišemo dizajn koji ćemo koristiti u istraživanju. Neka su pri ispitivanju od posebnog značaja tri faktora A, B i C, sa vrednostima na dva nivoa (u slučaju faktora A i B), odnosno tri nivoa (u slučaju faktora C). Na ovakav način je dobijen kombinovani dizajn dobijen je kombinovan dizajn (između 23 i 33 dizajna) koji se sastoji od 12 eksperimenata geometrijski prikazanih na slici 66. Takođe, koristeći "-", "+" i "0" odnosno (0, 1 i 2) oznake da se prikažu minimalne, maksimalne i srednje vrednosti nivoa svakog od ulaznih faktora, dobijamo 12 ponavljanja u opisanom dizajnu.



#### 4.5. Metod obrade sirovih geopodataka otpora vuče

Tokom testa podaci su prikupljeni sinhrono i zapisivani na memoriju PC-a pomoću softvera za prikupljanje i obradu podataka *HBM-CatmanEasy-AP3.3.1*. Prvi korak u postupku obrade bio je eliminacija podataka koji se odnose na periode okretanja agregata (na krajevima parcele) i one koji su prikupljeni na početku prohoda, pa sve do momenta postizanja stabilnih radnih parametara (brzine i radne dubine). Takođe, uklonjene su greške iz signala sa GPS prijemnika koje su nastale kao posledica kratkotrajnih smetnji u komunikaciji prijemnika i satelita. Eliminacijom atipičnih vrednosti, dobijeni su signali sa davača za pojedinačne, susedne prohode (sl. 67). S obzirom da su merenja otpora, zavisno od potreba, obavljena pri relativno visokim ili visokim učestanostima zapisivanja (10, 50, 600 Hz) podataka sa davača i da (zavisno od veličine parcele) su ciklusi merenja nekada trajali više časova, dobijan je veliki broj prikupljenih podataka (preko milion). Prevelika količina podataka otežava postupak njihovog prebacivanja iz jednog u drugi program, pa je shodno lakšoj daljoj manipulaciji osnovni uzorak redukovana na racionalnu meru.



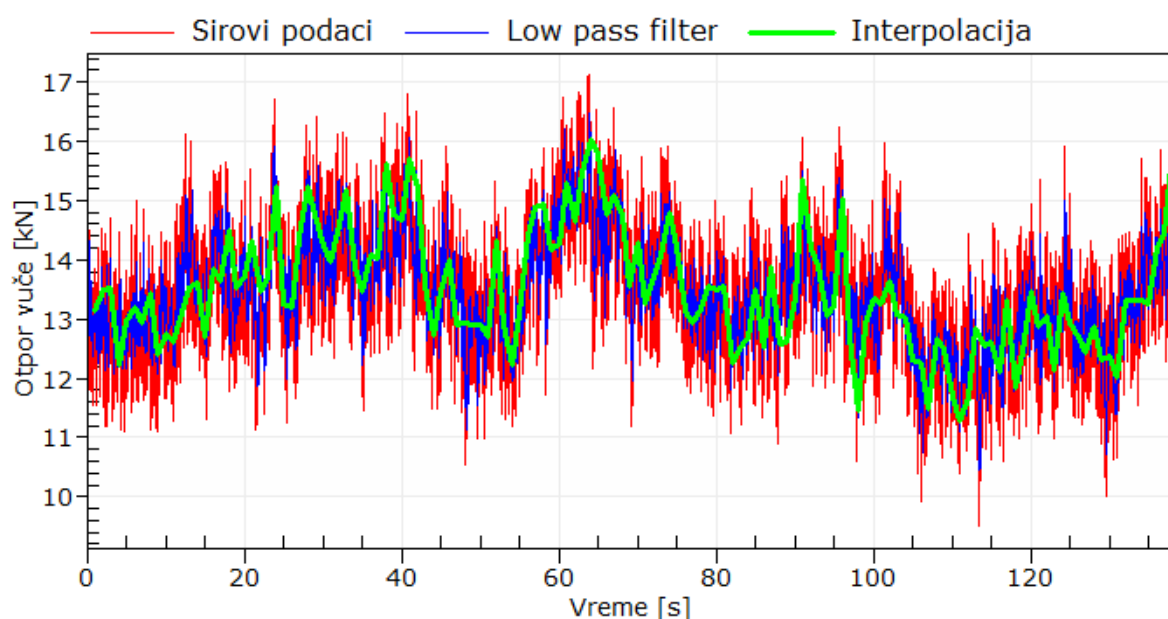
Sl. 67. Postupak obrade podataka otpora vuče

Pored prethodno pomenutog, oblik signala sa davača sile je vrlo dinamičan, sa velikim amplitudskim kolebanjima u kratkom vremenskom intervalu (sl. 68). To je posledica stvaranja pukotina (tzv. smičućih ravni) u zahvaćenju plastici (*Hayhoe et al., 2002*) usled njene deformacije tokom interakcije sa radnim delovima mašine, ali i neujednačenog stanja zemljišta na parceli. Da bi se umanjila "histeričnost" vremenskog signala i smanjio obim uzorka, primenjivan je postupak interpolacije nad podacima. Time je praktično eliminisan uticaj trenutnih varijacija stanja zemljišta na ukupan otpor.



Kako bi se eliminisali visokofrekventni signali malih amplituda koji nisu izvorno posledica otpora zemljišta, a dovode do izobličenja osnovnog signala koji to jeste, signali sa mernih ćelija su "propušteni" kroz *Bassel-ov* niskopropusni filter (Hayhoe et al., 2002). To znači da su svi signali koji su imali frekvenciju veću od podešene bili nevidljivi za merni sistem (sl. 68).

Veoma bitan faktor otpora obrade je radna brzina, koja prema *ASAE* standardu utiče eksponencijalno na otpor (Harrigan i Rotz, 1995). Summers et al. (1986) navode da kvadratna funkcija najbolje opisuje zavisnost otpora obrade od brzine kada je brzina u granicama 1,25-2,35 m/s.



Sl. 68. Grafik osnovnog, filtriranog i interpoliranog signala otpora realno u vremenu

S obzirom da je radnu brzinu tokom operacije obrade nemoguće održati apsolutno konstantnom zbog proklizavanja točkova i nagle promene otpora, otpor je svoden na referentnu brzinu kako bi se kompenzovao uticaj brzine na promenu otpora. Pošto se brzina menjala u uskim intervalima, korišćen je linearni obrazac (4.6) kojim se jednostavno mogu svesti vrednosti otpora za zajedničku brzinu. Procenjeni korekcionni faktor iznosi  $5 \text{ kN/m}^2$  za svaki  $1 \text{ m/s}$  porasta brzine (Summers 1986). Za referentnu brzinu određena je vrednost koja odgovara prosečnoj brzini tokom testa, a to je  $1,8 \text{ m/s}$ .

$$R_{kor} = R_{tr} + 5 \cdot (v_R - v_{tr}) \quad (4.6)$$

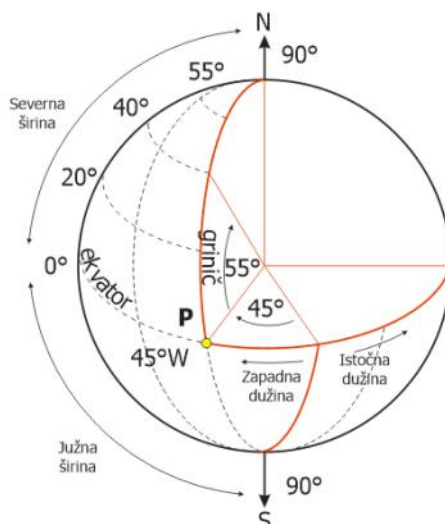
gde je:  $R_{kor}$  je korigovani specifični otpor zemljišta izražen u  $\text{kN/m}^2$  pri referentnoj brzini  $v_R$ ;  $R_{tr}$  je trenutni specifični otpor zemljišta izražen u  $\text{kN/m}^2$  pri trenutnoj brzini  $v_{tr}$  izraženo u  $\text{m/s}$ .



#### 4.6. Procedura obrade i prikazivanja geopodataka

Upotreba GIS-a najčešće podrazumeva korišćenje koordinatnih sistema, odnosno transformaciju podataka iz jednog u drugi koordinatni sistem. Koordinatni sistem se objašnjava kao set pravila koja definišu na koji način su koordinate dodeljene tačkama u prostoru ili ravni. Različiti koordinatni sistemi se koriste za pozicioniranje tačaka u dvo-dimenzionom ili tro-dimenzionom prostoru.

Najčešće korišćeni globalni koordinatni sistem WGS (*World Geodetic System*) sačinjen je od linija geografske širine ( $\varphi$ ) i geografske dužine ( $\lambda$ ). Linije jednake geografske širine zovu se paralele. One formiraju kružnice oko površine Zemljinog elipsoida. Linije jednake geografske dužine zovu se meridiani i oni formiraju elipse na Zemljinom elipsoidu. Obe vrste linija formiraju mrežnu skalu kada se projektuje na kartu.



Sl. 69. Prikaz dvodimenzinog geografskog koordinatnog sistema pomoću lučnih koordinata geografske širine ( $\varphi_{gš}$ ) i geografske dužine ( $\lambda_{gd}$ )

Geografska širina ( $\varphi_{gš}$ ) neke tačke P (sl. 69) je ugaono rastojanje između normale na elipsoid u tački P i ekvatorialne ravni. Geografska širina ima vrednost 0 na ekvatoru, a sa porastom ide prema polovima na severu do  $\varphi_{gš} = +90$  ( $90^0N$ ), odnosno na jugu do  $\varphi_{gš} = -90$  ( $90^0S$ ). Geografska dužina ( $\lambda_{gd}$ ) je ugaono rastojanje između elipse meridiana koja prolazi kroz Grinič i elipse meridiana koja prolazi kroz tačku. Geografska dužina se meri od Griniča ( $\lambda_{gd} = 0^0$ ) prema istoku do  $\lambda_{gd} = +180^0$  ( $180^0E$ ) odnosno na zapadu  $\lambda_{gd} = -180^0$  ( $180^0W$ ).

Geografske koordinate se uvek prikazuju u ugaonim jedinicama.

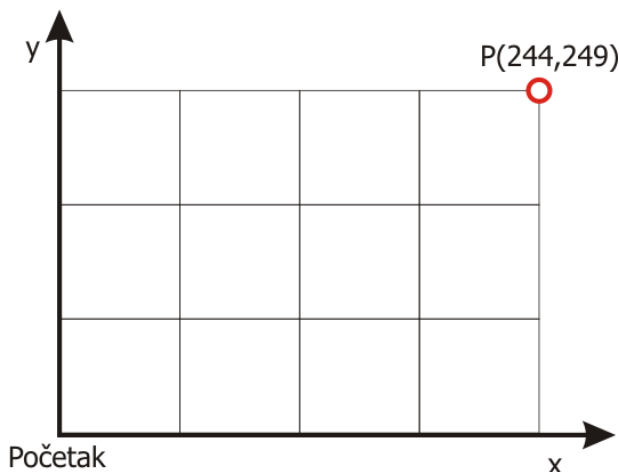




Svi komercijalni GPS prijemnici određuju lokaciju na osnovu geografskih koordinata koje se u takvom obliku i zapisuju. Međutim, za obradu, analizu i mapiranje, georeferencirani podaci moraju se projektovati, odnosno transformisati u koordinate lokalnog-pravouglog Dekartovog koordinatnog sistema.

Projektovani koordinatni sistem je bilo koji koordinatni sistem namenjen za prikazivanje tačaka na ravnoj površini kao što su štampane karte ili ekran kompjutera. Kartografska projekcija je matematički način prikazivanja Zemljine površine, tj. njenog elipsoida na ravan. Prenos se vrši na osnovu zavisnosti između koordinatnih tačaka na obema površinama. Budući da je Zemljinu površinu nemoguće preneti na ravnu površinu bez određenih raskidanja, nabiranja i nepravilnosti, neizbežne su određene deformacije geometrijskih svojstava figure na ravan.

Dekartov koordinatni sistem je sistem pravougljih koordinata koji sadrži dve osnovne ose X i Y. Horizontalna osa je X osa koja se često naziva *Easting*, a vertikalna je Y koja se zove još i *Northing*. Presek X i Y ose se naziva početak (*origin*). Projekciona ravan je označena na jednakim intervalima sa koordinatnim linijama koje čine mrežu mape-karte. Davanjem numeričkih atributa u vidu x i y vrednosti, može se precizno i objektivno odrediti bilo koja lokacija na mapi (sl. 70).



Sl. 70. Ilustracija 2D Dekartovog (Cartesian) koordinatnog sistema

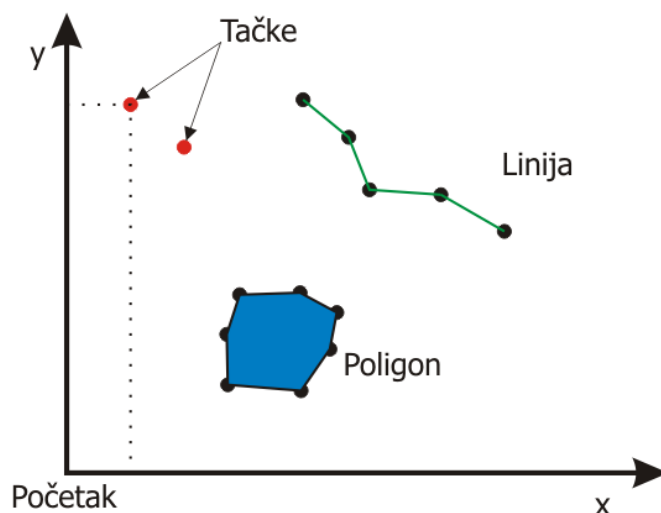
Za projektovanje WGS84 koordinata tačaka snimljenih tokom merenja otpora ili snimanja nekog drugog parametra na terenu, korišćena je Gaus Krigerova projekcija zona 7 (GKZ7), a koordinate su prikazane u državnom koordinatnom sistemu RGZ-CKN Novi Sad (Republički geodetski zavod). Za pretvaranje WGS koordinata u državne, korišćen je GIS program *Trimble Business Center*.



#### 4.6.1. Primena geografsko informacionog sistema (GIS) za potrebe određivanja prostorne varijabilnosti otpora i korespondentnih osobina zemljišta

GIS predstavlja kompjuterizovani, integrisani sistem za prikupljanje, kompajliranje, skladištenje, održavanje i rad sa prostornim i atributnim podacima geografski lociranim na Zemlji ili u prostoru. U širem smislu, GIS je oruđe "pametne karte" koje omogućava pravljenje prostornih upita radi kompleksne analize, kreiranje planova ili karata sa statističkim podacima i prezentaciju rezultata istraživanja, generisanjem grafičkih i alfanumeričkih izveštaja u integrisanom okruženju. Postoje dve vrste GIS-a i to vektorski i rasterski sistem. Ova dva sistema se razlikuju u načinu na koji se prostorni podaci prikazuju i čuvaju. *Burrough (1986)* je izložio korisnu komparaciju između vektorskog i rasterskog sistema. Kod oba sistema, geografski koordinatni sistem se koristi za prikazivanje pozicije.

**Vektorski model podataka.** Kod vektorskog modela podataka prostorni podaci se definišu kao "tačke", "linije" i "poligoni" (sl. 71).



Sl. 71. Prikazivanje prostornih karakteristika (tačka, linija i poligon) kod vektorskog GIS-a

Tačka se definiše kao pojedinačni set koordinata. U disertaciji, vektorski model podataka su se koristile kod prikazivanja mesta uzorkovanja na parceli, definisanja graničnih tačaka parcele-tretmana unutar parcele, diskretizovanih tačaka merenja otpora. Linijski modeli podataka predstavljaju povezan niz tačaka u prostoru sa svojim početkom i krajem. Model podataka u obliku linije je korišćen za prikazivanja linija granica parcele i putanja agregata. Poligoni ili zatvorene površi su korišćeni za prikazivanje oblika i veličine parcele, delova parcele na kojima su primenjeni različiti tretmani itd. Poligoni predstavljaju skup više povezanih linija čija je karakteristika da im se početak i kraj poklapaju u istoj tački.



Baziran na koordinatnom sistemu, vektorski GIS poznaje apsolutnu lokaciju u prostoru posmatrane karakteristike (tačke, linije ili poligona) kao i međusobni odnos sa drugom karakteristikom (topologiju ili relativnu lokaciju). U ovom slučaju on se koristio za prikazivanje međusobnog položaja interesnih tačaka u prostoru.

Kada se prostorne karakteristike prikažu u vektorskom GIS-u, njihove povezane osobine mogu biti naznačene u odvojenim bazama podataka. Ove osobine se često nazivaju "teme" koje se grafički prikazuju "tematskim mapama".

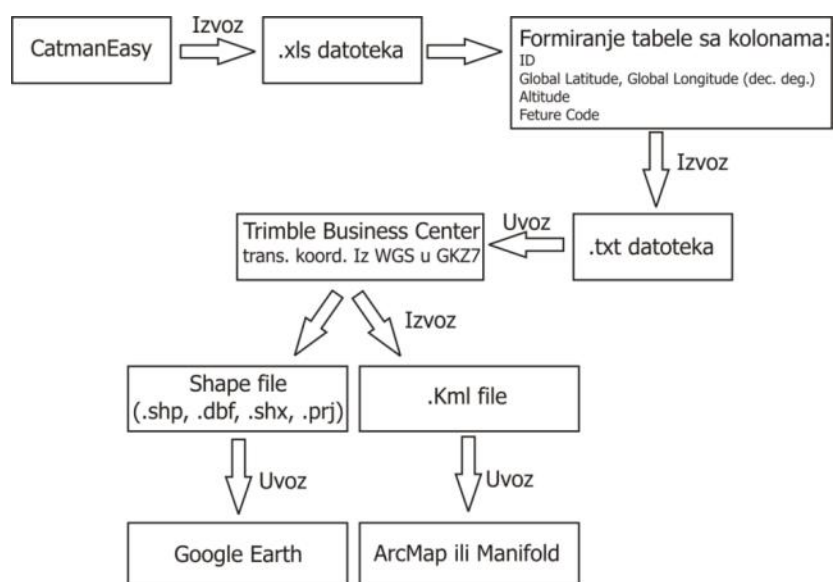
**Geoprocena obrada podataka za dobijanje Shapefile.** ESRI *shapefile* je popularni vektorski format prostornih podataka koji je namenjen za manipulaciju u GIS softveru. ESRI ga je razvio kao otvorenu specifikaciju za interoperabilnost podataka između ESRI i softverskih proizvoda. *Shapefile* prvenstveno opisuje geometriju koja se sastoji od osnovnih geometrijskih objekata kao što su tačka, linija i poligon. Svaki od navedenih objekata sadrži neke od atributa koji ga opisuju bilo da se radi o rednom broju, dužini, površini ili nekom drugom svojstvu koje je vezano za objekat. Iako je *shapefile* uobičajen i jedinstven termin, *shapefile* se zapravo sastoji od seta datoteka sa različitim ekstenzijama od kojih su tri datoteke obavezne, a postoji još celi niz opcionih datoteka koje pomažu u snalaženju spodacima, njihovim korištenjem i manipulacijom istih (tab. 10).

Tab. 10. Tabelarni prikaz obaveznih *shapefile* ekstenzija i pripadajućih podataka

Ekstenzija	Opis	Neophodnost
.shp	Osnovni fajl koji sadrži karakteristiku geometrije. Atributi nisu uključeni u okviru fajla.	Da
.shx	Shape indeks format, indeks koji označava geometriju i omogućava brzo pretraživanje u oba smera, od početka ili od kraja.	Da
.dbf	Atributivni format, atributi poređani u kolone za svaku karakteristiku.	Da
.sbn i .sbx	Sadrži prostorni indeks karakteristike.	Ne
.atx	Atributivni indeks za .dbf datoteku.	Ne
.ixs	Indeks geokodiranja za shapefile koji se može čitati i pisati.	Ne
.mxs	Indeks geokodiranja za shapefile koji se može čitati i pisati u ODB formatu.	Ne
.prj	Projekcijski format, koordinatni sistem i projekcijski parametri.	Ne
.xml	Metapodaci u XML formatu	Ne
.cpg	Definiše korišćenu kodnu stranicu za znakove korišćene u .dbf datoteci.	Ne
.ain i .aih	Atributivni indeks aktivnih polja u tablici ili tematskoj atributnoj tablici	Ne
.fbn i .fbx	Prostorni indeks objekata za shapefile koje read-only (samo čitljiv)	Ne



U disertaciji su *shapefile*-ovi korišćeni za opisivanje svojstva tačaka u prostoru bilo da je u pitanju vrednost otpora za konkretnu lokaciju ili neke merljive fizičke osobine zemljišta (vlažnost, zapreminska masa, mehanički sastav, itd). Procedura dobijanja *shapefile* razlikovala se u zavisnosti od GPS uređaja koji se koriste pri poljskom lociranju. Kada se koristio ručni GPS uređaj *Trimble Juno SB* za određivanje lokacije mesta uzorkovanja zemljišta, *shapefile* je automatski generisan u samom uređaju koji ima u sebi instaliran GIS softver *Digiterra Explorer* za prikupljanje terenskih podataka. U slučaju merenja otpora vuče, kada je korišćen komercijalni GPS uređaj *Trimble Easy Guide 500* čija je osnovna namena pre svega navigacija poljoprivrednih mašina na parceli u cilju pravilnog sklapanja prohoda, procedura je bila malo komplikovanija i zahtevala je paralelnu upotrebu Office (*MS Excel*, *UEdit32*) i GIS (*Trimble Business Center*) softvera. Procedura se sastojala iz više koraka (sl. 72).



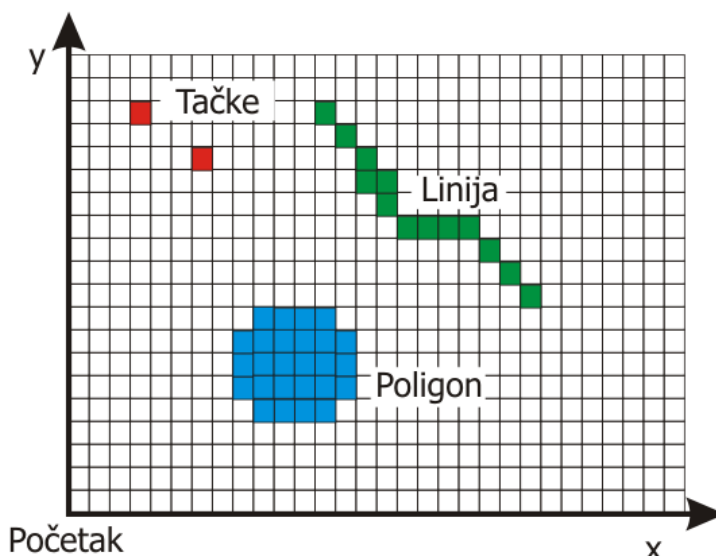
Sl. 72. Procedura dobijanja *shapefile* datoteke

**Rasterski model podataka.** Rasteri su veoma pogodni za predstavljanje podataka koji se menjaju kontinualno u prostoru. Njima se omogućava efikasno skladištenje prostornog kontinuiteta neke karakteristike. Kod rasterskog sistema predstavljanja podataka, prostor je prikazan u obliku pravilne mreže gde je svakoj ćeliji dodeljen jedinstveni deskriptor zavisno od koordinatnog sistema koji se koristi (sl. 73). Kod rasterskog sistema, podaci su smešteni u mreži koja predstavlja "sloj", što se razlikuje u odnosu na vektorski sistem prikazivanja. Svaka mreža sadrži jedinstveni set informacija. To znači da u slučaju rasterskog sistema, svaka osobina zemljišta se prikazuje u zasebnim slojevima. Zbog toga su veći zahtevi za



skladištima podataka kod rasterskog u odnosu na vektorski GIS. Preciznost rasterskog GIS-a u smislu prostorne rezolucije zavisi od veličine ćelije unutar mreže sloja. Rasterski sistemi praktično su veoma korisni kada treba obaviti numeričke manipulacije pre svega zbog svoje ujednačene strukture. U poljoprivredi ovaj model se najčešće primenjuje kod sistema za mapiranje prinosa na univerzalnim kombajnama.

U disertaciji, rasterski model se koristi za grafičko prikazivanje rezultata obrade podataka u obliku mapa varijabilnosti otpora i karakteristika zemljišta koje su generisane na osnovu rezultata geostatističke (*kriging-kokriging*) analize prostornih podataka.



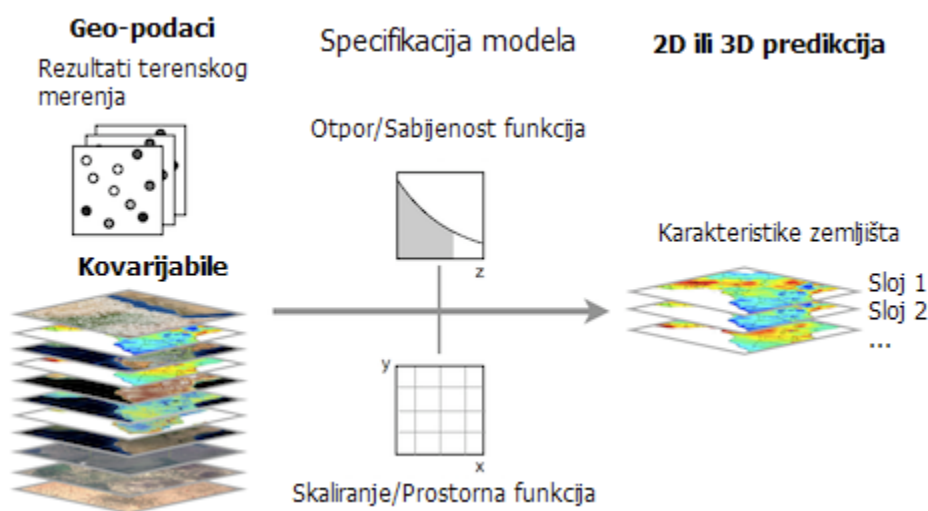
Sl. 73. Prikazivanje prostornih karakteristika (tačka, linija i poligon) kod rasterskog GIS-a

**Postupak izrade 2D ili 3D karata.** Mape u okviru GIS-a imaju višestruku ulogu. One oslikavaju logičku kolekciju geografskih informacija u vidu slojeva. Istovremeno, mape pružaju efikasnu metaforu za modeliranje i organizovanje geografskih informacija kao niza tematskih slojeva.

Da bi se pokrenuo postupak dobijanja 2D ili 3D tematskih mapa (karti) neophodno je prvenstveno prikupiti odgovarajući fond podataka dovoljne prostorne gustine koji se odnose na poznate lokacije (*Webster i Oliver, 1992*). Potrebna gustina prostornog uzorkovanja zavisi od prirode posmatrane pojave. Nedovoljan broj prostornih podataka ima za posledicu neodgovarajući oblik variograma (videti u poglavlju "Oblik variograma") kojim se ne može objasniti varijacija. Prostorni raspored lokaliteta sa kojih su prikupljeni podaci može odgovarati pravilnom rasporedu tačaka u prostoru ili biti neodređen sa slučajno izabranih lokacija. Svaki podatak mora sadržati informaciju o koordinatama Dekartovog koordinatnog sistema i atributivno obeležje. Tako formirane tekstualne tabele uvoze se u GIS softvere koji



imaju mogućnost analize geopodataka primenom posebnih geostatističkih tehnika (variogramaska analiza). Nakon toga se primenom tzv. *kriging* ili *kokriging* tehnike interpolacije dobijaju optimalne vrednosti jednako raspoređene na posmatranoj površini. S obzirom da se podaci odnose na diskretne lokacije, a da bi se kreirala mapa na celoj interesnoj površini, neophodno je obaviti predviđanje vrednosti za svaki delić parcele. Upravo to je funkcija primene geostatističke analize, odnosno tehnika interpolacije koje ona podrazumeva. Na kraju se na osnovu interpoliranih, odnosno optimizovanih prostorno kontinualnih vrednosti iscrtavaju 2D ili 3D mape (sl. 74). Ovakva dobijena mapa je optimalna i nepristrasna reprezentacija karakteristike na površini od interesa. Mapa se može prikazati na različite načine, sa različitim konturnim šemama. U disertaciji su korišćena dva GIS paketa za generaciju mapa i geostatističku analizu i to *ESRI ArcMap 10* i *GS+ for Windows*.



Sl. 74. Šematski prikaz procesa mapiranja podataka



## 5. Geostatistička analiza

**P**recizna poljoprivreda jednim delom je posledica razvoja posebne naučne discipline pod nazivom "Geostatistika" koja izučava tehnike obrade i načina prikazivanja geografski orjentisanih podataka. Zbog svog velikog značaja, a istovremeno male ili skoro nikakve primene u naučno-istraživačkom radu iz oblasti poljoprivrede, ovoj temi je posvećeno posebno poglavlje. Za potrebe pisanja ovog poglavlja korišćeni su mnogi literaturni izvori, od kojih su najviše korišćeni navodi iz knjige "Geostatistical Applications for Precision Agriculture" autorke i urednice Margareth A. Oliver.

### 5.1. Istorijat razvoja geostatistike

Ono što se danas podrazumeva pod pojmom Geostatistike jesu modeli i tehnike koje su u najvećoj meri razvijene od strane *Matheron (1963)* za potrebe procenjivanja rezervi u rudarskoj industriji. Može se reći da koreni ideje o geostatističkoj analizi datiraju još iz ranijeg perioda. *Merecer i Hall (1911)* su proučavali varijabilnost prinosa ratarskih useva na malim oglednim parcelama. Njihovo interesovanje se odnosilo na određivanje optimalne veličine parcele za proučavanje prinosa ratarskih kultura. Kao dodatak istraživanjima autora *Merecer i Hall (1911)*, nepoznati autor u svom radu ukazuje na veću sličnost prinosa sa parcela koje su međusobno na maloj prostornoj udaljenosti u odnosu na one koje na većem međusobnom rastojanju. On ukazuje na dva uzroka varijacije u polju i to: autokorelacija (prostorna međuzavisnost) i slučajnost (prostorna nezavisnost). Iako je postojalo razumevanje pojave prostorne varijabilnosti, ove ideje su praktično bile bez nekog naučnog značaja sve do sredine 20. veka. Sa porastom količine podataka u poljoprivrednim istraživanjima, javila se potreba za dodatnim statističkim ekspertizama. *Fisher (1925)* je u svojim istraživanjima



posebno dizajnirao poljski eksperiment kako bi eliminisao uticaj bliskih varijacija koristeći velike parcele i udaljene varijabilnosti primenom blok sistema malih parcela. Rezultat je bio mali uticaj prostorne varijacije. *Youden i Mehlich (1937)* su unapredili Fisher-ovu (*Fisher 1925*) analizu varijanse u delu predikcije varijacije koja je posledica uzimanja uzoraka na različitim rastojanjima. Cilj im je bio bolje planiranje eksperimenta kojim će se eliminisati nepotrebno angažovanje. *Miesch (1975)* u svojim studijama pokazuje jednakost komponenti varijacije primenom hijerarhijske analize varijanse, bazirane na prostornim rastojanjima. *Webster i Butler (1976)* takođe primenjuju ovaj pristup u oblasti pedologije.

Istraživanja ruskog naučnika iz oblasti meteoteorologije (*Kolmogorov 1941*) dovelo je do prepoznavanja prostorne autokorelacije od koje je on razvio "strukturnu funkciju" koja se danas zove variogram. Isti autor je takođe razrađivao tehniku kako da koristi strukturnu funkciju u cilju optimalne interpacije (danas poznata kao *kriging* tehnika). Ranih 50-tih godina prošlog veka, istraživač *Daniel Gerhardus Krige* je zaključio da je u rudnicima zlata u Južnoj Africi, varijacija između blok uzoraka manja nego među pojedinačnim uzoracima, nakon čega je stavio u korelaciju blok uzorke i pojedinačne uzorke. Uočio je da se ovom relacijom može unaprediti predviđanje primenom regresije (*Krige 1951*). Ova tehnika predstavlja prvo efektivno korišćenje tzv. *kriging*-a koje je kasnije nazvano elementarnim *kriging*-om u čast tvorca Krigea. *Matheron (1963)* je proširio Krigovu empirijsku ideju u delu koncepta gde se susedni uzorci mogu koristiti za unapređenje predikcije i postavio je u teoretski okvir koji predstavlja deo geostatistike. *Matheron (1963)* je prvi put upotrebio termin "*kriging*". Geostatistika je postala osnovni deo prostorne statistike (*Cressie 1993*). Ona se danas primenjuje u mnogim oblastima kao što su poljoprivreda, ribarstvo, geologija, naftna istraživanja, daljinsko snimanje, pedologija, a neizostavna je u preciznoj poljoprivredi.

## 5.2. Istorijat razvoja precizne poljoprivrede

Precizna poljoprivreda je suštinski sprovedena od strane poljoprivrednih proizvođača još u ranim fazama razvoja poljoprivrede. U prošlosti, proizvođači su bazirali svoju proizvodnju na samodovoljnosti, koju su organizovali na malim parcelama čije su proizvodne karakteristike poznavali veoma dobro. Zbog toga, oni su svoje parcele podelili na još manje površine na kojima su gajili one kulture koje su najbolje reagovala na karakteristike te mikroparcele. Tada je za njih pojam preciznost značilo osiguravanje dovoljne količine hrane za opstanak porodice. Sve do 80-tih godina prošlog veka, princip odlučivanja bio je na nivou jedne





parcele. Stanje parcele je određivano na osnovu uzetih uzoraka, a krajnji rezultat analize je prosečno stanje nekog posmatranog parametra čime je praktično isključena varijabilnost tog parametra na parceli. Takođe, prinos jedne parcele posmatran je kao ukupna težina zrna sa jedne parcele.

Prvi put se termin *precizna poljoprivreda* (precision farming) upotrebio kao naslov radionice organizovane od strane Državnog Univerziteta u Montani (SAD). Pre toga upotrebljavali su se drugi termini poput „prostorno specifični menadžment u biljnoj proizvodnji“ (*site-specific crop management*) ili „prostorno specifični menadžment u poljoprivredi“ (*site-specific agriculture*). Prve dve naučne konferencije koje su se tematski odnosile na preciznu poljoprivredu imale su u naslovu termin "prostorno specifični menadžment", dok je treća iz 1996. bila naslovljena kao "precizna poljoprivreda". Sam koncept moderne precizne poljoprivrede je usavršavan i dodatno je potpomognut tehnološkim napretkom informacionih tehnologija (*Schueller 1997*). Tehnološki razvoj omogućio je dodatnu preciznost lokalnog menadžmenta i premestio fokus sa parcele, kao proizvodne jedinice, na njene unutrašnje varijabilnosti. U prilog povećanja varijabilnosti proizvodne parcele ide proces ukрупnjavanje poseda ukklanjanjem granica na postojećim manjim parcelama kako bi se povećala efikasnost primene visokoproduktivne mehanizacije. Originalne granice koje su nekada postojale su verovatno bile prirodne granice između različitih tipova zemljišta, reljefa ili nekih drugih pejzažnih različitosti koje sada čine jedinstvenu proizvodnu celinu sa svim međusobnim različitostima.

*Robert (1999)* naglašava da je od sredine 70-tih i ranih 80-tih godina prošlog veka postojala svest farmera o potencijalnim pogodnostima pravljenja evidencije u proizvodnji i razumevanju potreba zemljišta i biljaka. Nakon toga je rađen projekat od strane *SoilTeq* (*Luellan 1985*) tokom kojeg je razvijen rasipač mineralnog đubriva sa mogućnošću promene norme u hodu koji spada u tzv. tehnologiju aplikacije promenljivih normi (VRT). Prva VRT mašina korišćena je 1985. godine od strane poljoprivredne kooperative CENEX (Farmers Union Central Exchange). David Mulla je 1986. godine sarađivao sa firmom *SoilTeq* u cilju kreiranja specijalizovanog GIS programa za prostorno mapiranje hraniva. Prve mape u ovom softveru kreirane su 1987. godine. *Robert (1999)* napominje da je razvoj mikroprocesora sredinom 80-tih godina omogućio razvoj računara namenjenih opremi i kontrolerima u poljoprivredi, pozicioniranje pomoću GPS sistema, primenu senzora, akviziciju i obradu prostornih podataka i upotrebu GIS-a za generaciju mapa. Može se reći da 80-tih godina prihvaćen novi pogled na poljoprivrednu proizvodnju (*Cochrane 1993*). Jedan od ključnih



momenata je uvođenje monitora prinosa od strane proizvođača kombajna *Massey Ferguson* tokom 1982. godine. Uređaj je bio montiran na elevatoru čistog zrna čime je prinos praćen kontinualno u vremenu. Ista firma je 1984. godine napravila ogled u Velikoj Britaniji s ciljem sagledavanja uslova u kojim se može primeniti monitor prinosa za merenje varijabilnosti i kada se pojavljuju varijacije prinosa. U to vreme nisu bili dostupni GPS prijemnici pa je firma organizovala ogled na sledeći način. Napravili su mrežu dimenzije polja 10 m x 10 m na usevu pšenice i početak svakog polja su obeležili markerom. Čitava parcela sa poljima je požnjevena jednim kombajnom i sa dva čoveka. Jedan je bio vozač, dok je drugi ručno beležio prinos sa merača za svako pojedinačno polje. Tokom 90-tih godina kada je počela primena GPS prijemnika, snimanje prinosa je postala rutina. Prvi GPS prijemnici koristili su se na traktorima 1991. godine, ali im sa niskom tačnošću od svega 100 m što nije dovoljno za potrebe mapiranja. Sredinom 1990-tih godina Ministarstvo odbrane SAD-a ukinulo je selektivnu dostupnost za diferencijalni GPS (DGPS) čime je preciznost pozicioniranja povećana na 5-10 m, a tokom 2000-tih je tačnost dodatno povećana.

Pre 1990-tih, mape su se vrlo malo koristile u menadžmentu u poljoprivredi. *Schafer et al. (1984)* su naveli da se mape zemljišta i topografije mogu koristiti u kontroli rasipača mineralnih đubriva, prskalica i oruđa za obradu. Prva mapa prinosa od strane *Searcy et al. (1989)* pokazuje uticaj sabijenosti zemljišta na prinos.

*National Research Council (1997)* daje jasnu definiciju precizne poljoprivrede na sledeći način: "precizna poljoprivreda je strategija menadžmenta koji koristi informacione tehnologije za dobijanje podataka sa različitih izvora, radi donošenja odluka koje su u skladu sa potrebama poljoprivredne proizvodnje". Oni su dodali da precizna poljoprivreda ima tri komponente: dobijanje podataka u odgovarajućoj razmeri, interpretacija i analiza podataka, i implementacija menadžmenta u odgovarajuće vreme i u odgovarajućoj količini. Osnovni kamen spoticanja za širu primenu precizne poljoprivrede je mala gustina informacija o usevu i zemljištu. Postoje i parametri koji se mere u hodu (*on-the-go*) kao što je merenje pH zemljišta (*Viscerra Rossel i McBratney 1997*), mehaničkog otpora zemljišta itd. Problem kod sistema za merenje u hodu je taj što oni mere indirektno neku osobinu zemljišta ili stanje useva bez mogućnosti kompenzacije uticaja ostalih faktora, pa je neminovna pojava greške u manjem ili većem procentu (*Kostić et al., 2013*). *National Research Council (1997)* naglašava da "tekuće tehnike mapiranja su limitirane zbog nedostatka razumevanja za nephodnošću geostatistike u postupku prikazivanja varijabilnosti stanja useva i zemljišta", kao i da "povećanje znanja i veština iz oblasti geostatistike treba da unaprede interpretaciju informacija precizne



poljoprivredne proizvodnje". Prethodni navodi ukazuju da je veliki deo geostatistike utvrđen u preciznoj poljoprivredi. Povezivanje geostatistike i precizne poljoprivrede bilo je neophodno obzirom da geostatistika zahteva dovoljno podataka u intervalima kojima se objašnjava varijabilnost izračunavanjem odgovarajućih variograma.

### 5.3. Istorijat razvoja Geostatistike u okvirima precizne poljoprivrede

*Mulla i Hammond (1988)* su prvi primenili geostatistiku eksplicitno u preciznoj poljoprivredi. Rad je napisan sa ciljem upoznavanja geostatistike za potrebe mapiranja hraniva u zemljištu, određivanja prirode i obima varijabilnosti hraniva i određivanja potrebne gustine uzorkovanja radi prepoznavanja prostorne tendencije zemljišta. *Mulla i Hammond (1988)* su naveli da program za varijabilnu promenu inputa zahteva odgovarajuće uzorkovanje i preciznu mapu sa potrebama biljaka. Njihove preporuke bile su da ako postoji varijabilnost u polju, onda proizvođači trebaju da izbegavaju ujednačen tretman. Autori su upotrebili geostatistiku za interpoliranje međuvrednosti na osnovu rada iz oblasti pedologije od autora *Warrick et al. (1986)*. *Burgess i Webster (1980a, b)* i *Burgess et al. (1981)* koji su primenili geostatistiku na podacima o zemljištu. Cilj im je bio da odrede prostornu strukturu u varijabilnosti primenom variogramске analize i da primenom *kriging* tehnike predviđanja generišu mapu varijabilnosti zemljišnih parametara. Iako je njihov rad bio ranije objavljen u odnosu na rad *Mulla i Hammond (1988)* koji se direktno odnosio na preciznu poljoprivredu, on nije bio vođen prema modernim principima precizne poljoprivrede.

Tokom istog perioda *Miller et al. (1988)* i *Webster i Oliver (1989)* primenili su geostatistiku u svrhu poljoprivrede. *Miller et al. (1988)* pokušali su da objasne razvoj i prinos gajenih kultura pomoću prostorne veze fizičkih i hemijskih osobina zemljišta. U svom radu računali su variograme i unakrsne variograme za nekoliko parametara, a ujedno su koristili *kriging* za generaciju mapa. *Webster i Oliver (1989)* su prvi upotrebili disjunktivni *kriging* u poljoprivredne svrhe. Radovi autora Mulla tokom 1980-tih i 1990-tih išli su u pravcu implementacije geostatistike u preciznu poljoprivredu (*Mulla 1989, 1991, 1993; Bhatti et al., 1991*). Broj studija na polju primene geostatistike u preciznoj poljoprivredi je permenentno rastao sve do 2008. godine nakon čega se taj broj smanjivao. Razlog tome je opšte prihvatanje geostatistike u preciznoj poljoprivredi zbog čega autori ne moraju eksplicitno da objašnjavaju korišćene geostatističke metode.



## 5.4. Osnove geostatistike

Geostatistika kakva je danas poznata predstavlja teoretsku interpretaciju (Matheron 1963) Krigovih empirijskih opservacija (Journel i Huijbregts 1978; Goovaerts 1997; Webster i Oliver 2007). Kompleksnost prostorne varijacije parametara u zemljištu, na zemljištu i iznad zemljišta navodile su Matheron-a da nađe alternativni pristup tradicionalnoj determinističkoj analizi. Pristup koji je usvojio je jedini koji je uspeo da poveže prostornu neizvesnost podataka na stohastičan način. Osnova moderne geostatistike je tretiranje interesne promenljive kao slučajnu promenljivu. To znači da za svaku tačku "x" u prostoru postoji niz vrednosti karakteristike  $Z(x)$ , a posmatrana  $Z(x)$  je dobijena kao slučajnost prema nekom zakonu, neke distribucije verovatnoće. Za tačku  $x$ , osobina  $Z(x)$  je slučajna promenljiva sa srednjom vrednošću  $\mu$  i varijansom  $\sigma^2$ . Red sličajno promenljivih  $Z(x_1), Z(x_2), \dots$ , je slučajni proces, a aktuelna vrednost  $Z$  je samo jedna od potencijanih realizacija tog procesa.

Da bi objasnili varijabilnost ishodišnog slučajnog procesa, možemo se koristiti činjenicom da je vrednost regionalizovane promenljive na mestu pored druge sa tendencijom da budu u autokorelaciji. Stoga, možemo proceniti prostornu kovarijansu radi opisivanja odnosa između parova tačaka na sledeći način:

$$C(x_1, x_2) = E\{[Z(x_1) - \mu(x_1)][Z(x_2) - \mu(x_2)]\} \quad (5.1)$$

gde su  $\mu(x_1)$  i  $\mu(x_2)$  srednje vrednosti od  $Z$  na mestu  $x_1$  i  $x_2$ , a  $E$  označava očekivanu vrednost. Pošto postoji jedna realizacija  $Z$  za svaku tačku, to rešenje je nedostupno jer je srednja vrednost nepoznata. Kako bi nastavili postupak, moramo se pozvati na pretpostavku o stacionarnosti.

### 5.4.1. Stacionarnost

Pod pretpostavkom stacionarnosti, atributi slučajnog procesa su jednaki u svim pravcima. Pretpostavlja se da je srednja vrednost,  $\mu = E[Z(x)]$  konstanta za sve vrednosti  $x$ , stoga se  $\mu(x_1)$  i  $\mu(x_2)$  mogu zameniti sa  $\mu$  koji može biti procenjeno repetitivnim uzorkovanjem. Kada se  $x_1$  i  $x_2$  podudaraju, jednačina 4.1 određuje varijansu,  $\sigma^2 = E\{[Z(x) - \mu]^2\}$ , koja je pretpostavljena kao konačna i kao kod srednje vrednosti jednaka u svim pravcima. Kada se  $x_1$  i  $x_2$  ne poklapaju, njihove kovarijanse zavise od njihove razdvojenosti, ali ne i od njihove apsolutne pozicije, i to se primenjuje na parove tačaka  $x_i, x_j$  koje su međusobno na rastojanju  $h = x_i - x_j$  (vektor u oba pravca i smeru), shodno tome je:



$$C(x_i, x_j) = E\{[Z(x_i) - \mu][Z(x_j) - \mu]\} = E\{[Z(x)]\{Z(x+h) - \mu\}\} = C(h), \quad (5.2)$$

koje predstavlja konstantu za dato  $h$ . Jednačina 5.2 ukazuje da je kovarijansa funkcija rastojanja  $h$ , koja opisuje zavisnost između vrednosti  $Z$  sa promenom rastojanja. Autokovarijansa zavisi od razmere u kojoj je  $Z$  vrednost izmeren, stoga često autokovarijansa konvertuje u bezdimenzionalnu autokovarijansu (jed. 5.3).

$$\rho(h) = C(h)/C(0) \quad (5.3)$$

gde je  $C(0) = \sigma^2$  kovarijansa na rastojanju 0.

#### 5.4.2. Unutrašnja varijabilnost i variogram

Srednja vrednost je često promenljiva u jednom području, a varijansa raste neodređeno kako se povećava površina. Zbog toga, ne postoji vrednost  $\mu$  koja bi se ubacila u jednačinu 5.2, a da kovarijansa može biti određena. Ovo dolazi od slabe stacionarnosti. Rešenje po *Matheron (1965)* je *unutrašnja hipoteza* geostatistike. Iako opšta srednja vrednost ne mora biti konstantna za mala rastojanja, stoga očekivana razlika može biti jednaka nuli po principu:

$$E[Z(x) - Z(x+h)] = 0 \quad (5.4)$$

Matheron je zamenio kovarijanse sa očekivanim kvadratnim razlikama:

$$E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} = \text{var}[Z(x) - Z(x+h)] = 2\gamma(h). \quad (5.5)$$

Vrednost  $\gamma(h)$  je poznata kao semivarijansa na rastojanju  $h$  ili varijansa za tačku kada se tačke posmatraju kao parovi. Kao za kovarijansu, semivarijansa zavisi samo od rastojanja ali ne i od apsolutne pozicije podatka. Funkcija  $\gamma(h)$  je semivariogram ili kako se danas najčešće naziva variogram.

Ako je proces  $Z(x)$  stacionaran, variogram i kovarijansa su ekvivalentni:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) = \sigma^2\{1 - \rho(h)\} \quad (5.6)$$

Bilo kako, ukoliko je proces unutrašnji, tu ne postoji jednakost jer funkcija kovarijanse ne postoji. Variogram je validan i može se primeniti mnogo šire nego funkcija kovarijanse. Ovo čini variogram vrednom alatkom i osnovom geostatistike.

Najčešće korišćeni metod za izračunavanje empirijske semivarijanse od podataka  $z(x_1)$ ,  $z(x_2)$ , ..., je tzv. "MoM" (method of moments) autora *Matheron (1965)*. Oblik jednačine je sledeći:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} \{z(x_i) - z(x_i+h)\}^2, \quad (5.7)$$



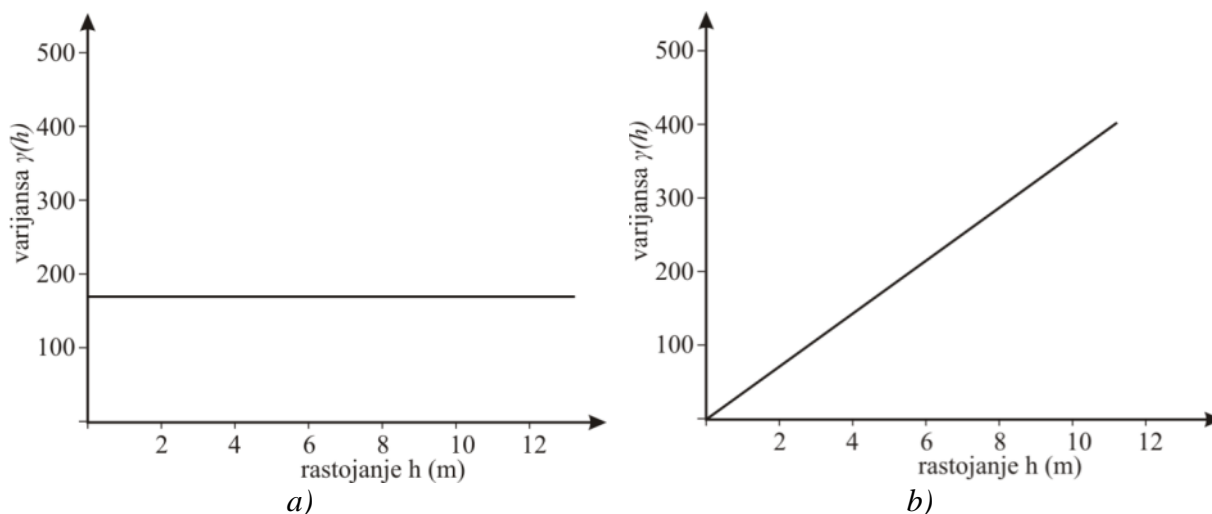
gde su  $z(x_i)$  i  $z(x_i+h)$  aktuelne vrednosti od  $Z$  na mestima  $x_i$  i  $x_i+h$ , a  $m(h)$  je broj parova poređenja na rastojanju  $h$ . Eksperimentalni ili probni variogram je dobijen promenom vrednosti  $h$ . Ako su uzorci pravilno uzimani po pravougaonom ili matričnom rasporedu, semivarijansa može biti izračunata kao integral nad intervalima uzorkovanja. Kod poprečnog preseka, rastojanje  $h$  predstavlja skalarnu vrednost ( $h=|h|$ ), a maksimalno rastojanje bi trebalo biti manje od trećine dužine poprečnog preseka. Za slučaj nepravilnog uzorkovanja ili za računanje variograma za pravilno raspoređene podatke, razdvojenost između parova tačaka je u okvirima granica za oba pravca i oba smera.

*Webster i Oliver (1992)* su pokazali da je potrebno najmanje 100 tačaka (prostornih merenja) za procenu pouzdanosti variograma. Njihovi rezultati jasno pokazuju posledice malog broja podataka. *Pardo-Igúzquiza (1997)* predlaže pristup maksimalne verovatnoće kao alternativa Matheron-ovom.

Iako linearna geostatistika ne zahteva normalnu distribuciju, bilo kakava asimetrija u distribuciji se označava sa koeficijentom asimetričnosti, i ukoliko je vrednost veća od 1 ili manja od -1, takav slučaj bi trebalo ispitati.

### 5.4.3. Oblik variograma

Mnoge prostorne promenljive variraju kontinualno u prostoru, zbog toga bi trebalo očekivati da funkcija  $\gamma(h)$  prolazi kroz vrednost  $h=0$  (sl. 75). Funkcija variograma se često približava nekoj pozitivnoj vrednosti na koordinatama kako se  $h$  približava 0 ( $|h|\rightarrow 0$ ), što ukazuje da je proces prekidnog karaktera. Ova pojava je poznata kao *nugget* varijansa.

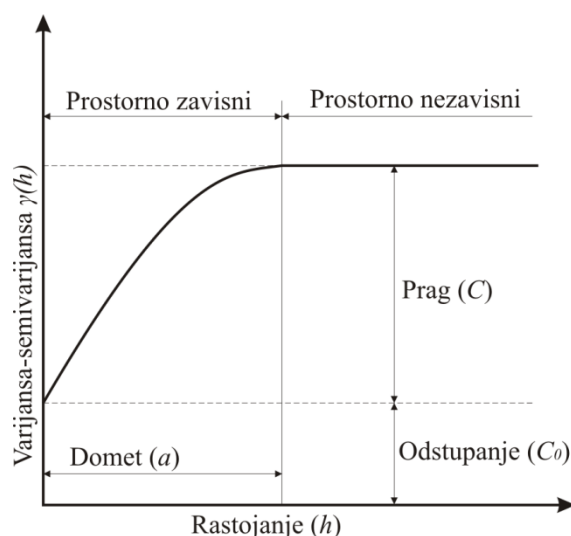


Sl. 75. Primer grudvaste-nugget (a) i linearne (b) karakteristike variograma



Za osobine koje se menjaju neprekidno, *nugget* varijansa uključuje neke greške pri merenju, a to uključuje glavne varijacije koje se dešavaju mimo rastojanja manjih od najmanjeg intervala uzorkovanja. Slika 75a predstavlja oblik „*nugget*“ variograma koji obično ukazuje da je interval uzorkovanja veoma velik da bi se objasnila varijacija. Variogram sa linearnim porastom ukazuje da je process prostorno povezan, odnosno da je u autokorelaciji (sl. 75b). Ukoliko variogram neograničeno raste sa porastom razmaka proces je samo unutrašnji.

Kod karakteristične variogramske krive, semivarijansa raste sa porastom rastojanja (*lag distance*) kao na slici 76. Male vrednosti  $\gamma(h)$  na kratkim rastojanjima ukazuju da su vrednosti  $Z(x)$  slične, ali da sa povećanjem rastojanja one postaju više različite.



Sl. 76. Objašnjenje elemenata variogramskog modela

Vriogrami koji dostižu gornju granicu nakon početnog uspona opisuju stacionarni process drugog reda. Ovaj maksimum je poznat kao prag varijacije i to predstavlja primarnu varijansu ( $\sigma^2$ ) procesa. Mesta koja se nalaze izvan dometa su prostorno nezavisne.

Eksperimentalna variogramska kriva prikazana je na slici 75. može se očitati sledećih pet veličina: (1) odstupanje –  $C_0$  (*engl. nugget*), prag ili varijansa –  $C$  (*engl. sill*), (3) domet –  $a$  (*engl. range*), rastojanje –  $h$  (*engl. distance*) i korak (*engl. lag*). Prag varijanse ( $C+C_0$ ) obuhvata odstupanje ( $C_0$ ) i prostorno korelacionu varijansu, odnosno prag ( $C$ ).

**Odstupanje " $C_0$ "** predstavlja slučajnu komponentu regionalizovane promenljive, odnosno pojavu kada kriva seče osu  $y$  u nekoj pozitivnoj vrednosti ( $C_0$ ). Ova veličina se još i zove grumenski efekat (*nugget effect*), a uveli su ga rudarski inženjeri koji su velike količine neke rude nalazili u grumenju kao što je ruda zlata (*Rossi et al., 1992*), što je za posledicu imalo da



dva bliska merenja mogu biti potpuno različita. Ova karakteristika se uklanja smanjenjem površine ili povećanjem broja uzoraka, a u praksi se ono vrlo često ne može eliminisati.

**Prag "C"** je razlika pojedinačnih vrednosti i srednje vrednosti skupova podataka, što je ujedno definicija varijanse. Nakon dostizanja praga (ako ga poseduje) kriva variograma često prestaje pravilno da raste, te nastavlja oscilovanje oko njega.

**Domet "a"** je vrednost na kojoj variogram prvi put preseca prag, a nakon toga ne postoji prostorna korelacija ili zavisnost podataka.

**Korak** predstavlja veličinu koja se slobodno određuje i on predstavlja širinu klase u kojoj su grupisani parovi tačaka-lokacija kako bi se smanjio velik broj mogućih kombinacija parova. Dobro odabran korak može doprineti pronalaženju prostorne korelacije. Principijelno, treba ići na manje korake kako bi se variogramskim modelom obuhvatile što više lokalne varijacije. Korak nije prikazan na slici 76 jer zavisi od konkretnih računskih parametra.

**Rastojanje "h"** je vrednost na kojoj se međusobno upoređuju podaci. Svako rastojanje čini jednu klasu. Toj se vrednosti može dodeliti tolerancija nazvana korak (*engl. lag*). To znači da granicama klase dodajemo vrednost koraka šireći tako klasu, čime se povećava broj parova i dobija se bolji rezultat.

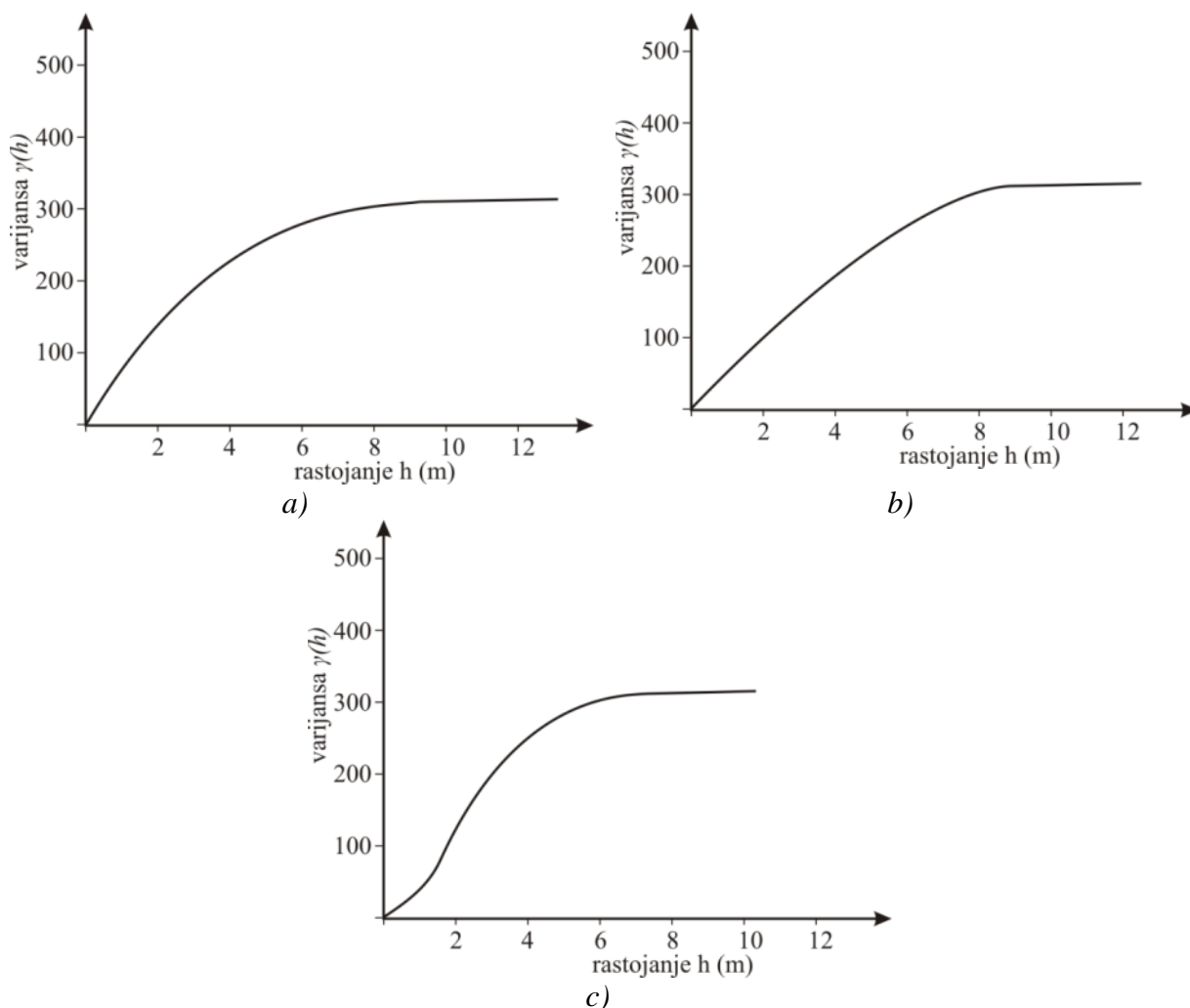
Svaki variogram opisan je i sa nekoliko svojstava, od kojih je najvažnije svojstvo anizotropija koja opisuje promenu vrednosti variograma zavisno od smera u kojemu je računat. Na temelju rezultata variogramske analize može se odrediti smer najvećeg i najmanjeg kontinuiteta. Njihov je odnos faktor anizotropije. Kada variogrami u različitim smerovima imaju isti prag i različit domet, radi se o geometrijskoj anizotropiji. Najčešće se obe veličine menjaju sa smerom pa se tada radi o zonalnoj anizotropiji. Sledeće često uočljivo svojstvo na brojnim variogramskim krivama jeste oscilovanje odnosno pojava približno pravilne promene vrednosti, najčešće oko praga, čemu je uzrok pseudoperiodičnost, a ne međuzavisnost analizirane promenljive. Pojava oscilovanja govori da više ne postoji prostorna zavisnost podataka. Ekstremi su vrlo visoke i niske vrednosti na krivoj. Mogu se pojaviti kao posledica premalog broja ulaznih podataka (kada su razlike između podataka često relativno velike). Češće čine manji deo podataka sa vrednostima koje izrazito odskaču od glavnoga skupa. Treba ih izdvojiti i odbaciti na histogramu analizirane varijable jer bitno utiču na variogramski račun zbog upotrebe izraza kvadrata razlike vrednosti.

Gotovo svi eksperimentalni (semi)variogrami mogu se matematički aproksimirati s pet teorijskih modela: sfernim, eksponencijalnim, Gausovim, linearnim i logaritamskim





(Hohn, 1988). Razlikuju se prema tome da li sadrže prag, te po načinu ponašanja krive u blizini ishodišta.



Sl. 77. Teorijski variogramski modeli: a) sferni; b) eksponencijalni; c) Gausov

Prva tri modela (sferni, eksponencijalni, Gausov) najčešće se upotrebljavaju u interpretaciji geoloških varijabli (sl. 77). Modeli bez praga su retki u poljoprivrednoj praksi.

Formule po kojima se definiše ponašanje varijable određene odabranim teorijskim modelom su sledeće (Isaaks i Srivastava, 1989):

$$\gamma(h) = C \left[ \left( \frac{3h}{2a} \right) - \left( \frac{h^3}{2a^3} \right) \right] \quad h \leq a \quad \text{Sferni model} \quad (5.8)$$

$$\gamma(h) = C \quad h > a$$

$$\gamma(h) = C \left[ 1 - \exp\left(\frac{-h}{a}\right) \right] \quad \text{Eksponencijalni model} \quad (5.9)$$

$$\gamma(h) = C \left[ 1 - \exp\left(\frac{-h^2}{a^2}\right) \right] \quad \text{Gausov model} \quad (5.10)$$



gde je:

$\gamma(h)$  - vrednost variograma na rastojanju „ $h$ “,

$h$  - rastojanje,

$C$  - konstanta i

$a$  - domet.

Aproksimaciju eksperimentalne krive moguće je uraditi stvaranjem složenoga modela koji predstavlja zbir dva ili više osnovnih teorijskih modela različitih dometa i pragova. Takav složeni model naziva se zbirnim modelom i predstavlja se kao zbir više osnovnih modela:

$$\gamma(h) = \gamma_1(h) + \gamma_2(h) + \gamma_3(h) + \dots \quad (5.11)$$

Interpretacija variograma zavisi od oblika dobijene krive. Na slici 77 prikazana su tri primera sfernog, eksponencijalnog i Gausovog modela.

Na prvoj slici (sl. 77a) variogramaska kriva prema pragu raste vrlo brzo, što opisuje velike razlike u vrednostima podataka na malim rastojanjima i velike vrednosti ekstremnih podataka. Na takvu karakteristiku ulaznih podataka najbolje je primeniti sferni model.

Eksponencijalni model (slika 77b) primenjuje se na grupi podataka gde vrednosti postupno rastu i opadaju, a rezultati su malih ekstrema u odnosu na rezultate u preostalom delu grupe. Tada kriva postupno raste prema pragu uz veći doseg.

Gaussov model (slika 77c) upućuje na vrlo ujednačenu grupu podataka s obzirom na razlike između njihovih vrednosti, a njihova raspodela najbliža je krivoj normalne distribucije.

#### 5.4.4. Kriging interpolacija

*Kriging* je poznat metod optimalne procene u geografskom prostoru. *Kriging* je optimalan, jer je nepristrasan i ima minimalnu varijansu. Takođe, on predstavlja geostatistički metod interpolacije prostornih podataka za slučajni prostorni proces. Mnoge karakteristike u prostoru mogu se meriti neograničen broj puta, ali je to u praksi svega nekoliko. *Kriging* je između ostalog tehnika koja je vredna i sa aspekta smanjenja varijacija između susednih tačaka kod velike gustine podataka, kao što su satelitski snimci, snimci prinosa, itd. (*Oliver et al., 2000; Oliver i Carroll 2004*).

*Kriging* rešava mnoge nedostatke matematičkih metoda interpolacije uzimajući u obzir karakter varijacije u prostoru kroz izračunavanje variograma. Ovo je jednostavan metod lokalnog težinskog usrednjavanja posmatrane vrednosti slučajno promenljive  $Z$  u okruženju vrednosti  $V$ . Razlikujemo *kriging* na tački (tačkasti kriginig) ili u bloku sa promenljivom



veličinom (blok *kriging*), zavisno od ciljeva predikcije. Ova tehnika se koristi u mnogim disciplinama kao što su rudarstvo, naftna istraživanja, meteorologija, istraživanje zemljišta, precizna poljoprivreda, zaštita životne sredine, praćenju jata riba i drugih životinjskih populacija, daljinskom snimanju (*remote sensing*), ekologiji, hidrologiji, itd. *Kriging* tehnika koja je danas poznata više kao ordinarni *kriging* (*Journal i Huijbregts 1978*) je najmoćniji i najčešće korišćen metod.

#### 5.4.5. Ordinarni kriginig

Ordinarni *kriging* se zasniva na pretpostavci da je srednja vrednost nepoznata, uzimajući u obzir da je slučajna promenljiva  $Z$  izmerena na mestima  $x_i$ ,  $i=1, \dots, N$ . Ova informacija se koristi za procenu njegove vrednosti na poziciji  $x_0$  primenom tačkastog *kriging*-a po obrascu:

$$\hat{Z}(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \quad (5.12)$$

gde su  $\lambda_i$  težine, a  $n$  obično predstavlja broj mesta podatka iz lokalnog okruženja  $V$  koji ima mnogo manju vrednost nego što je ukupan broj podataka u uzorku  $N$ . Težine  $\lambda_i$  su ubačene u jednačinu 5.12 da bi se dobila predikcija  $Z$  u tački  $x_0$ . Da bi se osigurala nepristrasnost u procenjivanju, suma težina mora biti jednaka jedinici (jed. 5.13).

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \quad (5.13)$$

a očekivana greška  $E[\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)] = 0$ . Prediktivna varijansa je:

$$\text{var}[\hat{Z}(x_0)] = E\left[\{\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)\}^2\right] = \quad (5.13)$$

$$= 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_0) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j) \quad (5.14)$$

gde je  $\gamma(x_i, x_j)$  je semivarijansa od  $Z$  između tačaka  $x_i$  i  $x_j$ ,  $\gamma(x_i, x_0)$  je semivarijansa između  $i$ -te tačke i ciljane tačke  $x_0$ . Semivarijanse su izvedene iz modela variograma, jer su eksperimentalne semivarijanse diskretne i na ograničenim rastojanjima.

*Kriging* predviđanja su često neophodna na površinama koje su veće nego što ima potrebnih podataka za blok *kriging*. Procenjena vrednost je ponderisana srednja vrednost podataka,  $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$ , na nepoznatom bloku  $B$ .



$$\hat{Z}(B) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (5.15)$$

Procenjena varijansa od  $\hat{Z}(B)$  je:

$$\begin{aligned} \text{var}[\hat{Z}(B)] &= E \left[ \{\hat{Z}(B) - Z(B)\}^2 \right] \\ &= 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{\gamma}(x_i, B) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \bar{\gamma}(x_i, x_j) - \bar{\gamma}(B, B), \end{aligned} \quad (5.16)$$

gde je  $\bar{\gamma}(x_i, B)$  srednja vrednost varijanse između tačaka  $x_i$  i posmatrani blok  $B$ , a  $\bar{\gamma}(B, B)$  je srednja vrednost semivarijanse unitar bloka  $B$ .

Jednačina 5.17 za tačke vodi do  $n+1$  broju jednačina za  $n+1$  nepoznatih:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \psi(x_0) = \gamma(x_j, x_0), \quad (5.17)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \quad (5.18)$$

gde je Lagranžov multiplikator  $\psi(x_0)$  je uvod u minimizaciju. *Kriging* varijansa (procena ili predviđanje) je dobijena kao:

$$\sigma^2(B) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{\gamma}(x_i, B) + \psi(B) - \bar{\gamma}(B, B), \quad (5.19)$$

Blok *kriging* daje blaže procene sa manjom varijansom u prostoru jer je "nugget" varijansa u potpunosti sačinjena unutar blok varijanse  $\bar{\gamma}(B, B)$  i ne doprinosi blok-*kriging* varijansi.

*Kriging* je u mnogim oblastima koje se bave prostornim problemima, između ostalih i preciznoj poljoprivredi, omiljena tehnika za interpolaciju i mapiranje. Vrednosti posmatrane osobine se obično procenjuju u čvorovima guste mreže, a varijacija se prikazuje izohipsama ili senčenjem slojeva. Varijansa *kriging*-a ili standardna greška mogu biti mapirane na sličan način i mogu se koristiti za mapiranje delova gde nije obavljeno pravilno uzorkovanje i gde treba povećati broj uzoraka da bi se dobila veća pouzdanost procenjene vrednosti.

#### 5.4.6. Upotreba dopunskih podataka za unapređenje procesa predviđanja u preciznoj poljoprivredi - kokriging

*Kokriging* geostatistički metod interpolacije omogućava uključivanje sekundarne promenljive u proces mapiranja zemljišta u cilju pouzdanijeg predviđanja primarne



promenljive za koju postoji mali broj uzoraka. Mali broj uzoraka primarne promenljive može biti posledica skupe procedure ili potencijalno opasne procedure uzorkovanja. Pretpostavka je da ako postoji određena relacija odnosa između primarne i sekundarne promenljive, tada se sekundarna za koju imamo dovoljan broj prostornih uzoraka može iskoristiti za bolje procenjivanje primarnog parametra u delovima gde je izostalo uzorkovanje. Dosadašnja praksa uzimanja malog broja uzoraka (npr. 1 uzorak po hektaru) ima svoju ekonomsku pozadinu, međutim to nema nikakve veze sa rešavanjem problema varijabilnosti u polju (Godwin i Miller, 2003). Dodatni podaci koji se mogu dobiti u velikom broju za relativno male troškove, a na raspolaganju poljoprivrednicima su: električna provodljivost ( $EC_a$ ), slike dobijene daljinskim snimanjem, podaci sa monitora prinosa, mehanički otpor zemljišta. Goovaerts (1997) je u svojim radovima opisao sve tehnike uključivanja sekundarne promenljive u ordinarni *kriging*, odnosno *kokriging* tehniku. Ova tehnika je široko prihvaćena u oblasti precizne poljoprivrede. Na primer, Dobermann i Ping (2004) su poredili težinu različitih tehnika za unapređenje mapa prinosa upotrebom informacija sa daljinski snimljenih fotografija. Ge et al. (2007) je proučavao regresioni *kriging* sa vidljivim i infracrvenim spektrom radi procene osobina zemljišta. Regresioni *kriging* su upotrebljavali Kravchenko i Robertson (2007) sa topografskim podacima i podacima o prinosu radi unapređenja procesa predviđanja ugljenika u zemljištu. Traintafilis et al. (2001) su primenili *kokriging* i podatke električne provodljivosti radi procene saliniteta zemljišta. Lesch i Corwin (2008) su kombinovali električnu provodljivost i daljinski snimljene fotografije radi boljeg predviđanja karakteristika zemljišta. Baxter i Oliver (2005) su koristeći regresioni *kriging* sa podacima o visini terena unapredili predikciju sadržaja azota u zemljištu. Kozar et al. (2002), Tarr et al (2005) i Vitharana et al. (2006) su koristeći *kokriging* za unapređenje procesa mapiranja karakteristika zemljišta kombinovali podatke električne provodnosti i informacije o terenu.

Tehnike koje su opisane u ovom poglavlju koriste prostornu autokorelaciju između uzoraka zemljišta i njihove kros korelacije (*cross correlation*) sa dopunskim podacima radi predviđanja neuzorkovanih lokaliteta. Sekundarna promenljiva treba da je u korelaciji sa primarnom, ali da ima slabu sopstvenu korelaciju kako bi se izbegla odgovarajuća kolinearnost.

#### 5.4.7. Variogram i unakrsni variogram

Eksperimentalni variogram,  $\hat{\gamma}_Z(h)$  od atributa Z (primarna varijabila) za dati vektor rastojanja h je procenjen kao:



$$\hat{\gamma}_Z(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [z(u_\alpha) - z(u_\alpha + h)]^2, \quad (5.20)$$

gde je  $N(h)$  broj parova podataka u klasi rastojanja i pravca za korišćeni vektor rastojanja  $h$ . Naredna funkcija se mora fitovati prema  $\hat{\gamma}_Z(h)$  radi dobijanja semivarijanse za bilo koju vrednost  $h$  pomoći predikcionog algoritma (Goovaerts 1999).

Zajednička varijacija između primarne i sekundarne varijabile  $Z$  i  $Y$  može se okarakterisati pomoću eksperimentalnog unakrsnog variograma kao:

$$\hat{\gamma}_{ZY}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [z(u_\alpha) - z(u_\alpha + h)][y(u_\alpha) - y(u_\alpha + h)]. \quad (5.21)$$

Da bi se izračunao unakrsni variogram moraju postojati lokacije gde su obe promenljive izmerene. Ako se obe promenljive pozitivno prostorno odnose, povećanje vrednosti  $Z$  od  $u_\alpha$  do  $u_\alpha + h$  ima tendenciju da odgovara povećanju promenljive  $Y$ . Suprotno tome, negativna korelacija između atributa će usled povećanja promenljive  $Z$  izazvati smanjenje promenljive  $Y$ . Modelovanje prostornih odnosa između promenljivih  $Z$  i  $Y$  podrazumeva odabir i fitovanje funkcije za dva variograma  $\hat{\gamma}_Z(h)$  i  $\hat{\gamma}_Y(h)$  i unakrsnog variograma za  $\hat{\gamma}_{ZY}(h)$ . Ta tri modela ne mogu biti fitovana nezavisno jedan od drugog (Goovaers 1997). Najlakši pristup je modeliranje tri variograma kao linearnu kombinaciju od istog seta osnovnog variograma u okviru uslova da su matrice graničnih vrednosti ovih modela pozitivne. Ovaj pristup je generalno poznat kao linearni mode koregionalizacije (LMC).

Jedan od načina da se uključe sekundarne promenljive kad je već LMC fitovana je upotreba višepromenljivog kriginga poznat kao kokriging. Kod najjednostavnijeg slučaja jednostruke sekundarne promenljive  $Y$ , procena ordinarnog kokriging-a je ispisana kao linearna kombinacija susednih primarnih i sekundarnih podataka:

$$z_{CK}^*(u) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha(u) z(u_\alpha) + \sum_{\alpha'}^m \lambda_{\alpha'}(u) y(u_{\alpha'}), \quad (5.22)$$

gde neke od sekundarnih podataka mogu biti izmerene na drugačijim lokalitetima  $u_{\alpha'}$ . Kao i za ordinarni kriging, cilj je minimizirati grešku varijanse u okviru nepristrasnih ograničenja koja daje sistem linearnih jednačina:

$$\begin{aligned} \sum_{\beta=1}^n \lambda_\beta(u) C_Z(u_\alpha + u_\beta) + \sum_{\beta'=1}^m \lambda_{\beta'}(u) C_{ZY}(u_\alpha + u_{\beta'}) + \mu_Z(u) \\ = C_Z(u_\alpha + u) \quad \alpha = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (5.23)$$



$$\begin{aligned} \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta}(u) C_{YZ}(u_{\alpha} + u_{\beta}) + \sum_{\beta'=1}^m \lambda_{\beta'}(u) C_Y(u_{\alpha} + u_{\beta'}) + \mu_Y(u) \\ = C_{YZ}(u_{\alpha} + u) \quad \alpha = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta}(u) = 1 \\ \sum_{\beta'=1}^m \lambda_{\beta'}(u) = 0. \end{aligned}$$

Dva Langranžova parametra  $\mu_Z(u)$  i  $\mu_Y(u)$  služe za izračunavanje graničnih vrednosti primarne i sekundarne promenljive, a informacija dobijena od LMC daje vrednosti direktne i unakrsne korelacije za različita rastojanja.

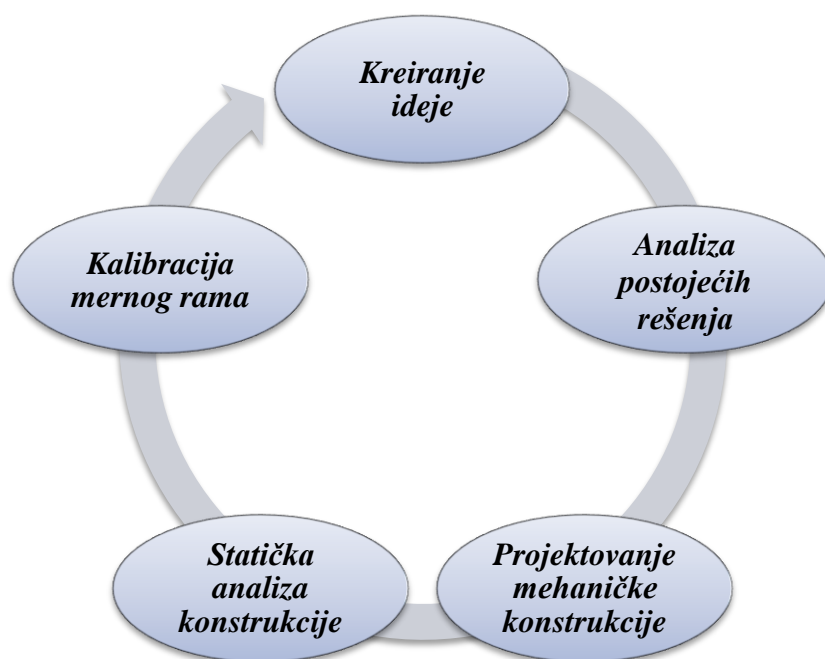
Primena *kokriging*-a sa  $N_v$  sekundarne promenljive zahteva procenu i modelovanje  $(N_v+1)$   $(N_v+2)/2$  direktnog i unakrsnog variograma. Manje zahtevan pristup u modelovanju variograma je da se koristi sekundarna informacija za procenu lokalne srednje vrednosti primarne promenljive  $Z$  (npr. primenom linearne regresije), a nakon toga uradi kriging odgovarajućih ostataka. Nasuprot pristupu koji ima *kokriging*, potreban je samo jedan procenjeni variogram bez obzira na broj sekundarnih promenljivih. Svakako, dopunske promenljive moraju biti poznate na svim lokacijama za koje su poznate vrednosti primarne promenljive. Ukoliko sekundarne promenljive nisu uzorkovane u velikom broju, to se može prevazići interpolacijom sekundarnih promenljivih za nedostajuće lokacije.



## 6. Merni ram-razvoj originalnog konstrukcionog rešenja

**J**edan značajni deo istraživačkog rada u okviru disertacije bio je usmeren ka osmišljavanju i realizaciji originalnog tehničkog rešenja konstrukcije mehaničkog rama koji predstavlja važan element u okviru celine mernog sistema. To je povod zbog čega je posebno poglavlje opredeljeno za opisivanje toka razvoja konstrukcije, od ideje do konkretnog rešenja i na kraju testiranja konstrukcije i validacije podataka.

Razvoj sistema za merenje otpora vuče mašina za obradu zemljišta je kompleksan proces koji uključuje više odvojenih faza razvoja s obzirom na to da je svaki sistem celina koja se sastoji od povezanih elemenata u funkciji realizacije namene. Proces projektovanja mernog rama sastojao se od više etapa (sl. 78).



Sl. 78. Strukturna šema razvojnog procesa mernog rama





## 6.1. Kreiranje ideje

Prva faza u projektovanju je oblikovanje ideje u neki od manje ili više složeni sklop geometrijskih oblika, koji treba da omoguće željenu funkcionalnost mernog rama. Ideja je bila da se konstruiše mehanički merni uređaj kojim bi se rešio problem merenja mehaničkog otpora obrade zemljišta za različite poljoprivredne priključne mašine tokom obavljanja same operacije, kontinualno u vremenu i realno u prostoru. Uređaj je zamišljen da se realizuje kao merni ram koji se priključuje za zadnji hidraulični podizač traktora u piramidalnoj vezi, a da se na njega istovremeno mogu priključivati radne mašine. Time bi se ostvarila veza između traktora i radne mašine posredno, preko mehaničkog uređaja, čija je funkcija merenje reakcije otpora obrade u ravni kretanja agregata za obradu zemljišta. Svojim uređajem za priključivanje, mehanički ram treba da bude prilagodljiv svim nošenim, polunošenim i vučenim mašinama II i III kategorije kao i svim traktorima II i III kategorije.

## 6.2. Analiza postojećih rešenja

Analizom postojećih rešenja za merenje otpora zemljišta (obrađeno u glavi 4) dobijene su smernice ka konačnoj koncepciji mehaničke konstrukcije mernog rama. Pregledom dosadašnjih izvedbi mernih ramova, može se konstatovati da svaka konstrukcija predstavlja originalno rešenje, sa manje ili više senzora i elemenata konstrukcije. Generalno, koncepcije ramova mogu se klasifikovati na one koje su namenjene merenju komponente otpora vuče u svim ravnima (*Palmer, 1991; Papathanassiou et al., 2002; Kheiralla et al., 2003*) i one kod kojih se merenje obavlja samo u horizontalnoj ravni (*Askari et al., 2011*). Takođe, mogu se klasifikovati na ramove kod kojih se sila registruje pomoću standardnih mernih ćelija (*Palmer, 1991; Papathanassiou et al., 2002; Askari et al., 2011; Kheiralla et al. 2003*) ili mernim trakama koje su postavljene na specijalno izrađenim elementima konstrukcije (*Kheiralla et al., 2003; Al-Jalil 2001; Alimardani et al., 2008; Pijuan et al., 2012*). Rešenja ramske konstrukcije su u najvećem broju slučajeva izvedena kao "II", "U" ili "T" ramovi. Većina autora pri konstruisanju je dala prioritet na minimiziranje uzdužnog gabarita i težine, kako bi smanjili uticaj rama na dinamiku agregata. Posebnu pažnju su posvetili univerzalnosti ili prilagodljivosti konstrukcije sa aspekta mogućnosti priključivanja više kategorija radnih mašina. Ipak, može se reći da su sva rešenja uspešno realizovana što potvrđuju poljska i laboratorijska testiranja u različitim uslovima. Predstavljena rešenja sistema, sa izuzetkom



van Bergeik et al (2001), namenjena su za određivanje energetske potrebe različitih mašina za obradu različitih tipova zemljišta, merenjem ukupnog i specifičnog otpora. Ti parametri korišćeni su za ocenu prosečnih performanse oruđa ili ukupnog stanja zemljišta.

Došlo se do zaključka da za potrebe merenja otpora po principima precizne poljoprivrede treba dati prioritet većoj tačnosti merenja. Tačnosti merenja doprinosi metod merenja sile i sama konstrukcija na kojoj se nalaze merni davači sile. Metod merenja otpora zemljišta podrazumeva upotrebu akvizicione opreme koja omogućava visokofrekventna merenja u realnom vremenu. Tačnost merenja povećava se upotrebom standardnih mernih ćelija umesto mernih traka i to iz više razloga:

- merne ćelije imaju kvalitetniju linearnu karakteristiku izlaznog signala u funkciji promene opterećenja, jer su konstruisane od specijalnog čelika koji ima linearnu dilatacionu karakteristiku, što nije slučaj kod mernih traka koje se postavljaju na gotovu konstrukciju koja ima nepoznate dilatacione karakteristike,
- ambijentalni uslovi ne utiču na tačnost merenja mernih ćelija zbog temperaturne kompenzacije koju poseduju,
- jednako kvalitetno mere pozitivna i negativna opterećenja,
- nema uticaja parazitskih opterećenja, jer su tako koncipirani da registruju samo opterećenja u jednom pravcu,
- kalibracija u referentnim laboratorijama (viša klasa tačnosti) i
- univerzalna primena-prenosivost.

Negativna osobina mernih ćelija su njihove dimenzije koje nisu zanemarljive kada su u pitanju merne ćelije većeg mernog dometa. Shodno tome, nužno proističe potreba za dodatnim prostorom na mernoj konstrukciji, koji dodatno povećava ukupne gabarite.

Merna konstrukcija sa aspekta tačnosti merenja treba da omogući potpuno prenošenje opterećenja na merna mesta bez disipacije na elemente konstrukcije.

Konstrukciono posmatrano, veoma je značajan segment univerzalnosti primene mernog uređaja, u konkretnom slučaju u sadejstvu sa standardnim mašinama za obradu. To podrazumeva mogućnost lakog prilagođavanja i priključivanja mašina jedne ili više kategorija.

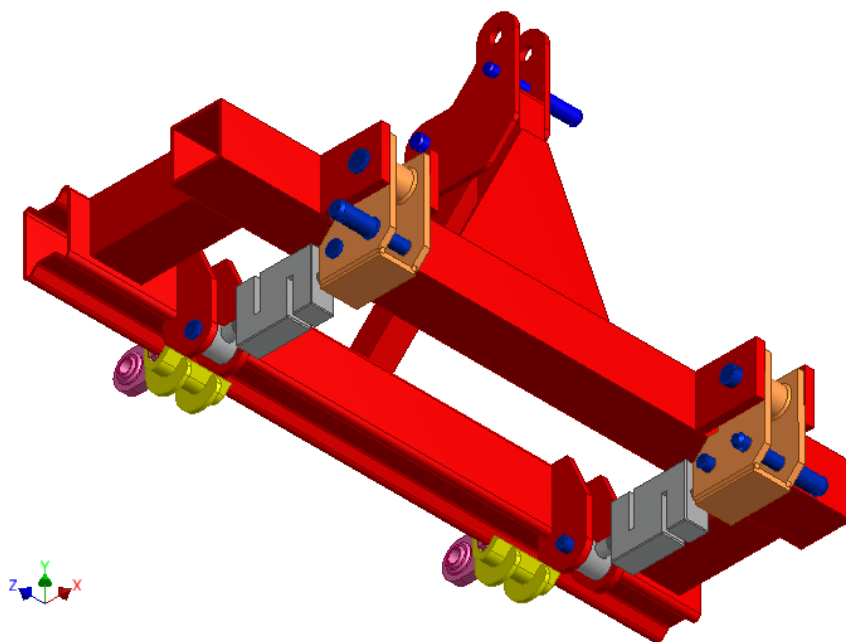
Ono što je zajedničko kod prikazanih rešenja je nemogućnost ekscentričnog priključivanja radnih mašina pri određivanju položaja ekscentrične vuče. Ekscentrična vuča nastaje kao posledica lošeg položaja priključne mašine u odnosu na traktor, odnosno ukoliko se linija



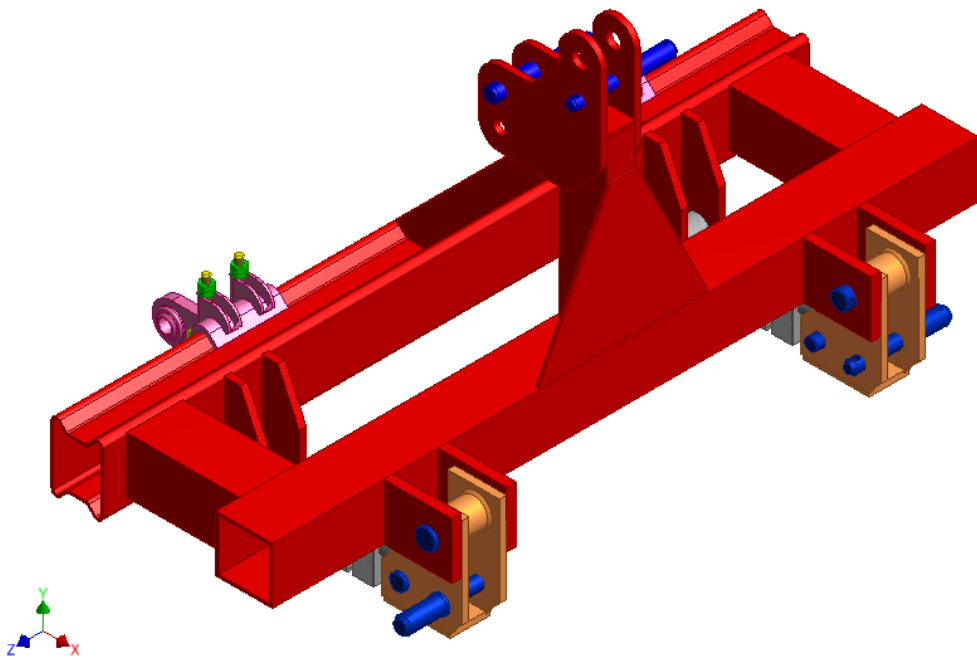
vuče traktora i linija otpora oruđa ne poklapaju, nego su međusobno paralelne (Simikić *et al.*, 2010). Najčešći slučaj pojave ekscentrične vuče u praksi je kod traktorskog agregata za oranje, i to u uslovima dubokog oranja na teškim zemljištima, gde se javlja veliki otpor zemljišta po širini radnog zahvata. Na osnovu poznavanja uticaja ekscentrične vuče i optimalnim agregatiranjem, moguće je maksimirati potencijalna vučna svojstva traktora i time povećati njegovu energetska efikasnost.

### 6.3. Projektovanje mehaničke konstrukcije

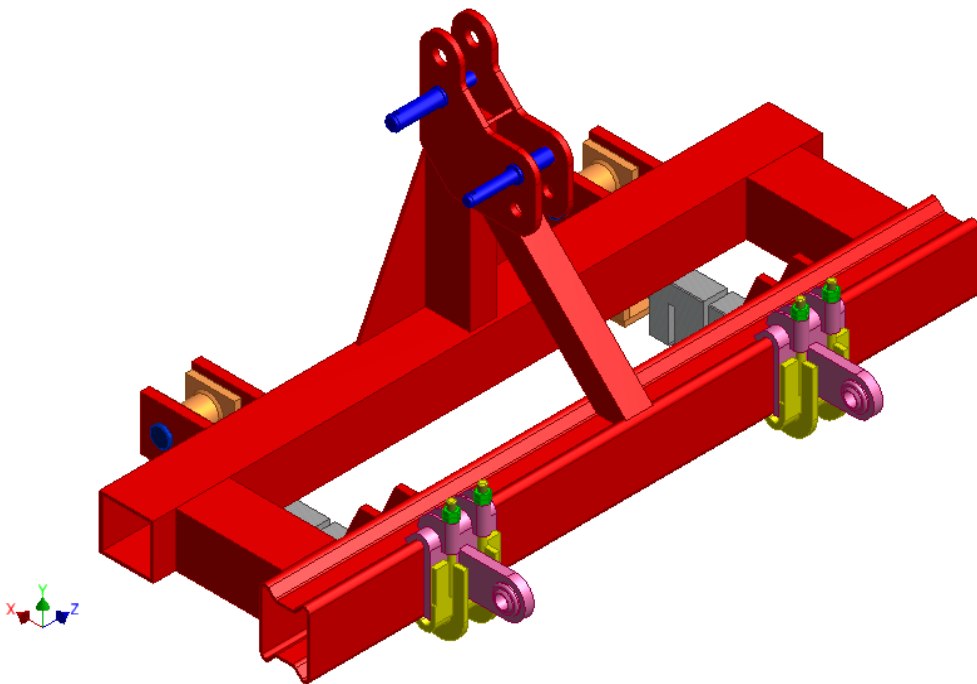
Nakon analize postojećih rešenja, napravljen je izbor standardnih elemenata iz kataloga proizvođača i pristupljeno je izradi 3D modela svakog od sastavnih elemenata. Posle izrade elementi su sastavljeni u sklopove, a zatim su sklopovi postavljeni u radni prostor softvera i započela je izrada 3D modela mernog rama. Ramska konstrukcija je tako formirana, da omogući postavljanje svakog od elemenata, bez poteškoća, a da pri radu podnosi projektovana opterećenja (sl. 79).



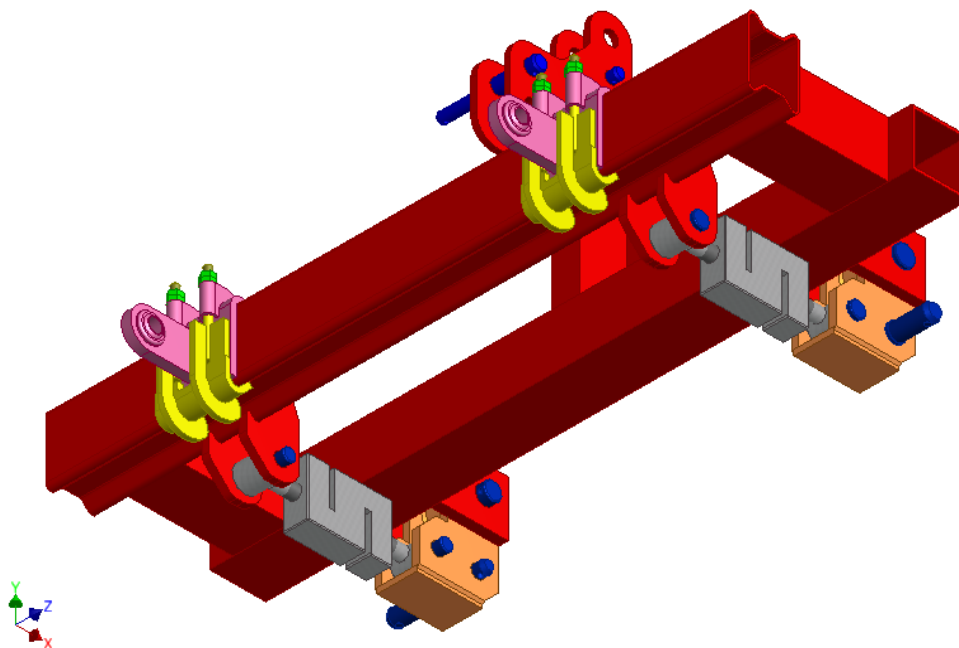
a)



b)



c)



d)

Sl. 79. Aksonometrijski prikaz modela konstrukcije rama:

a - prednja strana od dole; b - prednja strana od gore; c - zadnja strana od gore; d - zadnja strana od dole

#### 6.4. Tehnički problem koji se rešava primenom univerzalnog rama

Realizovano originalno rešenje mehaničke konstrukcije rešava problem merenja mehaničkog otpora obrade zemljišta (otpora vuče) različitim poljoprivrednim priključnim mašinama pri izvođenju same operacije. Konfiguracija i dimenzije uređaja omogućavaju merenje mehaničkog otpora za sve nošene, polunošene i vučene mašine (bez obzira na način priključivanja za traktor) II i III kategorije kao i sa svim traktorima II i III kategorije prema standardu (ISO 730-1:1994) (R2007). Takođe, uređaj ne zahteva dodatne mere prilagođavanja (ukrućivanja, uključivanja, isključivanja, itd.) kod podizanja i spuštanja priključne mašine iz radnog u transportni položaj i obrnuto što je veoma važno, jer na taj način procedura merenja ne zahteva dodatno angažovano vreme u odnosu na vreme koje se utroši tokom normalne obrade zemljišta. Uređaj ne remeti kvalitet rada mašine za obradu niti učinak traktorskog agregata. Konstrukcijski je omogućeno ekscentrično priključivanje priključnih mašina u odnosu na simetralu traktora, odnosno simuliranje ekscentričnog opterećenja za potrebe



određivanja vučnih karakteristika traktora (Simikić et al., 2012). Sva podešavanja priključne mašine u potpunosti zadržavaju svoju funkciju kada se mašina prikopča za ram. Praktično, sa ovim uređajem nema nikakvih smetnji u normalnoj operaciji obrade zemljišta.

## 6.5. Izlaganje suštine tehničkog rešenja

Univerzalni ram za merenje mehaničkog otpora obrade zemljišta različitim priključnim mašinama za obradu predstavlja uređaj-ram koji se priključuje u tri priključne tačke za zadnji hidraulični podizač traktora, dok se radna mašina sa suprotne strane priključuje za ram u priključnim tačkama za priključivanje koje se nalaze na ramu. Univerzalni ram čini mehanički i merni deo. Mehanički deo predstavlja ramska konstrukcija sa dve piramide za priključivanje rama na traktor i priključne mašine na ram. Donja mesta za priključivanje rama za traktor nalaze se na obrtnim konzolama (dve) koje su vezane za ram pomoću dve obrtne osovinice. Osovinice omogućavaju rotaciono kretanje konzola u vertikalnoj ravni, dok druge dve osovinice na konzoli predstavljaju vezu za zadnju gredu rama preko mernih ćelija (dve). Konstrukcija konzole je takva da su osovinice koje povezuju konzole sa mernim ćelijama (ramom) i osovinice koje se spajaju sa donjim traktorskim podiznim polugama, u istoj horizontalnoj ravni. Time se praktično sva sila otpora (vuče), koja se javi u pravcu kretanja traktora na priključnim osovinicama kojima se traktor priključuje za ram (konzole), u potpunosti prenosi (bez razlaganja sila) na merne ćelije, tj. izmerena vrednost sile na mernim ćelijama je i stvarna vrednost otpora (vuče). Veza konzola za ram zajedno sa vezom konzola sa mernim ćelijama, ukružuje konzole, čime je omogućeno nesmetano podizanje nošenih i polunošenih mašina uz istovremeno merenje sile na mernim ćelijama tokom rada. Priključci za priključivanje na ramu (traktora za ram i priključne mašine za ram) su konstrukciono tako rešene da daju mogućnost rada sa svim traktorima i priključnim mašinama II i III kategorije. Donji priključci za priključivanje mašine za merni ram su poprečno pomerljivi tj. prilagodljivi konfiguracijama priključnih mašina II i III kategorije. Donji priključci na ramu za priključivanje rama za traktor nalaze se na obrtnim konzolama koje se povezuju sa traktorskim polugama pomoću klinova (dva) promenljivog poprečnog preseka. Uži presek je predviđen za priključivanje traktora II kategorije, a širi za priključivanje traktora III kategorije. Merni deo čine robusni senzori sile "S" tipa za merenje opterećenja u donjim tačkama priključivanja rama za traktor i torusni dinamometar u gornjoj upornoj traktorskoj poluzi.



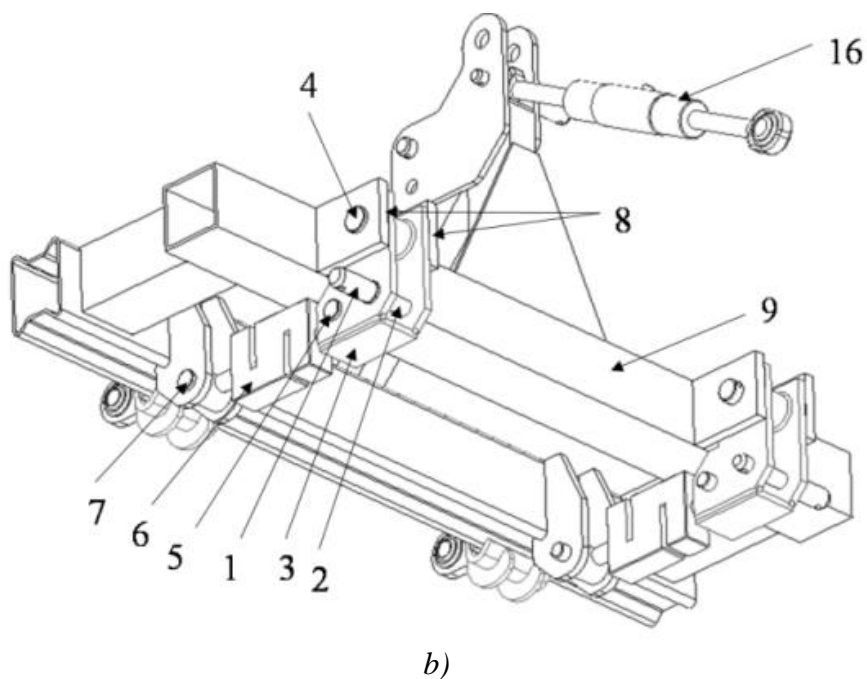
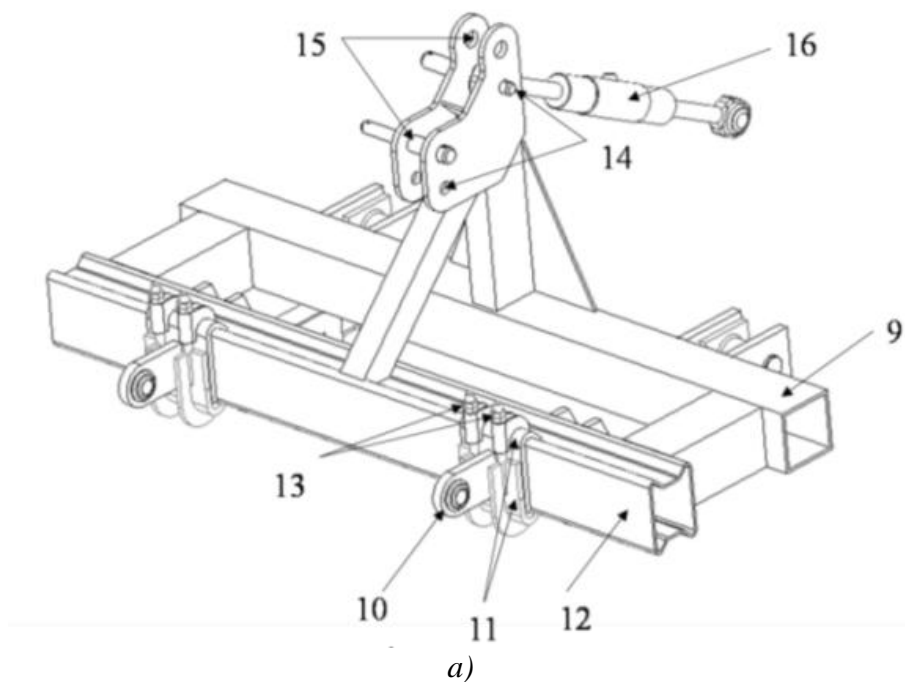
## 6.6. Detaljan opis modela

Detaljan prikaz modela mehaničke konstrukcije mernog uređaja data je na slici 79. Uređaj je namenjen merenju otpora vuče pri radu sa nošenim, polunošenim i vučenim mašinama za obradu. Bočne sile se ne mere jer su one mogu zanemariti u normalnim uslovima odnosno kada je priključna mašina pravilno podešena (*Leonard 1980; Simikić et al., 2012*). Prema gore pomenutoj klasifikaciji, uređaj pripada kategoriji ramova sa ugrađenim mernim ćelijama, koji predstavlja posrednu vezu između traktora i mašine. Ram je dizajniran u programskom paketu *AutoDesk Inventor 2012*. Uzdužna pomenost priključne mašine u nazad zbog posredne veze sa traktorom iznosi 692 mm. Masa rama zajedno sa mernim elementima iznosi 125 kg. Vertikalni ekscentricitet prednjih donjih u odnosu na zadnje donje tačke za priključivanje je 116 mm. Konstrukcija rama omogućava priključivanje na traktore i priključne mašine II i III kategorije saglasno *ASAE S217.12 DEC2001 (ISO 730-1:1994)*. Uređaj čini kruti ram sa prednjim i zadnjim uređajem za priključivanje kategorije II i III. Donje tačke za priključivanje rama za traktor 1, 2 su klinovi sa promenljivim poprečnim presekom. Spoljnji, širi deo 1 predviđen je za priključivanje na traktore III kategorije. Unutrašnji, uži deo 2 predviđen je za priključivanje traktora II kategorije. Klinovi su fiksirani na obrtnim konzolama 3. Veza obrtnih konzola 3 sa krutom konstrukcijom rama je direktno preko osovinica 4, odnosno indirektno preko osovinica 5 tj. mernih ćelija 6 i osovinica 7. Klinovi 4 i 5 eliminišu slobodu kretanja konzole u vertikalnoj ravni, dok bočne ploče 8 koje su zavarene za prednju četvrtastu gredu 9, onemogućavaju poprečno pomeranje. Potpunim ukrućivanjem donjih veza za priključivanje rama na traktor omogućeno je nesmetano podizanje mašine i rama bez potrebe za dopunskim merama fiksiranja. Istovremeno je omogućeno merenje ukupne horizontalne komponente sile vuče. Sa slike 80 (poprečni presek, pogled A-A) se može zaključiti da tačke veze rama za traktor 1 i 2 leže u istoj horizontalnoj ravni kao i klinovi 5 i 7, a time i osa simetrije mernih ćelija 6. Prethodno opisana kinematska veza omogućava prenošenje ukupne horizontalne sile vuče koja deluje u tačkama veze 1 ili 2 na mernu ćeliju 6, što implicira da je detektovana sila na mernim ćelijama 6 jednaka stvarnoj vrednosti sile otpora vuče.

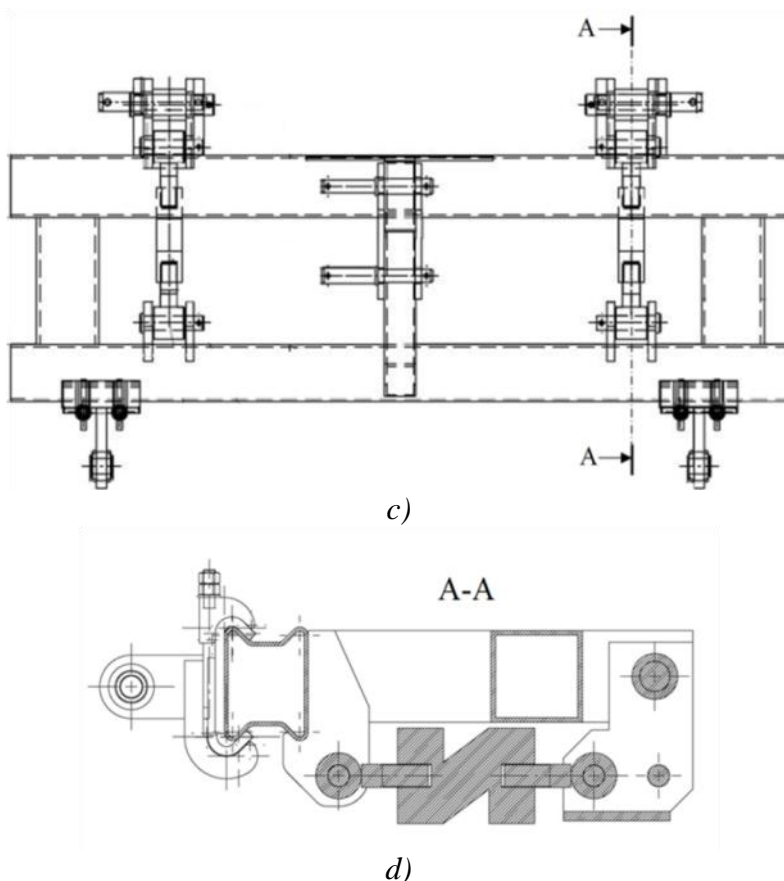
Donje veze za priključivanje mašine za ram 10 su izvedene u obliku krajeva podiznih poluga traktora, sa sfernim zglobovima odgovarajućeg prečnika otvora. Predviđena su dva seta zadnjih donjih poluga i to za priključivanje mašina II i III kategorije. One se nalaze na rastavljivim nosačima-kandžama 11. Nosači su pričvršćeni na profilnoj gredi 12 po kojoj se mogu pomerati poprečno i prema potrebi menjati kao bi se prilagodile konfiguraciji



priključnih mašina II i III kategorije. Fiksiranje nosača 11 obavlja se zatezanjem navrtki 13. Gornje tačke veze mašine sa ramom i rama sa traktorom, izvedene su sa po dva otvora, za kategoriju II veza 14, za kategoriju III veza 15, a prečnici su usaglašeni sa standardom *ASAE S217.12 (DEC2001)*. Gornja (top-link) poluga za povezivanje traktora sa ramom je standardni dinamometar 16 koji meri opterećenje u gornjoj tački priključivanja. Dužina top link poluge-dinamometra može se kontinualno menjati pomoću navojnog vretena.







Sl. 80. Opis sastavnih delova ramske konstrukcije:

1, 2 - donje tačke za priključivanje rama za traktor; 3 - konzola; 4, 5, 7 - klinovi; 6 - merna ćelija; 8 - bočna ploča; 9 - kvadratna greda; 10 - donje tačke za priključivanje rama za mašinu; 11 - rastavljivi nosač; 12 - profilna greda; 13 - navrtke; 14 - gornja tačka veze za kat. II; 15 - gornja tačka veze za kat. III; 16 - merna ćelija gornje uporne poluge

Ram se zajedno sa priključnom mašinom podiže, spušta i transportuje bez dopunskih mera fiksiranja ili zaštite davača sile od preopterećenja koja su moguća pri transportu teških nošenih mašina (Palmer 1992). Ovakva konstrukcija rama omogućava centrično i ekscentrično priključivanje (ako je to potrebno), ne remeti rad priključne mašine kako po pitanju učinka tako i kvaliteta rada.

## 6.7. Statička analiza konstrukcije

Naredni postupak u razvoju proizvoda je testiranje njegove funkcionalnosti, izdržljivosti, trajnosti itd. To je kod ranijih metoda zahtevalo angažovanje vremena i sredstava za pravljenje i ispitivanje prototipova. Primena računara i numeričkih metoda približnog



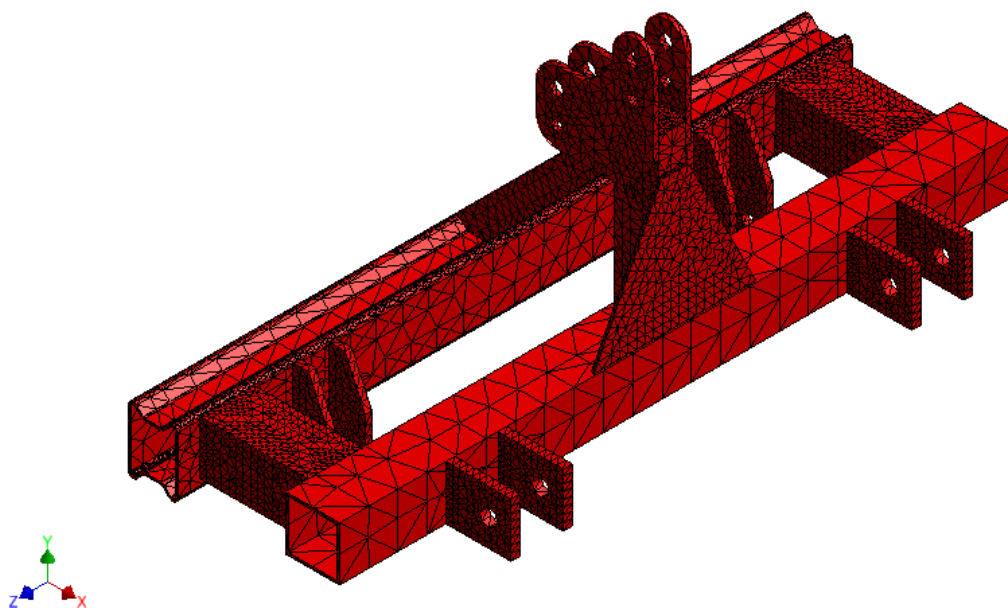
rešavanja parcijalnih diferencijalnih jednačina, omogućena je analiza različitih fizičkih polja, što u osnovi predstavljaju problemi napona, provođenja toplote, magnetizma u svakodnevnoj inženjerskoj praksi (Chaskalovic, 2008). Formiranje "virtuelnog" modela proizvoda, pružilo je mogućnost da se na njemu simuliraju i procesi opterećenja, zamora materijala i sl. te da se veliki deo razvoja u smislu varijacije konstrukcije proizvoda obavi na računaru. Na taj način se od više varijanti proizvoda, broj realnih prototipova na kojima će biti izvršena eksploatacijska ispitivanja smanji na dva tri ili čak samo jedan.

Kada je završeno formiranje rama, potrebno je bilo uraditi statičku analizu, kako bi se utvrdilo da li postoje eventualna kritična mesta u konstrukciji koja ne bi izdržala naprezanja tokom redovne operacije obrade zemljišta za mašine kategorije II i III. Statička analiza je takođe obavljena kako bi se izvršila provera deformacije rama, odnosno provera njegovog najvećeg ugiba metodom konačnih elemenata u softverskog paketu *Autodesk Inventor 2012*. Metod konačnih elemenata je metod diskretne analize i zasniva se na fizičkoj diskretizaciji razmatranog domena. Umesto elemenata diferencijalno malih dimenzija, osnovu za sva razmatranja predstavlja deo domena konačnih dimenzija, poddomen ili konačni element. Suština aproksimacije kontinuuma metodom konačnih elemenata je da se razmatrani domen, pomoću zamišljenih linija ili površi, deli na određeni broj poddomena konačnih dimenzija. Pojedini poddomeni se nazivaju konačni elementi, a njihov skup za ceo domen je mreža konačnih elemenata. Pretpostavlja se da su konačni elementi povezani međusobno u konačnom broju tačaka, koje se usvajaju na konturi elementa i one se nazivaju čvorovi.

Da bi se analiza izvela, potrebno je prethodno izvesti određene korake između kojih je i proces umrežavanja modela. Prilikom umrežavanja modela teži se da broj elemenata bude optimalan. Mali broj elemenata dovodi do grešaka u analizi, a prevelik broj elemenata zahteva usložnjava postupak analize i zahteva računare sa snažnijom konfiguracijom. Iz tog razloga je analiza univerzalnog rama urađena na osnovnom ramu, bez elemenata veze i pokretnih elemenata koji povećavaju broj konačnih elemenata i otežavaju proces analize (sl. 81). S obzirom da će se vršiti statička analiza rama, potrebno je opredeliti statičku silu kojom će biti simulirano opterećenje rama. Za razliku od simuliranog opterećenja (statično), opterećenja koja se javljaju tokom obrade zemljišta su veoma dinamične prirode, te je zbog toga usvojena sila statičkog opterećenja znatno veća od realne za predviđene kategorije mašina. Predviđena opterećenja predstavljena su vektorima na onim mestima gde ram prima opterećenja od priključne mašine i traktora (sl. 82). Sva zadata opterećenja (vektori sila) su istog intenziteta od 15 kN.

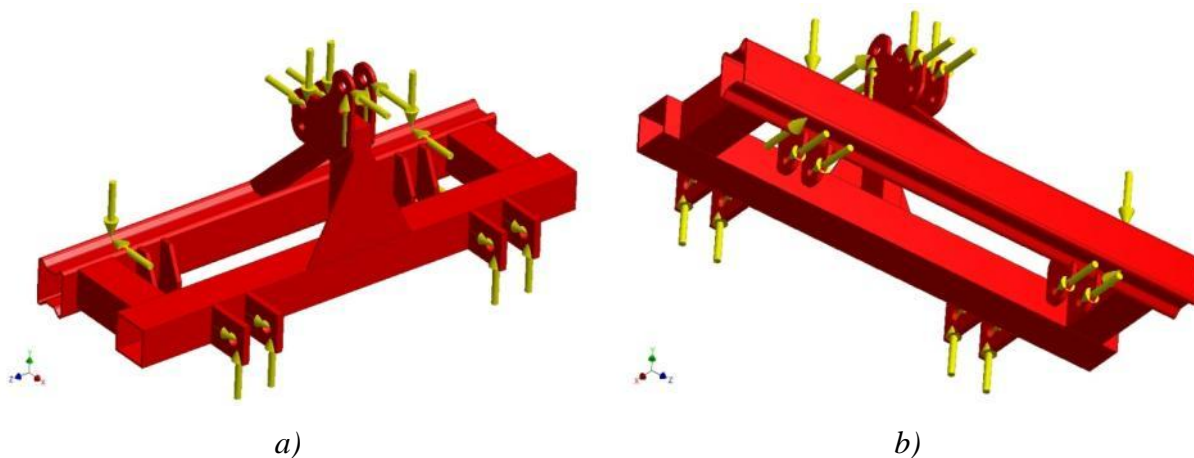


Nodes:68654  
Elements:34608



Sl. 81. Mreža konačnih elemenata na osnovnom ramu

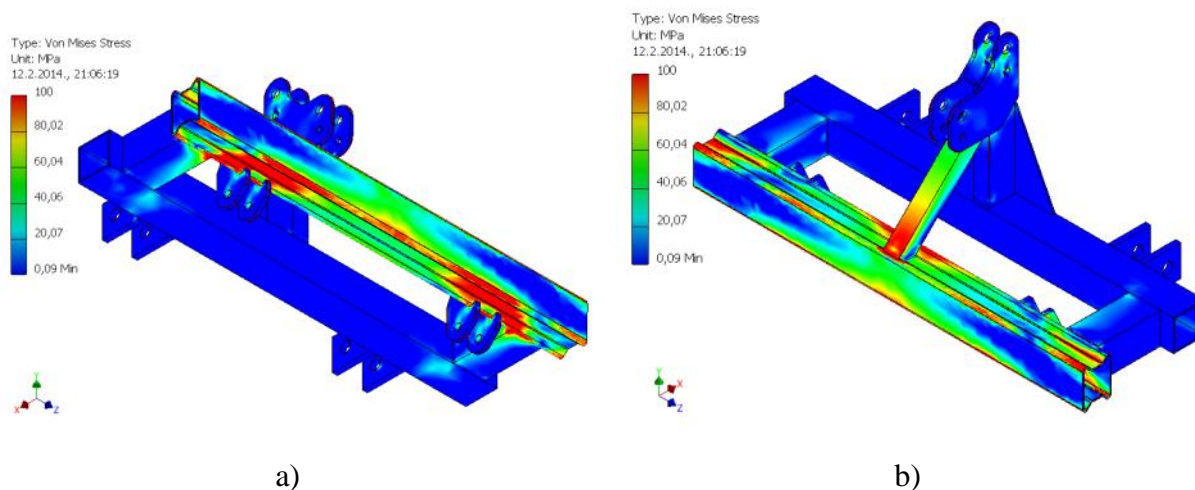
Opterećenja se javljaju na mestima veze rama sa mašinom i rama sa traktorom. Pošto su uklonjeni rastavljivi elementi (klinovi, kulise, merne ćelije i zadnje šape) radi jednostavnije analize, sile su nanete na mestima gde su isti povezani za osnovni ram jer praktično predstavljaju elemente veze ili elemente prenosa opterećenja na osnovni ram. Posle definisanih opterećenja, potrebno je definisati stepene slobode kretanja osnovnog rama, što je urađeno na prednjim uškama i gornjoj tački kopčanja za traktor na ramu.



Sl. 82. Prikaz simuliranih opterećenja na osnovnom ramu



Nakon definisanih spoljašnjih ograničenja, bilo je potrebno izvršiti umrežavanje modela. Posle dobijene mreže konačnih elemenata, ostaje da se izvrši još sam proces analize. Po završetku analize dobijaju se rezultati simulacije u vidu modela sa označenim površinama asociranim različitim bojama koje predstavljaju veličinu posmatranog parametra (sl. 83).



Sl. 83. Naponi na konstrukciji osnovnog rama:

*a - pogled sa zanje strane od dole; b - pogled sa zanje strane od gore*

Na osnovu prikaza rezultata simulacije i uvida u granične vrednosti napona za materijal (Č.0361) koji je predviđen za izradu rama, može se konstatovati da su naponi u konstrukciji u granicama dozvoljenih. Najveće vrednosti napona se javljaju na profilnoj gredi, gde se nalaze mesta za priključivanje mašine za ram. Deformacije nastale usled dejstva opterećenja su manje od jednog milimetra, što nikako ne može ugroziti radnu sposobnost bilo kog od elemenata.

## 6.8. Statička kalibracija mernog rama

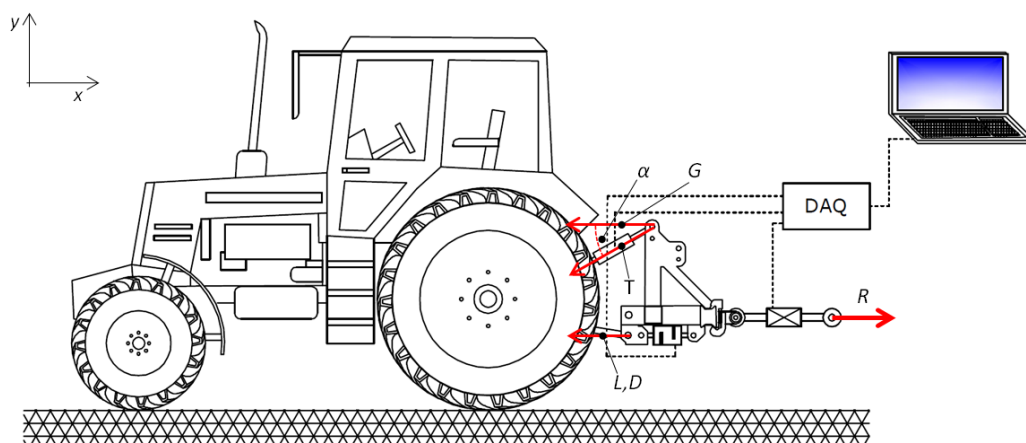
Svakako, pre kalibracije mernog rama, urađena je provera mernih ćelija u referentnoj laboratoriji po standardnoj proceduri.

Kalibracija je neophodna radi određivanja karakteristika, odnosno tačnosti mernih ćelija. Merne ćelije su elementi posebnog oblika, napravljene od specijalne vrste čelika poznatih mehaničkih karakteristika. U sebi imaju ugrađene elektrootporne merne trake koje linearno menjaju unutrašnju otpornost sa deformacijom materijala na kome se nalaze. Postupak kalibracije mernih ćelija podrazumeva u prvom koraku definisanje linearne zavisnosti između vrednosti stvarne sile izmerene referentnim davačem, sa izlaznim vrednostima napona koje



daje merna ćelija za istovetno opterećenje. U drugom koraku se koristi dobijena zavisnost za prevođenje napona sa merne ćelije u izmerenu vrednost sile u potupku merenja. Kalibracija mernih ćelija obavljena je u referentnoj laboratoriji saglasno standardu *ISO376*.

Kalibracija mernog rama obavljena je u stacionarnim uslovima, po sličnoj proceduri kao i merne ćelije. Simulirano je horizontalno opterećenje rama pomoću navojnog vretena. Kako bi se utvrdila zavisnost izmerenih vrednosti sile očitane sa mernih ćelija na ramu i vrednosti sa referentnog dinamometra visoke tačnosti, signali su paralelno zapisivani na PC (sl. 84).



Sl. 84. Šematski prikaz postupka kalibracije mernog rama

Ukupna vrednost otpora vuče dobijena je iz prvog uslova statike za ravnotežu ravanskog sistema, po kojem je suma svih sila koje deluju na ram u ravni podloge ( $x$ -osa) jednaka nuli (jed. 6.1).

$$\sum_{i=1}^n Fx_i = 0$$

$$L + D + T \cdot \cos \alpha - R = 0 \quad (6.1)$$

$$T \cdot \cos \alpha = G$$

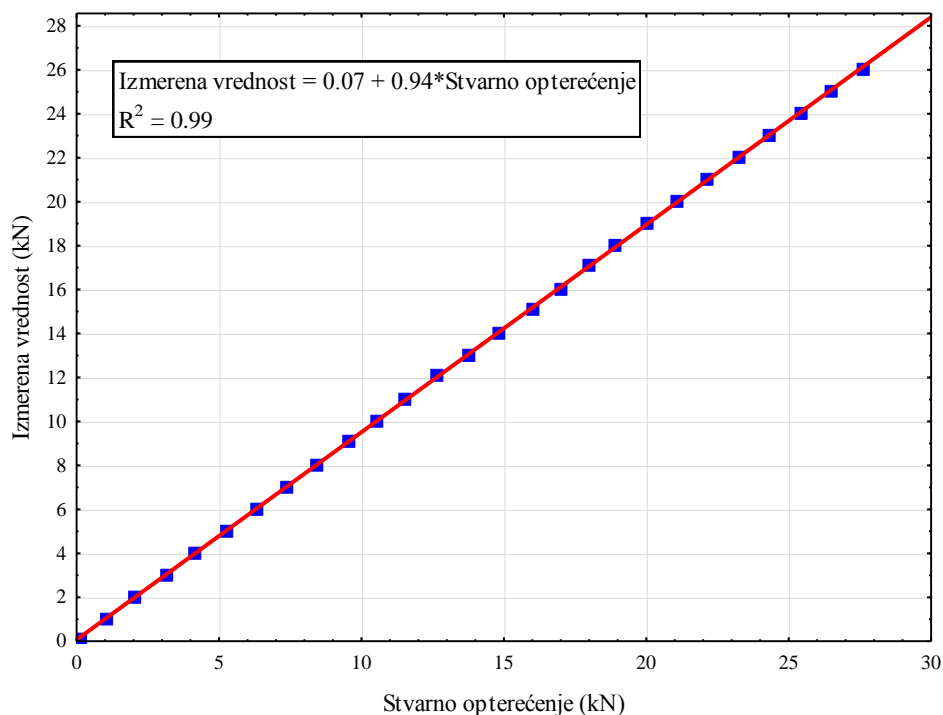
$$L + D + G = R(N, kN)$$

gde  $Fx_i$  predstavlja sva opterećenja projektovana na  $x$  osu,  $L$  je opterećenje izmereno u levoj mernoj ćeliji,  $D$  je opterećenje izmereno u desnoj mernoj ćeliji,  $T$  je opterećenje u gornjoj poluzi,  $G$  je opterećenje u gornjoj poluzi projektovano na ravan podloge. Merna jedinica za sva opterećenja je kN.

Horizontalno opterećenje u donjim priključnim vezama traktora za ram se dobija algebarskim sabiranjem, dok se vrednost sile u gornjoj upornoj poluzi traktora koriguje za



vrednost nagibnog ugla u odnosu na ravan podloge. Vrednosti sile izmerene na mernim ćelijama rama algebarski su sabrane i upoređene sa vrednostima referentnog davača. Koeficijent determinacije  $R^2$  za linearnu funkciju je 0,99, što ukazuje na direktnu linearnu vezu vrednosti izmerenih pomoću mernog rama i stvarnog opterećenja (sl. 85). Ovakva karakteristika govori da je horizontalno opterećenje koje se javi mernom ramu tokom merenja u potpunosti izmereno.



Sl. 85. Kalibraciona karakteristika mernog rama

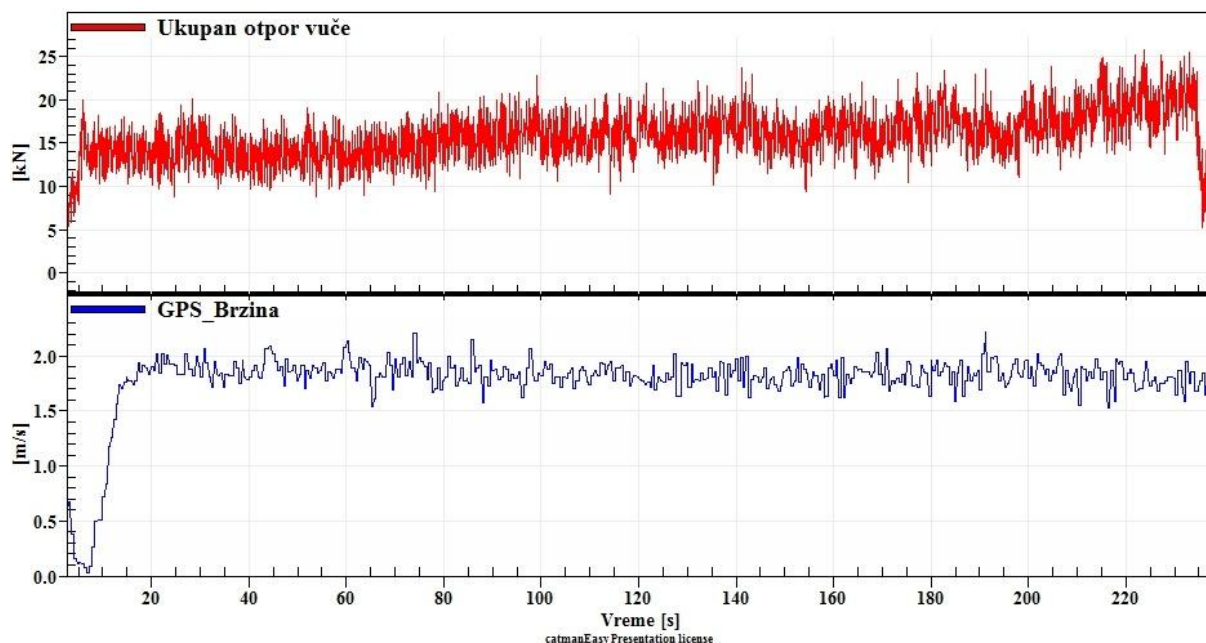


## 7. Rezultati istraživanja

### 7.1. Rezultati poljskog testiranja mernog sistema (TEST 1)

**P**reliminarno ispitivanje mernog sistema obavljeno je u realnim zemljišnim uslovima. Za obradu zemljišta korišćen je konvencionalni trobrazni raoni plug u agregatu sa traktorom MTZ 820 neto snage motora 61 kW (tab. 7). Svrha testa bila je provera pouzdanosti podataka dobijenih tokom merenja i razrada metodologije merenja otpora vuče sa aspekta optimalne frekvencije prikupljanja podataka sa dinamometara. Merenje je obavljeno u 19 prohoda na istoj parceli na dva predtretmana (A i B).

Rezultati otpora vuče ( $R$ ) prikazani su u tabeli 11. u obliku srednja vrednost  $\pm$  standardno odstupanje (Sr. vred.  $\pm$  St. dev.), koeficijent varijacije (CV) i minimalne (maksimalne) postignute vrednosti. Najniža prosečna vrednost otpora od 17,59 kN ostvarena je u 16. prohodu, dok je najviša dostignuta u 8. prohodu i iznosi 19,94 kN. Najniža prosečna brzina (1,75 m/s) je ostvarena u 9. prohodu, dok je najviša (1,86 m/s) bila u 17. prohodu. Među prosečnim vrednostima otpora i brzine u svim prohodima primetna je značajna bliskost. Standardno odstupanje je najveće u 1. prohodu (3,31 kN), dok u ostalim prohodima postoji značajna bliskost po ovom parametru i vrednosti se kreću od 1,58 kN u 16. do 2,38 kN u 15. prohodu. U slučaju brzine dobijena je još veća stabilnost među srednjim vrednostima i standardnim odstupanjima po prohodima. Ipak, velike razlike među minimalnim i maksimalnim vrednostima sile po prohodima ukazuju na značajne promene u amplitudi sile tokom vremena što dobro ilustruje i grafik na slici 86.



Sl. 86. Postprocesni grafik signala otpora vuče i GPS brzine za period jednog prohoda

Tab. 11. Statistička analiza otpora vuče i brzine traktora (polje A)

Prohod	Otpor vuče, $R$ (kN)				GPS brzina, $v$ (m/s)			
	Sr. vred.±St. dev.	Min	Max	CV	Sr. vred.±St. dev.	Min	Max	CV
1.	17,35±3,30 <sup>a</sup>	6,40	28,35	19,04	1,81±0,094	1,51	2,12	5,18
2.	18,46±1,82 <sup>de</sup>	11,98	25,35	9,901	1,76±0,077	1,54	1,99	4,33
3.	18,54±1,90 <sup>ef</sup>	11,79	25,57	10,24	1,78±0,093	1,51	2,13	5,19
4.	18,96±1,80 <sup>g</sup>	12,43	26,36	9,50	1,78±0,087	1,52	2,03	4,87
5.	19,47±2,15 <sup>j</sup>	10,13	27,84	11,07	1,79±0,094	1,55	2,12	5,21
6.	18,58±1,67 <sup>f</sup>	12,45	26,28	9,01	1,81±0,079	1,60	2,06	4,35
7.	17,89±1,73 <sup>c</sup>	12,42	25,33	9,69	1,79±0,083	1,50	2,08	4,63
8.	19,93±1,95 <sup>k</sup>	12,81	28,57	9,82	1,77±0,097	1,37	2,02	5,44
9.	19,38±2,01 <sup>i</sup>	12,65	26,66	10,38	1,75±0,079	1,53	1,97	4,48
10.	18,61±2,06 <sup>f</sup>	11,04	28,10	11,09	1,85±0,089	1,58	2,13	4,80
11.	19,03±1,93 <sup>gh</sup>	11,13	26,56	10,18	1,80±0,093	1,45	2,05	5,16
12.	19,12±1,82 <sup>h</sup>	11,48	25,86	9,53	1,80±0,081	1,56	2,13	4,45
13.	19,43±1,87 <sup>ij</sup>	12,82	26,49	9,63	1,82±0,085	1,52	2,04	4,64
14.	19,88±1,74 <sup>k</sup>	12,96	26,25	8,75	1,80±0,088	1,50	2,13	4,85
15.	19,12±2,38 <sup>h</sup>	11,57	28,35	12,45	1,79±0,102	1,51	2,15	5,65
16.	17,59±1,58 <sup>b</sup>	11,33	23,38	8,98	1,84±0,081	1,62	2,09	4,37
17.	18,38±1,86 <sup>d</sup>	9,54	27,35	10,15	1,86±0,107	1,34	2,14	5,74

Na osnovu primenjene analize varijanse, zapažena je značajna razlika između otpora vuče gledano po prohodima, s tim što su prisutne sličnosti najviše između dva prohoda.



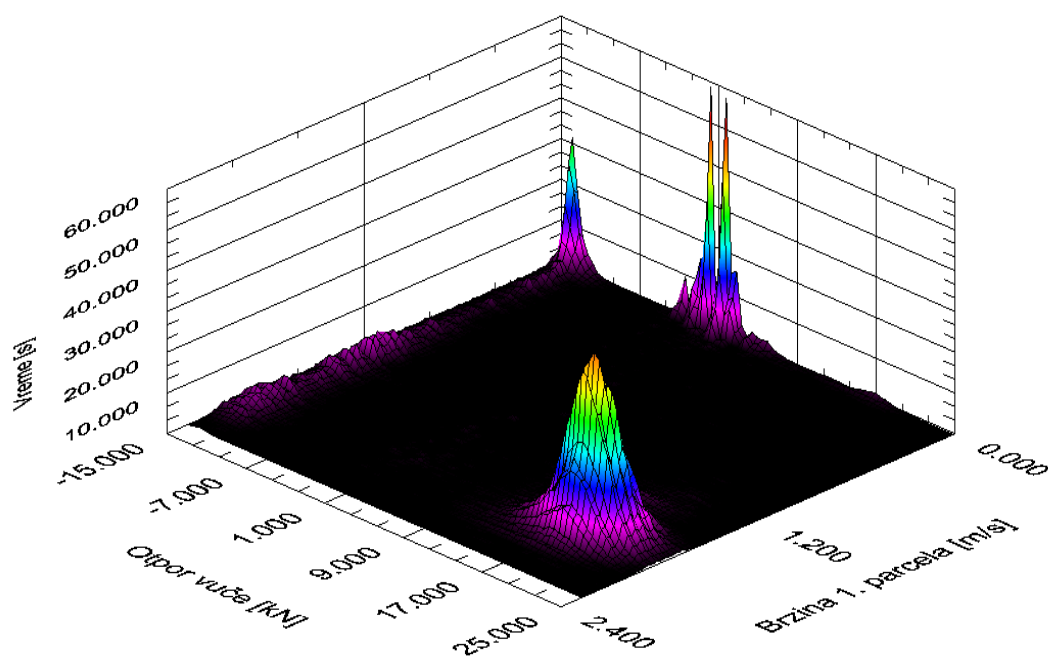


Na drugoj, prethodno obrađenoj parceli, izvršeno je isto ispitivanje u 2 prohoda i rezultati su dati u tabeli 12. Merene su vrednosti otpora i brzine sa učestalošću od 50 Hz i dobijene su niže vrednosti otpora zemljišta (15,33 kN u prvom i 16,03 kN u drugom prohodu) u odnosu na vrednosti izmerene na prethodno neobrađivanoj njivi što je i očekivano, s obzirom da je površinski, tvrdi sloj, poremećen prethodnom obradom.

Tab. 12. Otpor vuče i brzina traktora (polje B)

Prohod	Otpor vuče, $R$ (kN)				GPS brzina, $v$ (m/s)			
	Sr. vred.±St. dev.	Min	Max	CV	Sr. vred.±St. dev.	Min	Max	CV
1.	15,32±2,09 <sup>a</sup>	8,88	24,58	13,63	1,85±0,12	1,43	2,17	6,53
2.	16,03±2,45 <sup>b</sup>	8,86	25,89	15,27	1,84±0,11	1,53	2,22	5,81

Pitanje je da li se promene otpora dešavaju sistemski, po nekim zakonitostima, ili se njihovo pojavljivanje može podvesti pod slučajnost. Na slici 87 je prikazana raspodela izmerenih vrednosti za otpor koja odgovara zakonitostima normalne raspodele, tj. ekstremne vrednosti se pojavljuju veoma retko. Na istoj slici vide se i pojave negativnih vrednosti otpora koje se odnose na trenutke okretanja traktora na kraju parcele, kao i vrednosti otpora bliske nuli u trenucima spuštenog pluga u stanju mirovanja traktora. Takođe, sa slike 87 vidi se da su karakteristične vrednosti pojavljivale tokom čitavog procesa merenja i nisu grupisane u pojedinačnim segmentima.



Sl. 87. Distribucija otpora vuče u funkciji radne brzine



Za validaciju dobijenih vrednosti sile otpora korišćena je jednačina 7.1 kojom se dobija procenjena sila otpora na mašinama za obradu po standardu ASAE D497.6 (*ASAE Standards 2009*).

$$R = F_i[A + B \cdot (S) + V \cdot (S)^2]W \cdot T, \quad (7.1)$$

gde je  $R$  sila otpora vuče,  $F_i$  je veličina koja se odnosi na strukturni sastav zemljišta (za finu strukturu  $F=1$ , za srednje finu  $F=0,7$  i za grubu  $F=0,45$ ),  $A$ ,  $B$ , i  $V$  su vrednosti koje se odnose na tip oruđa za obradu (za raoni plug  $A = 652$ ,  $B = 0$ ,  $V = 5,1$ ).  $S$  je brzina kretanja izražena u km/h,  $T$  je radni zahvat (m),  $W$  je dubina obrade (cm). Na osnovu pretpostavljenih vrednosti parametara jednačine 8.1, predviđena vrednost sile optora za dubinu od 25 cm, radnu brzinu 6,5 km/h i teksturu zemljišta iznosi 17,9 kN. Izmerena prosečna vrednost sile otpora na neobrađenom delu parcele iznosi 17,4 kN što je veoma blisko izračunatoj vrednosti. Ova vrednost je takođe veoma bliska rezultatima dobijenim u istraživanjima autora *Malinović et al.*, (2013, 2014).

U tabeli 13. date su procene otpora zemljišta i brzine traktora, dobijene iz osnovnog i redukovanih uzoraka, u obliku srednja vrednost  $\pm$  standardno odstupanje. Sa "N" je označen obim datih uzoraka. U oba slučaja, otpora i brzine, primećuje se velika bliskost među srednjim vrednostima i standardnim odstupanjima u svih 7 uzoraka.

Tab. 13. Otpor vuče i brzina traktora na uzorcima - ANOVA

Uzorak	Ukupno uzoraka	Otpor vuče, $R$ (Sr. vred. $\pm$ St. dev.)	GPS brzina, $v$ (Sr. vred. $\pm$ St. dev.)
W	10144	17,36 $\pm$ 3,306 <sup>a</sup>	1,81 $\pm$ 0,0941 <sup>b</sup>
H1	5072	17,36 $\pm$ 3,314 <sup>a</sup>	1,81 $\pm$ 0,0941 <sup>b</sup>
H2	5072	17,36 $\pm$ 3,297 <sup>a</sup>	1,81 $\pm$ 0,0942 <sup>b</sup>
Q1	2536	17,34 $\pm$ 3,320 <sup>a</sup>	1,81 $\pm$ 0,0940 <sup>b</sup>
Q2	2536	17,34 $\pm$ 3,277 <sup>a</sup>	1,81 $\pm$ 0,0943 <sup>b</sup>
Q3	2536	17,36 $\pm$ 3,309 <sup>a</sup>	1,81 $\pm$ 0,0942 <sup>b</sup>
Q4	2536	17,37 $\pm$ 3,317 <sup>a</sup>	1,81 $\pm$ 0,0940 <sup>b</sup>

Dalje su srednja vrednost i disperzija za otpor zemljišta i brzinu traktora poređene uz pomoć analize varijansi (ANOVA). Sa veoma velikom pouzdanošću se može zaključiti da nema statistički značajnih razlika među srednjim vrednostima i disperzijama u svih 7 uzoraka kada je u pitanju otpor zemljišta. Rezultati ANOVE su prikazani u tabeli 14, gde je za poređenje srednjih vrednosti korišćen Takijev, a za poređenje disperzija Levenov test, sa rizikom od 5% u oba slučaja. U tabeli 14 su prikazane vrednosti dobijene za ceo model, dok su u tabeli 15.



prikazani rezultati poređenja procena srednjih vrednosti otpora i brzine u svih 7 uzoraka. Primećujemo da izmerene vrednosti pripadaju istim klasama u svim slučajevima.

Tab. 14. Otpor vuče i brzina traktora za model - ANOVA

ANOVA	dF	Otpor vuče		GPS brzina	
		F	p	F	p
Levene (otpor)	6	0,022182	0,99	0,071675	0,99
Taki (otpor)	6	0,043760	0,99	0,038534	0,99

Određeni su i Pirsonovi koeficijenti korelacije među uzorcima sa istim obimom (H1 i H2, odnosno Q1, Q2, Q3 i Q4), a primenjen je i Pirsonov test za poređenje raspodela u kojem su raspodele uzoraka sa smanjenim obimom (H1, H2, Q1, Q2, Q3 i Q4) poređene sa raspodelom u početnom uzorku W. Koeficijenti korelacije među uzorcima Q1, Q2, Q3 i Q4 su prikazani u tabeli 15. Vrednosti u tabelama ukazuju na značajnu korelacionu vezu među posmatranim vrednostima u svim slučajevima. Najmanje vrednosti korelacije su 0,81 (0,91) između uzoraka Q1 i Q4 u slučaju otpora (brzine), što i dalje predstavlja značajnu korelacionu vezu. Takođe, među uzorcima H1 i H2 je koeficijent korelacije veoma visok i iznosi 0,94 u slučaju otpora, odnosno 0,97 za brzinu.

Tab. 15. Pirsonov koeficijent korelacije za otpor vuče među uzorcima

uzorak	Otpor vuče, R				GPS brzina, v			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Q1	1,00	0,95	0,87	0,81	1,00	0,97	0,94	0,92
Q2	0,94	1,00	0,95	0,87	0,97	1,00	0,98	0,95
Q3	0,87	0,946	1,00	0,947	0,94	0,98	1,00	0,97
Q4	0,81	0,87	0,95	1,00	0,92	0,95	0,97	1,00

Statistički značajna bliskost među raspodelama vrednosti otpora u uzorcima H1, H2, Q1, Q2, Q3 i Q4 u odnosu na raspodelu u uzorku W je potvrđena i korišćenjem Pirsonovog testa za poređenje raspodela sa rizikom 5%. Vrednosti Pirsonovog testa su date u tabeli 16. Dobijene  $\chi^2$  vrednosti su u svim slučajevima manje od kritične vrednosti 16,92.

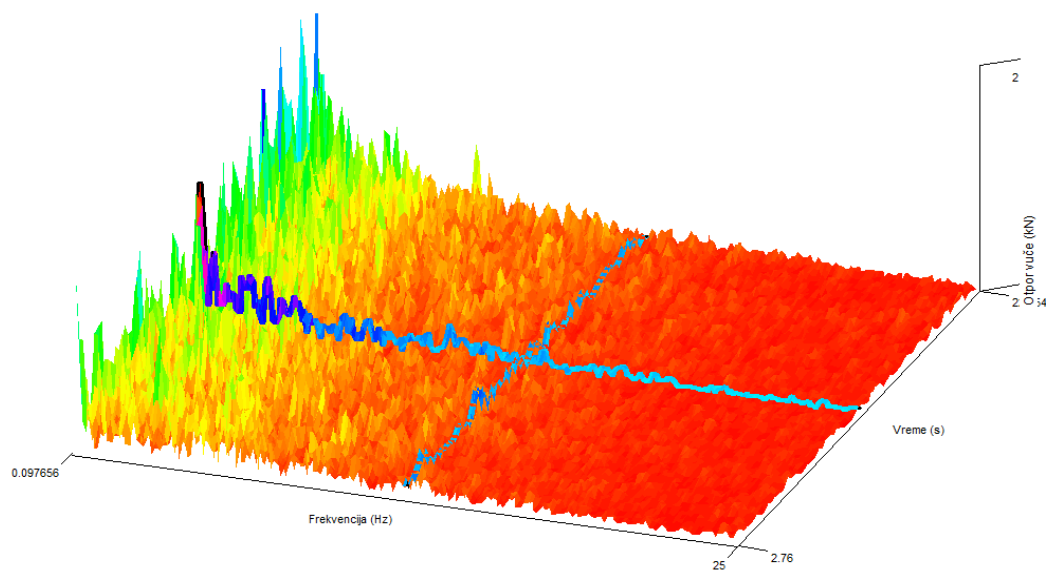
Tab. 16. Poređenje raspodela otpora vuče po uzorcima – Pirsonov test

Pirsonov test (kritična vrednost $\chi_{crit} = 16,919$ )						
	H1	H2	Q1	Q2	Q3	Q4
$\chi^2$	4,42	4,42	4,75	6,22	6,02	5,37

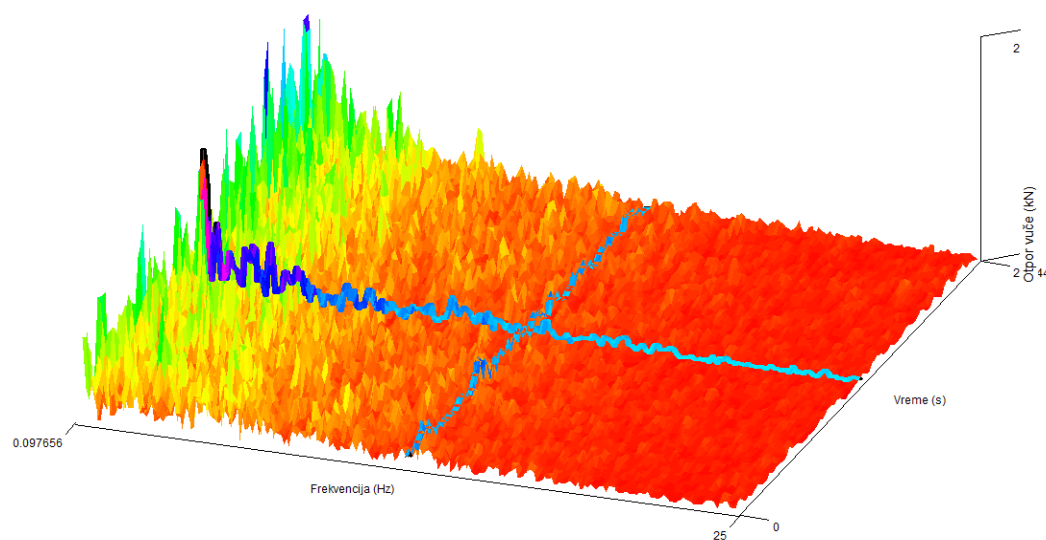


Analiza smanjenog uzorka potvrdila je da je metod merenja otpora vuče u potpunosti zadovoljio potrebe testa, čak šta više i da je frekvencija merenja (50 Hz) bila prevelika.

Na osnovu urađene JTF (*Joint-time-frequency*) analize sirovog signala ukupnog otpora vuče dobijen je vremenski grafik distribucije pojavljivanja različitih frekvencija. Sa slike 88 mogu se uočiti signali otpora koji se dominantno javljaju sa frekvencijama maksimalno do 10 Hz i u slučaju polja A i u slučaju polja B. Prema istraživanjima autora *Hayhoe et al. (2002)* signali otpora vuče se najviše javljaju pri niskim frekvencijama, dok su u slučaju većih frekvencija spektralne gustine značajno manje.



a)



b)

Sl. 88. JTF (*Joint-time-frequency*) spektralna analiza signala otpora vuče:

a - polje A; b - polje B



## 7.2. Rezultati komparativnog merenja otpora vuče na plugovima sa različitom konstrukcijom plužnih tela (TEST 2)

Tokom testiranja prikupljeno je približno 52.000 podataka i ovaj je broj značajno redukovan primenom linearne interpolacije u postprocesnoj analizi.

Otpor vuče je registrovan u tri pozicije na mernom ramu i to u gornjoj (*T*), levoj (*L*) i desnoj poluzi (*D*). S obzirom da je gornja poluga koso postavljena u odnosu na podlogu, vrednost *T* je korigovana za ugao  $\alpha$  i dobijena je vrednost *G*. Na osnovu izmerenih vrednosti u pojedinačnim tačkama veze, izračunat je ukupni otpor (*R*) po obrascu 6.1.

Merenje je obavljeno na dve parcele-varijante (A i B), sa dva pluga koji su opremljeni različitim tipovima plužnih dasaka (MP i SMP). Tokom statističke obrade, vrednost otpora je posmatrana u 6 prohoda (tri na parceli A i tri na parceli B) za svaki od plugova.

Rezultati statističke analize podataka o otporu vuče u funkciji tipa plužne daske na oba polja prikazani su u tabeli 17. u obliku srednja vrednost  $\pm$  standardno odstupanje (Sr. vred. $\pm$ St. dev.), koeficijent varijacije (CV) i minimalne (Min) i maksimalne (Max) postignute vrednosti.

Tab. 17. Rezultati otpora vuče *R*(kN) po varijantama testa

Prohod	Plug	Parcela	Sr. vred. $\pm$ St. dev.	Min	Max	CV
1	MP	A	31,24 <sup>f</sup> $\pm$ 2,78	10,68	32,98	8,89
2			31,55 <sup>f</sup> $\pm$ 2,77	15,55	36,92	8,79
3			32,31 <sup>h</sup> $\pm$ 2,78	10,63	32,79	8,59
4		B	27,86 <sup>c</sup> $\pm$ 2,76	14,35	24,92	9,92
5			28,12 <sup>c</sup> $\pm$ 2,77	10,96	26,73	9,86
6			30,00 <sup>e</sup> $\pm$ 2,78	8,04	40,16	9,27
7	SMP	A	29,58 <sup>de</sup> $\pm$ 2,82	14,80	27,19	9,52
8			29,45 <sup>d</sup> $\pm$ 2,82	6,99	32,19	9,58
9			30,68 <sup>g</sup> $\pm$ 2,85	13,80	27,50	9,30
10		B	25,93 <sup>ab</sup> $\pm$ 2,89	12,54	22,76	11,14
11			25,54 <sup>a</sup> $\pm$ 2,89	14,21	17,94	11,30
12			26,39 <sup>b</sup> $\pm$ 2,91	12,25	24,44	11,02

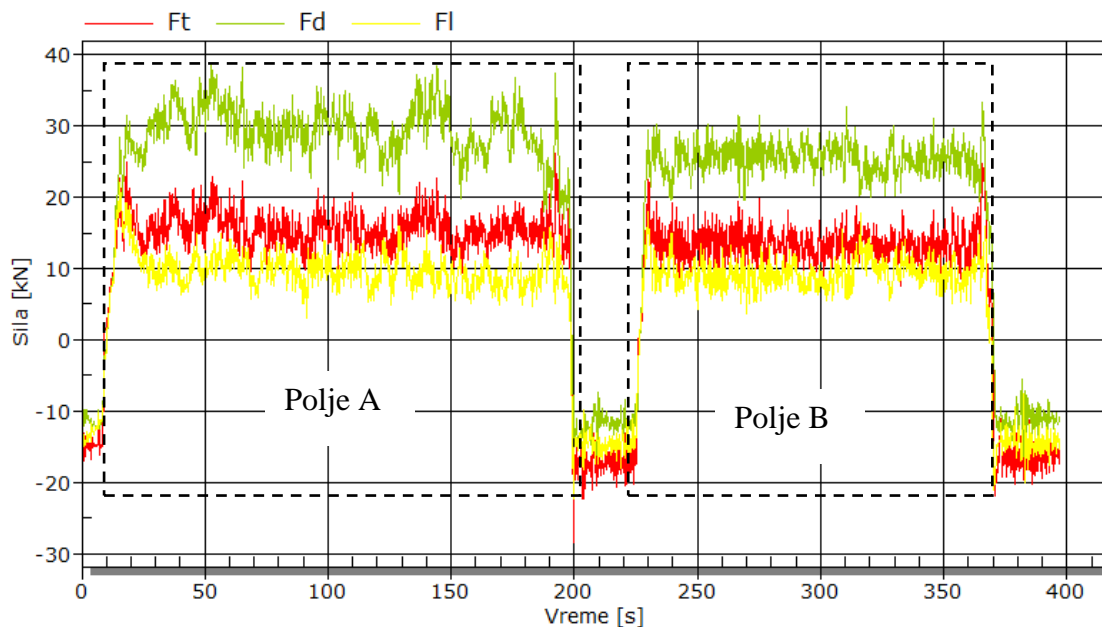
Iz tabele 17 se može uočiti da je najniža prosečna vrednost otpora vuče od 25,54 kN ostvarena u 11. prohodu na podrivanom zemljištu sa plugom sa rešetkastom plužnom daskom (polje B; SMP), dok je najviša od 32,31 kN dostignuta u 3. prohodu na neobrađenom zemljištu sa plugom opremljenim punom plužnom daskom (polje A; MP). Najmanja trenutna vrednost od 6,99 kN registrovana je na varijanti polja A i rešetkaste plužne daske (SMP). Najveća trenutna vrednost otpora vuče od 32,31 kN, izmerena je u varijanti polja B i pune



plužne daske (MP). Standardno odstupanje je najveće u 10. i 11. prohodu (2,89 kN), dok u ostalim prohodima postoji značajna bliskost po ovom parametru.

Može se konstatovati da rezultati pokazuju određen nivo stabilnosti, bez pojave većih ekstrema. Takođe, može se iz oblika vremenskog zapisa sila reći da je otpor vuče tokom merenja imao velike oscilacije u amplitudi (sl. 89), odnosno velike razlike između minimalnih i maksimalnih vrednosti sile tokom malih vremenskih intervala, što je prema navodima *Hayhoe et al.(2002)* opšta pojavauzrokovana pre svega nehomogenom strukturom zemljišta. U statističkoj analizi vrednosti komponenti sile otpora vuče u odnosu na tip daske za pojedinačne tretmane kao i ukupno posmatrano, poređene su preko t-testa sa 5% rizika. Rezultati dobijenih srednjih vrednosti, broja stepeni slobode, kao i t i p-vrednost date su u tabelama 19, 20 i 21.

Rezultati analize vrednosti otpora vuče u odnosu na tip plužnog tela za tretman A (tab. 18) ukazuju da postoji statistički značajna razlika otpora vuče, u odnosu na ispitivane plugove (tipove plužne daske), na svim pozicijama, sem na desnoj mernoj poziciji (*D*). Iz tabele 18 se vidi da su komponente *G* i *D* imale veću vrednost za plug sa rešetkastom daskom (*SMP*), a da su komponenta *L* i ukupan otpor *R* imali veću vrednost za plug sa punom plužnom daskom (*MP*).



Sl. 89. Vremenski zapis sile sa senzora za dva prohoda na različitim tretmanima

Rezultati analize vrednosti otpora vuče u odnosu na tip plužnog tela za tretman B (tab. 19) ukazuju da postoji statistički značajna razlika otpora vuče, u odnosu na ispitivane plugove



(tipove plužne daske), na svim pozicijama, sem na desnoj mernoj poziciji (D). Iz tabele 19 se vidi da je komponenta G imala veću vrednost za plug sa rešetkastom daskom (SMP), a da su komponente D, L i ukupan otpor R imao veću vrednost za plug sa punom plužnom daskom (MP).

Tab. 18. Vrednosti komponenti otpora vuče u odnosu na tip daske na polju A

Komponenta	Srednja vrednost (kN)		t vrednost	df	p vrednost
	Plug MP	Plug SMP			
G	8,04	9,44	-16,21	944	0,00
D	30,29	30,52	-1,13	944	0,26
L	9,43	8,84	4,72	944	0,00
R	31,68	29,92	10,16	944	0,00

Rezultati analize vrednosti otpora vuče u odnosu na tip plužnog tela posmatrano za oba tretmana (tab. 20) ukazuju da postoji statistički značajna razlika otpora vuče, u odnosu na ispitivane plugove (tipove plužne daske), na svim pozicijama, sem na desnoj mernoj poziciji (D). Iz tabele 20 se vidi da su sve komponente izuzev komponente G imale veću vrednost za plug sa punom daskom (MP).

Tab. 19. Vrednosti komponenti otpora vuče u odnosu na tip daske na polju B

Komponenta	Srednja vrednost (kN)		t vrednost	df	p vrednost
	Plug MP	Plug SMP			
G	7,22	7,86	-7,45	799	0,00
D	25,54	25,24	1,64	799	0,10
L	10,33	8,55	11,76	799	0,00
R	28,66	25,94	20,00	799	0,00

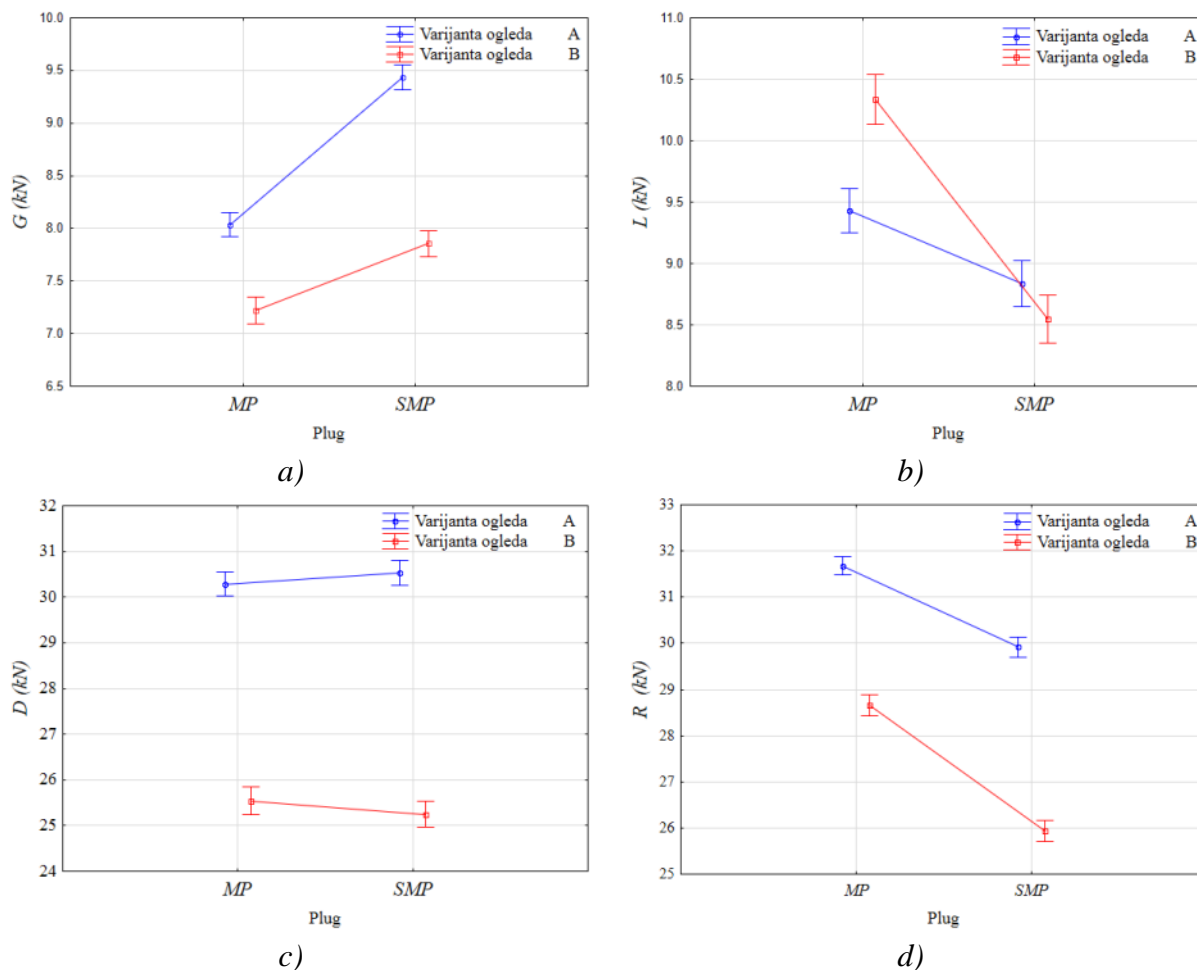
Tab. 20. Vrednosti komponenti otpora vuče u odnosu na tip daske za oba tretmana

Komponenta	Srednja vrednost (kN)		t vrednost	df	p vrednost
	Plug MP	Plug SMP			
G	7,68	8,67	-14,65	1745	0,00
D	28,22	27,97	1,313	1745	0,18
L	9,82	8,69	11,42	1745	0,00
R	30,18	27,93	16,82	1745	0,00

Komparativni prikaz srednjih vrednosti otpora vuče sa intervalima poverenja na nivou značajnosti 95% za pojedinačne pozicije u odnosu na tip pluga i varijantu oglada, dat je na



slici 90. Sa slike se zaključuje da postoje statistički značajna razlika u vrednostima komponenti otpora vuče D, G i R kako u odnosu na varijantu ogleda tako i u odnosu na tip pluga. Komponenta otpora L se razlikuje u odnosu na tip pluga na obe varijante ogleda, s tim što postoji sličnost kod pluga SMP gledano u odnosu na varijantu ogleda.



Sl. 90. Vrednosti horizontalnih komponenti otpora vuče u odnosu na tip pluga:

a - gornja horizontalna komponenta otpora; b - desna horizontalna komponenta; c - leva horizontalna komponenta; d - ukupan otpor vuče

Korišćenjem t-testa vrednosti otpora vuče su poređene i u odnosu na parcelu, a rezultati su prikazani u tabeli 21. Zaključeno je da, na svim merenim pozicijama na mernom uređajem, postoji statistički značajna razlika u izmerenim vrednostima otpora na parcelama A i B. Najveće vrednosti izmerene su na desnoj mernoj ćeliji (30,39 kN) za parcelu A, a najmanje u gornjoj poluzi (G) na parceli B (7,55 kN). Najmanja razlika je zabeležena između vrednosti dobijene u levoj mernoj tački (L). Komparativni prikaz srednjih vrednosti pojedinačnih

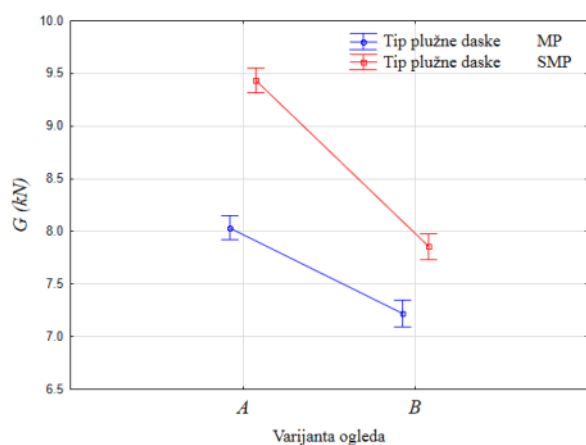




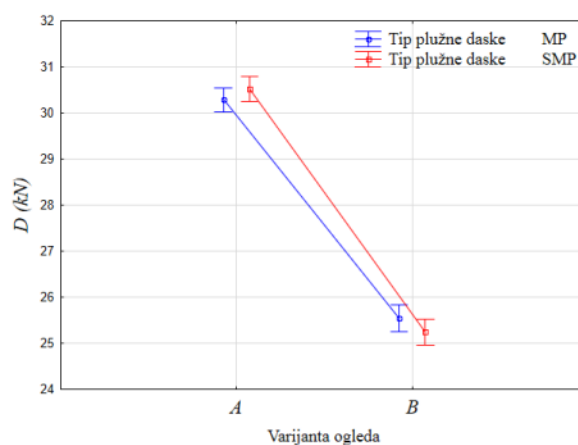
komponenti otpora vuče, sa intervalima poverenja na nivou značajnosti 95%, u odnosu na polje, dat je na slici 91.

Tab. 21. Vrednosti otpora u odnosu na parcelu

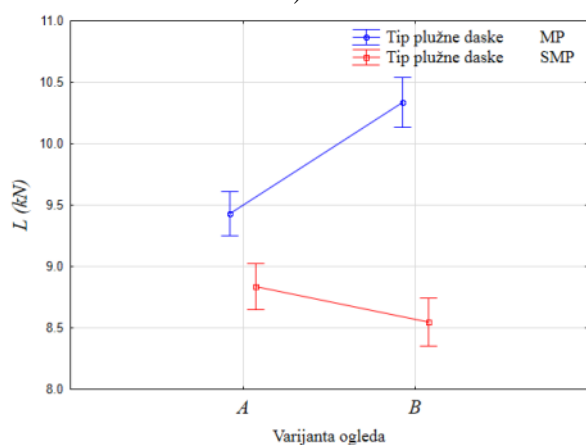
Komponenta	Srednja vrednost (kN)		t vrednost	df	p vrednost
	Parcela A	Parcela B			
G	8,69	7,55	17,19	1745	0,00
D	30,39	25,38	35,34	1745	0,00
L	9,15	9,41	-2,49	1745	0,01
R	30,85	27,24	28,865	1745	0,00



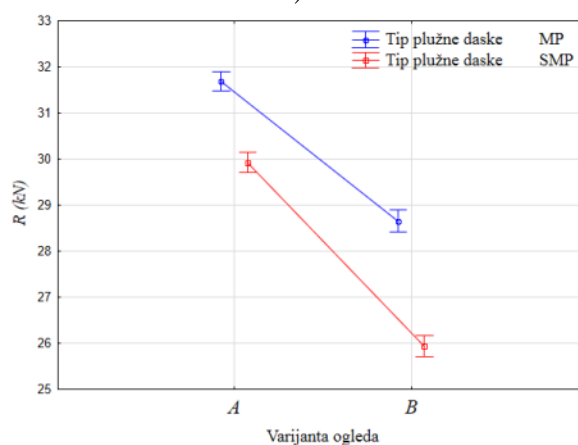
a)



b)



c)



d)

Sl. 91. Vrednosti horizontalnih komponenti otpora vuče u varijantu ogleda:

a - gornja horizontalna komponenta; b - desna horizontalna komponenta; c - leva horizontalna komponenta; d - ukupan otpor vuče

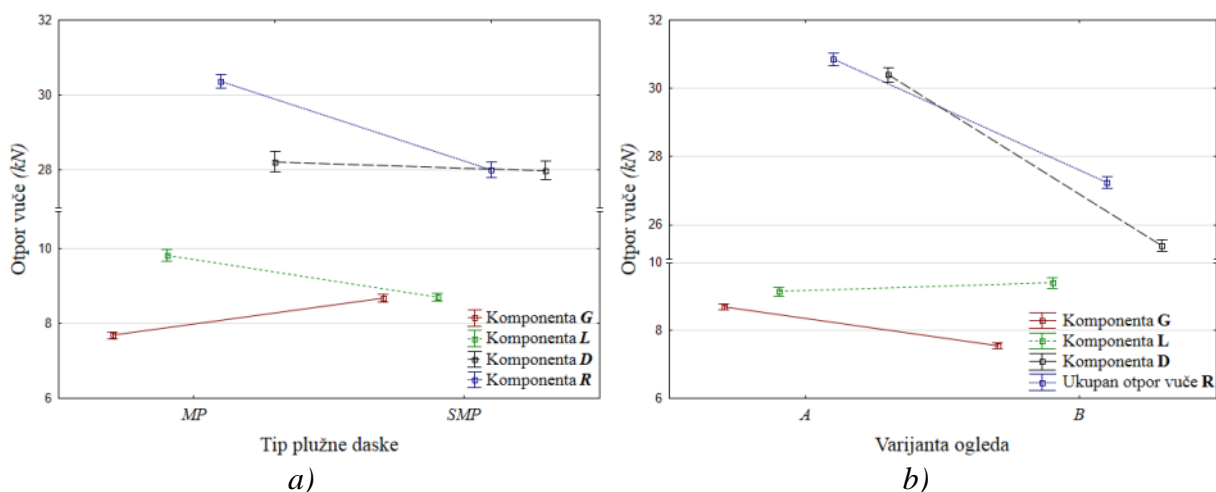


Dalje su srednje vrednosti otpora merene na različitim delovima pluga poređene ANOV-om preko Takijevog testa sa rizikom od 5%. Ako se posmatraju objedinjeni rezultati (prva kolona, tab. 22) postoji značajna razlika među vrednostima otpora na svim pozicijama, s tim da je primetna bliskost među vrednostima horizontalne komponente sile u gornjoj poluzi (*G*) i levom mernom mestu (*L*), odnosno na desnom i ukupno. Rezultati nevedenih vrednosti otpora na MP i SMP plugu, kao i na A i B parceli su dati u tabeli 22. Primećena je statistički značajna razlika među svim vrednostima otpora u slučaju MP plugova i parcela A i B, dok su za plug SMP horizontalne komponente otpora u gornjoj (*G*) i levoj (*L*) mernoj poziciji, odnosno desnoj (*D*) i ukupno jednaki.

Komparativni prikaz ukupnog otpora vuče sa intervalima poverenja na nivou značajnosti 95%, u odnosu na polje, dat je na slici 92.

Tab. 22. Vrednosti komponenti otpora (*kN*) u odnosu na tip pluga (MP i SMP) i parcele (A i B)

Komponenta	Sr. vred.	Plug		Parcela	
		MP	SMP	A	B
G	8,17 <sup>a</sup>	7,68 <sup>a</sup>	8,67 <sup>a</sup>	8,69 <sup>a</sup>	7,55 <sup>a</sup>
D	28,10 <sup>b</sup>	28,22 <sup>b</sup>	27,97 <sup>b</sup>	30,39 <sup>b</sup>	25,38 <sup>b</sup>
L	9,26 <sup>c</sup>	9,82 <sup>c</sup>	8,69 <sup>a</sup>	9,15 <sup>c</sup>	9,41 <sup>c</sup>
R	29,19 <sup>d</sup>	30,18 <sup>d</sup>	27,93 <sup>b</sup>	30,85 <sup>d</sup>	27,24 <sup>d</sup>



Sl. 92. Vrednosti ukupnog otpora vuče u odnosu na tip plužne daske:

a - varijanta ogleda; b - varijanta polja

Poređenjem srednjih vrednosti otpora vuče za rešetkastu i punu plužnu dasku za oba tretmana dobija se razlika od 6% u korist rešetkaste na neobrađenom zemljištu „A“, dok je razlika na podrivanom zemljištu „B“ u proseku oko 7%.



Navedeni rezultati pokazuju da postoji razlika u vučnim otporima pluga sa punom i rešetkastom plužnom daskom na podrivanom i neobrađenom zemljištu što potvrđuje hipotezu da otpori vuče, pored fizičkog stanja zemljišta i radnih parametara, zavise i od konstrukcije radnih delova oruđa (Askari et al. 2013, Al-Janobi et al. 1998). Stabilnost dobijenih podataka tokom testa plugova na oba tretmana ukazuje da je merenje metodološki korektno izvedeno i da novi merni sistem ispunjava sve kriterijume savremene merne opreme za radu na polju.

### 7.2.1. Rezultati metode planiranja eksperimenta (DoE)

Posmatrana su tri ulazna faktora: plužna daska (oznaka A), parcela (oznaka B) i prohod (oznaka C). Sva tri faktora su striktno kategorička, gde faktori A i B uzimaju vrednosti na dva nivoa, a faktor C na tri nivoa (tab. 23).

Uzimajući sve kombinacije nivoa datih faktora izvršeno je 12 eksperimenata (merenja).

Tab. 23. Vrednosti ulaznih faktora u faktorijalnom dizajnu

Ulazni faktor	Tip promenljive	Broj nivoa	Donji nivo	Gornji nivo
A: Pl. daska	Kategorička	2	MP	SMP
B: Parcela	Kategorička	2	A	B
C: Prohod	Kategorička	3	1	3

Tab. 24. Izmerene vrednosti izlaznih faktora u faktorijalnom dizajnu

Proba	Ulazni faktori			Izlazni faktori			
	Pl. daska	Parcela	Prohod	G	D	L	R
1	SMP	B	3	8,54	26,19	8,71	26,36
2	SMP	A	3	9,40	30,96	9,16	30,73
3	MP	B	1	6,97	25,45	9,25	27,73
4	MP	A	2	7,89	30,67	8,81	31,59
5	MP	B	3	7,62	26,13	11,56	30,07
6	SMP	B	2	7,80	25,05	8,24	25,49
7	SMP	A	2	9,31	30,64	8,27	29,60
8	SMP	B	1	7,39	24,39	9,02	26,01
9	SMP	A	1	9,86	30,24	9,27	29,66
10	MP	A	1	8,19	29,46	9,85	31,13
11	MP	A	3	8,00	30,73	9,54	32,29
12	MP	B	2	7,01	24,94	10,14	28,08

Praćene (merene) su četiri veličine na izlazu: otpor vuče u gornjoj poluzi (oznaka G), na donjoj desnoj poluzi (oznaka D), na donjoj levoj poluzi (oznaka L) i ukupan otpor vuče (oznaka R). Srednja vrednost, standardno odstupanje, koeficijent varijacije, te minimalna i



maksimalna vrednost i njihov odnos (ratio), za sva četiri izlaza, dati su u tabeli 25, dok su sve izmerene vrednosti prikazane u tabeli 24.

Tab. 25. Deskriptivna statistika izlaznih faktora

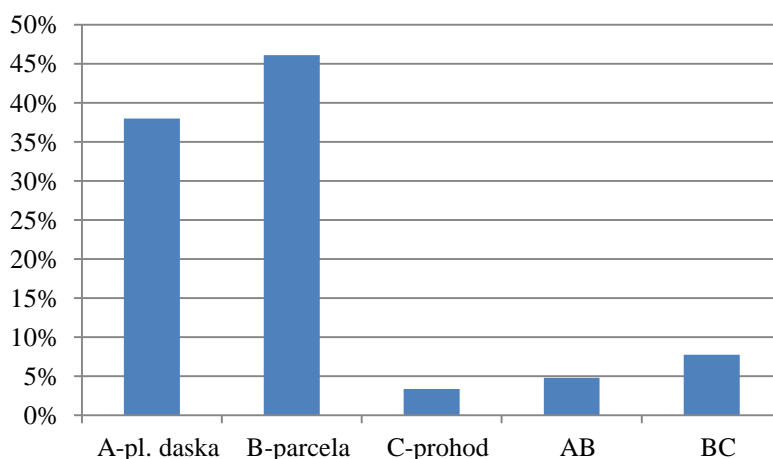
Izlazni faktor	Jedinica	Br. proba	Min	Max	Sr. vredn.	St. dev.	CV	Ratio
G	kN	12	6,98	9,86	8,17	0,9	11,02	1,41
D	kN	12	24,4	30,97	27,91	2,61	9,35	1,27
L	kN	12	8,25	11,57	9,32	0,87	9,33	1,4
R	kN	12	25,5	32,29	29,07	2,19	7,53	1,27

Koristeći ANOV-u ispitivan je uticaj ulaznih faktora i njihovih interakcija, a rezultati su dati u tabeli 26 za izlaz G, tabeli 27 za izlaz D, tabeli 28 za izlaz L i tabeli 29 za izlaz R. Navedene su vrednosti suma kvadrata, broj stepeni slobode, srednje kvadratne grešk, te odgoarajuće F i p vrednosti za sve ulazne faktore i najznačajnije interakcije.

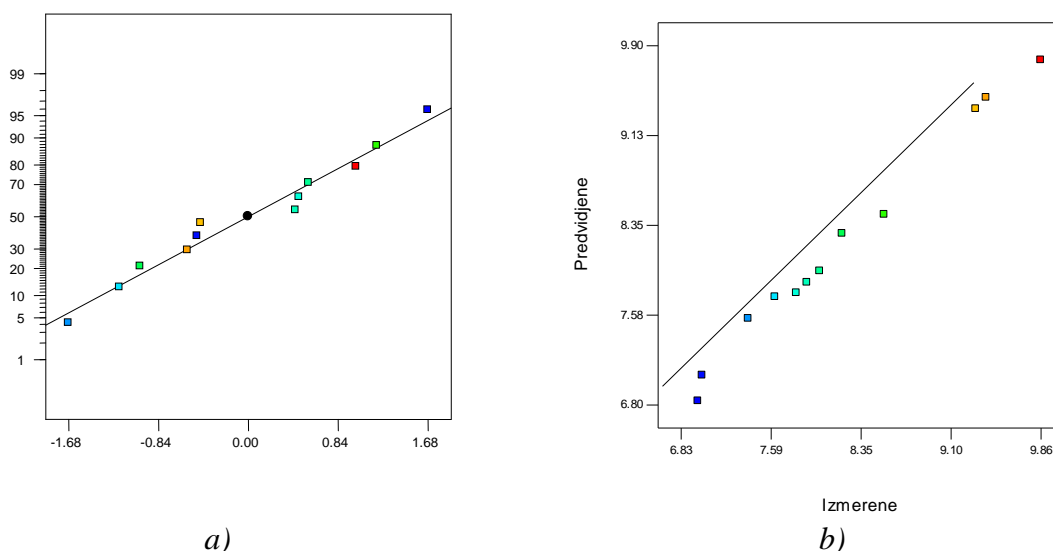
Tab. 26. Tablica analize varijansi za izlaz "G"

Gornja	SS	df	MSE	F-vrednost	p-vrednost
Model	9,63	7	1,37	61,75	0,0007
A: pl. daska	3,66	1	3,66	164,22	0,0002
B: parcela	4,44	1	4,44	199,28	0,0001
C:prohod	0,32	2	0,16	7,24	0,0468
AB	0,46	1	0,46	20,79	0,0103
BC	0,74	2	0,37	16,73	0,0114
Residual	0,09	4	0,02		
Total	9,72	11			

Uočava se da statistički najveću značajnost imaju ulazi A i B u slučaju izlaza G, ulaz B za izlaze D i R i ulaz A u slučaju izlaza L. Jačina i smer uticaja ulaznih faktora i njihovih interakcija prikazana je i na slikama 93, 95, 96, 97, 99, 100, 102, 103, 104, 106 i 107. Slike 94, 97, 101 i 105 pokazuju da je u slučaju sva četiri ulaza ispunjen uslov normalnosti raspodele ostataka, kao i da modeli dobro opisuju izmerene vrednosti (sem u slučaju izlaza L).

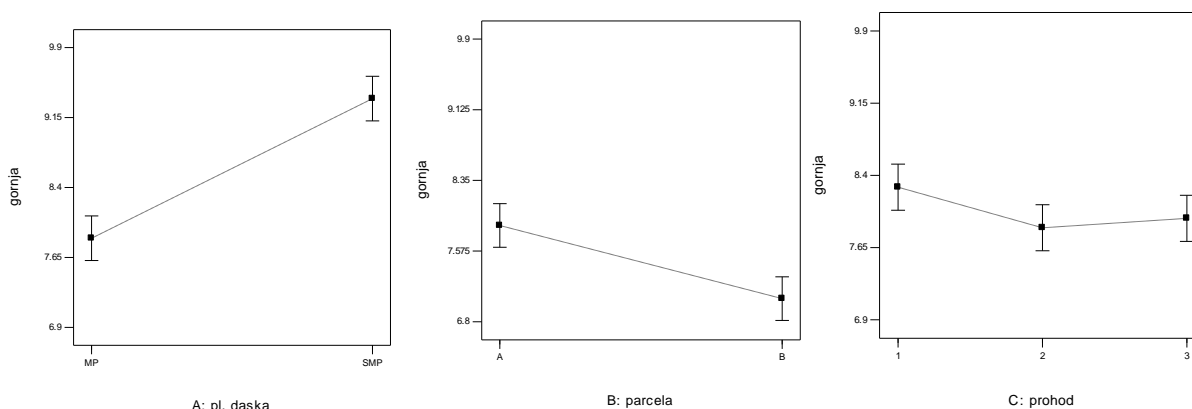


Sl. 93. Uticaj ulaznih faktora i njihovih interakcija na izlaz otpor u gornjoj poluzi (G)



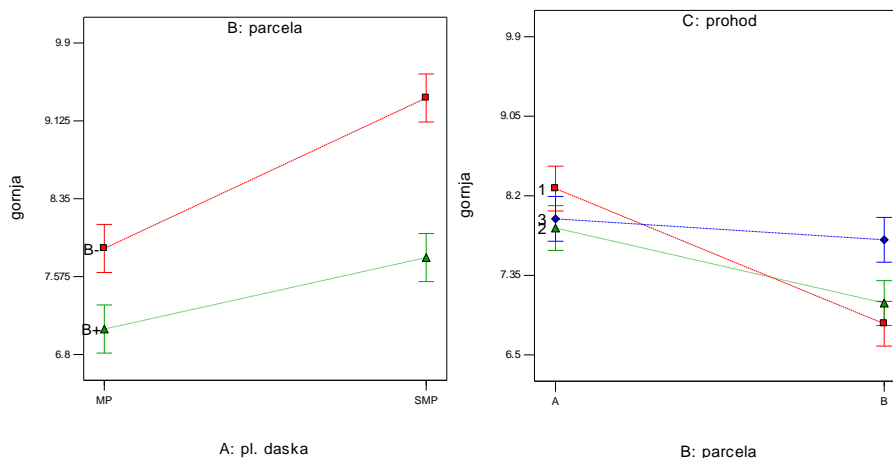
Sl. 94. Model za izlaz vučnog otpor u gornjoj poluzi (G):

a - normalna raspodela ostataka; b - odnos predviđenih i izmerenih vrednosti



Sl. 95. Uticaj ulaznih faktora na izlaz otpor u gornjoj poluzi (G):

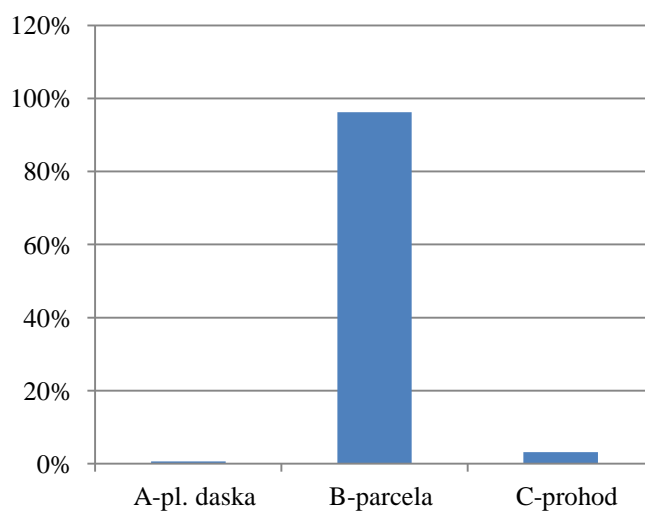
a - parcela A, prohod 2; b - plužna daska MP, prohod 2; c - plužna daska MP, parcela A



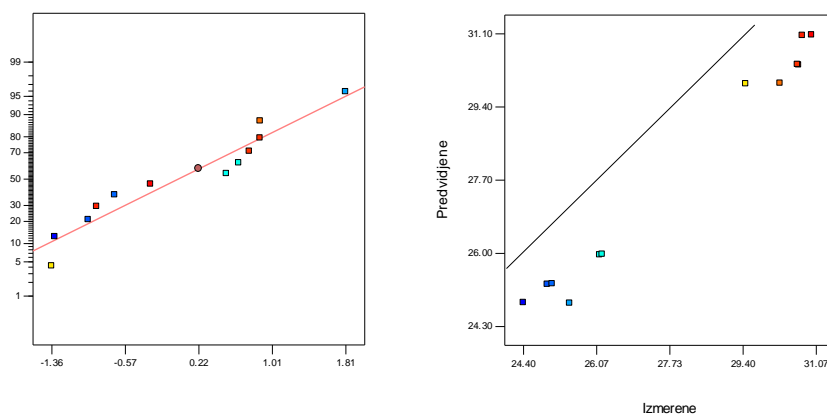
Sl. 96. Uticaj interakcija ulaznih faktora na izlaz otpor u gornjoj poluzi (G):  
a - prohod 2; b - plužna daska MP

Tab. 27. Tablica analize varijansi za izlaz “donja”

Donja	SS	df	MSE	F-vrednost	p-vrednost
Model	80,45	4	20,11	100,71	< 0,0001
A: pl. daska	0,0005213	1	0,000521	0,00261	0,9607
B: parcela	77,89	1	77,89	390	< 0,0001
C: prohod	2,56	2	1,28	6,41	0,0262
Residual	1,4	7	0,2		
Total	81,85	11			

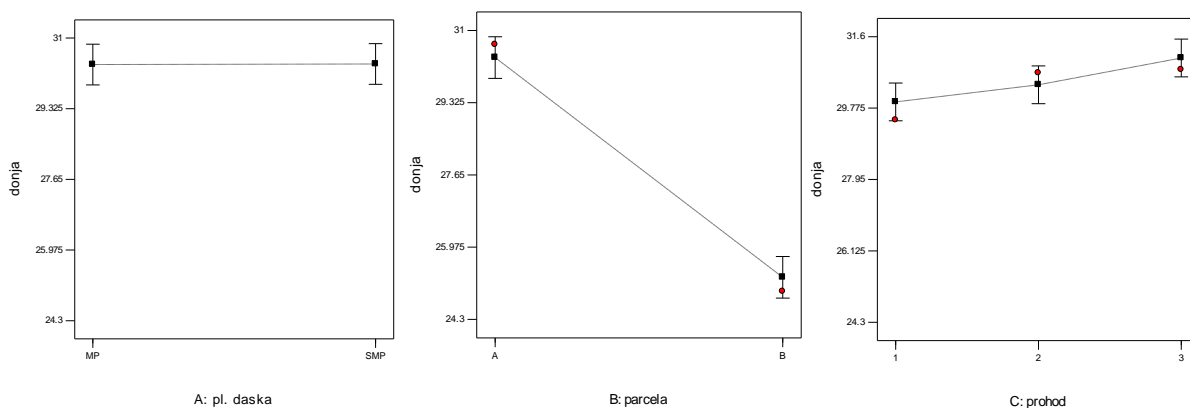


Sl. 97. Uticaj ulaznih faktora i njihovih interakcija na izlaz otpor u donjoj desnoj poluzi (D)



Sl. 98. Model za izlaz otpor u donjoj desnoj poluzi (D):

a - normalna raspodela ostataka; b - odnos predviđenih i izmerenih vrednosti

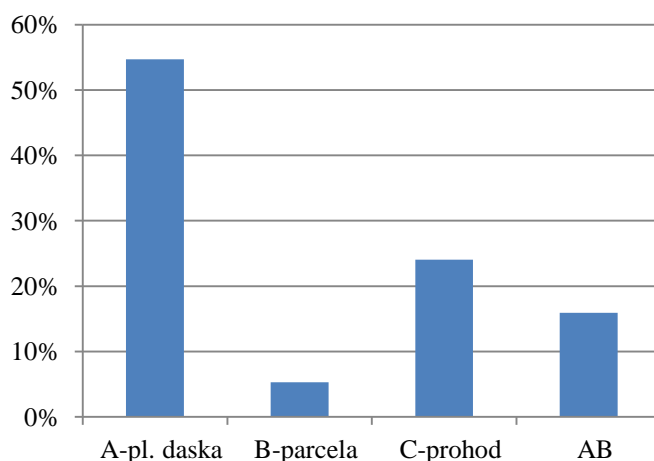


Sl. 99. Uticaj ulaznih faktora na izlaz otpor u donjoj desnoj poluzi (D):

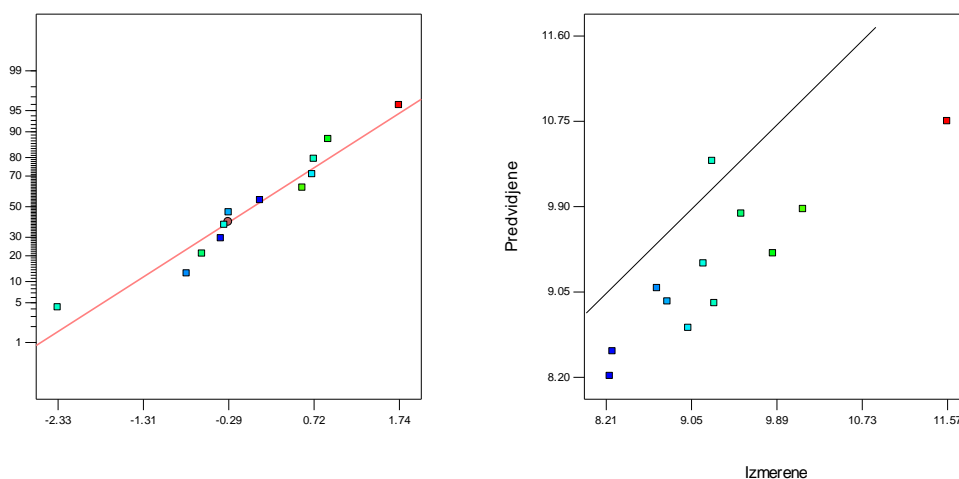
a - parcela A, prohod 2; b - pl. daska MP, prohod 2; c - pl. daska MP, parcela A

Tab. 28. Tablica analize varijansi za izlaz “L”

Leva	SS	df	MSE	F-vrednost	p-vrednost
Model	6,39	5	1,28	2,89	0,11
A: pl. daska	3,5	1	3,5	7,91	0,03
B: parcela	0,34	1	0,34	0,77	0,41
C: prohod	1,54	2	0,77	1,74	0,25
AB	1,02	1	1,02	2,31	0,18
Residual	2,65	6	0,44		
Total	9,04	11			

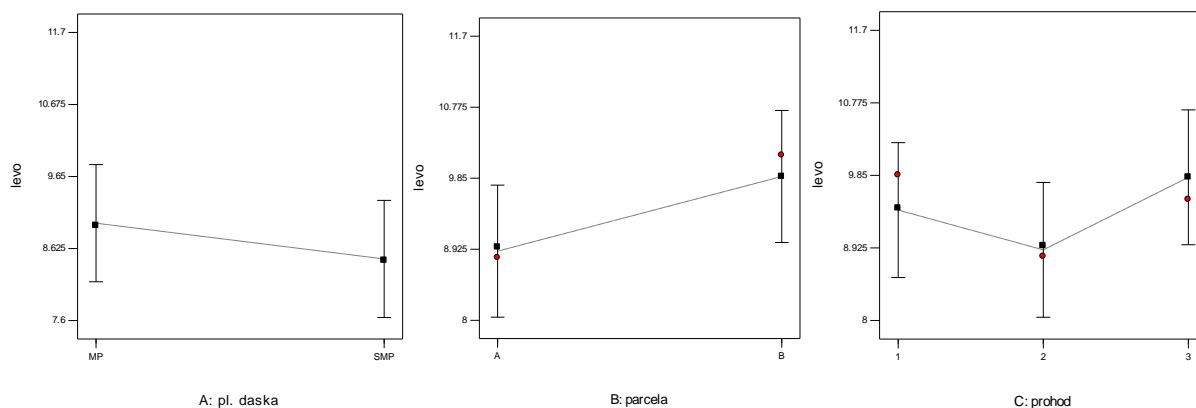


Sl. 100. Uticaj ulaznih faktora i njihovih interakcija na izlaz otpor u donjoj levoj poluzi (L)



Sl. 101. Model za izlaz otpor u donjoj levoj poluzi (L):

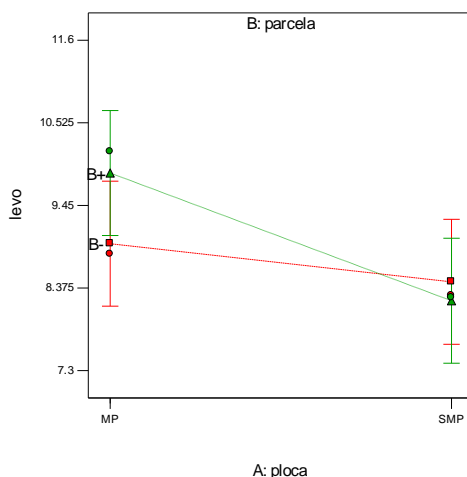
a - normalna raspodela ostataka; b - odnos predviđenih i izmerenih vrednosti



Sl. 102. Uticaj ulaznih faktora na izlaz otpor u donjoj levoj poluzi (L):

a - parcela A, prohod 2; b - pl. daska MP, prohod 2; c - pl. daska MP, parcela A

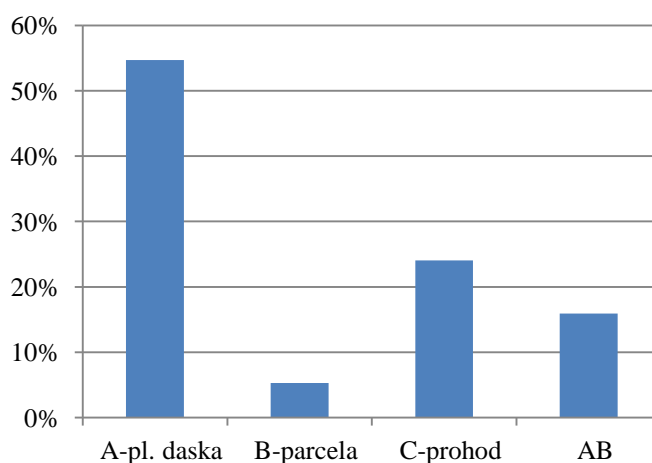




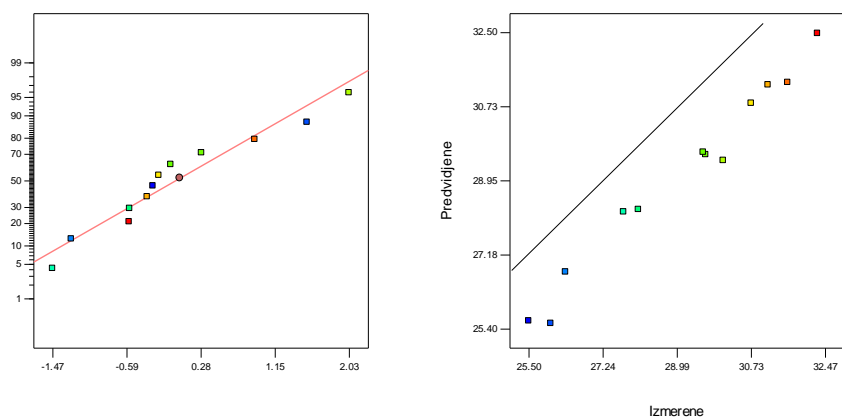
Sl. 103. Uticaj interakcija ulaznih faktora na izlaz "levo" za vrednost prohod 2

Tab. 29. Tablica analize varijansi za izlaz ukupan otpor vuče "R"

Ukupno	SS	df	MSE	F-vrednost	p-vrednost
Model	56,38	5	11,28	55,66	< 0,0001
A: pl. daska	14,13	1	14,13	69,76	0,0002
B: parcela	37,64	1	37,64	185,79	< 0,0001
C:prohod	3,86	2	1,93	9,53	0,0137
AB	0,75	1	0,75	3,69	0,1032
Residual	1,22	6	0,2		
Total	57,6	11			

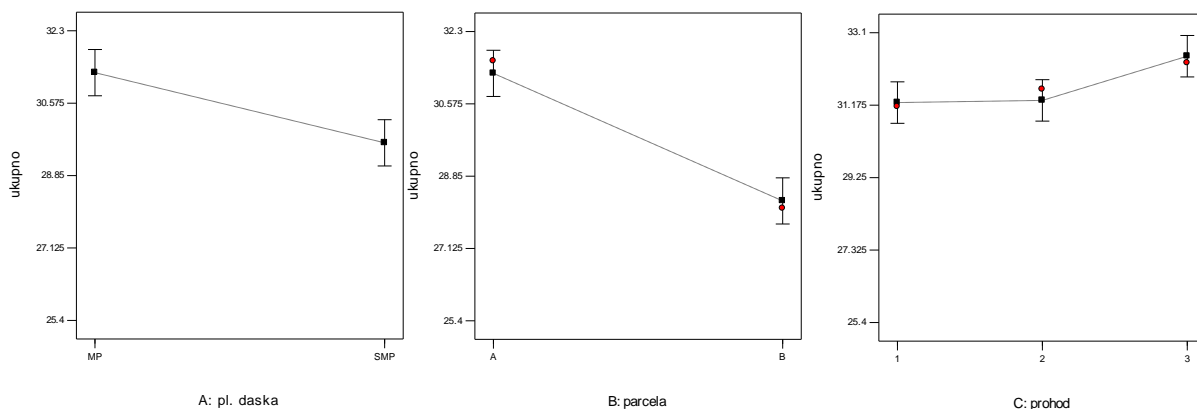


Sl. 104. Uticaj ulaznih faktora i njihovih interakcija na izlaz ukupan otpor vuče (R)



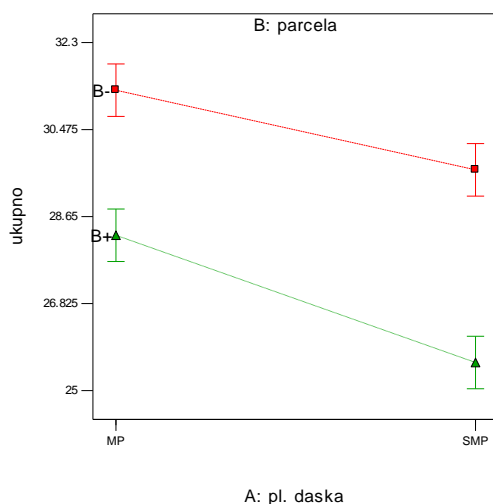
Sl. 105. Model za izlaz ukupan otpor vuče (R):

a - normalna raspodela ostataka; b - odnospredviđenih i izmerenih vrednosti



Sl. 106. Uticaj ulaznih faktora na izlaz ukupan otpor vuče (R) za vrednosti:

a - parcela A, prohod 2; b - pl. daska MP, prohod 2; c - pl. daska MP, parcela A



Sl. 107. Uticaj interakcija ulaznih faktora na izlaz ukupan otpor vuče (R) za vrednost prohod



### 7.3. Rezultati prostorne analize otpora vuče raonog pluga i fizičkih osobina zemljišta (TEST 3)

Ispitivanje fizičko-mehaničkih osobina zemljišta obavljeno je na 30 lokacija na parceli koje su pravilno raspoređene po tretmanima (po 10 za svaki tretman). Parametri sabijenosti su mereni u 6 ponavljanja za svaku lokaciju u 9 slojeva. Zapreminska masa, vlažnost i mehanički sastav su određeni na osnovu uzoraka uzetih iz dva sloja u tri ponavljanja za svaku lokaciju (opisano u poglavlju 5). Sve lokacije na parceli su geografski određene primenom GPS prijemnika visoke tačnosti pozicioniranja.

Nakon analize stanja zemljišta, obavljena je osnovna obrada raonim plugom uz istovremeno merenje otpora vuče sa mernim ramom i pripadajućom opremom. Tokom obrade mereni su otpori vuče i proklizavanje pogonskog točka uz simultano zapisivanje koordinata mernih lokacija.

Izmerene vrednosti fizičkih osobina zemljišta i otpora vuče, odnosno klizanja točka su poređeni standardnim statističkim metodama kao i naprednim uz primenu GIS softvera koji je omogućio poređenje prema lokaciji na parceli. Završna analiza odnosila se na geostatističko modelovanje variograma i prikazivanje prostornih karata-mapa za svaki parametar.

Za 30 lokacija na parceli određeno je stanje parametara zapreminske mase ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), vlažnosti (%), sabijenosti (MPa), količine peska (%), praha (%) i gline (%).

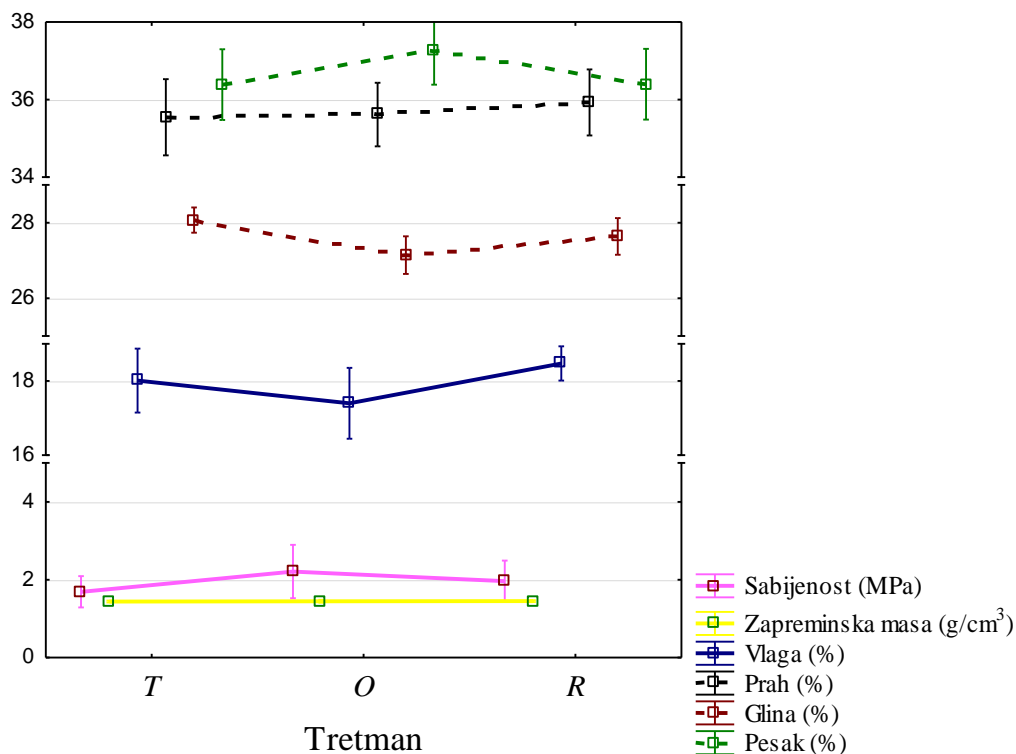
Tab. 30. Deskriptivna statistika objedinjenih merenja

	Zapreminska masa ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Vlaga (%)	Sabijenost (MPa)	Prah (%)	Glina (%)	Pesak (%)
Sr. vred.	1,45	18,16	1,88	35,70	27,62	36,68
Min	1,37	16,54	1,21	31,44	25,36	32,84
Max	1,54	24,28	2,39	38,24	30,52	40,76
St. dev.	0,04	1,35	0,31	1,87	1,01	1,92
CV	2,75	7,43	16,49	5,24	3,66	5,24
95% CI	1,43	17,68	1,76	35,22	27,36	36,19
	1,46	18,65	1,99	36,17	27,87	37,16

Rezultati su prikazani u tabeli 30. u vidu minimalnih, maksimalnih vrednosti, te srednje vrednosti, standardnog odstupanja i koeficijenta varijacije, kao i intervala poverenja srednje vrednosti za sve merene karakteristike. Sva izračunavanja su rađena sa rizikom od 5%.



Najveći koeficijent varijacije (16,49%) je zabeležen kod merenja sabijenosti, dok su najmanje varijabilnosti u slučaju zapreminske mase i udela gline (2,51%, odnosno 3,66%). Srednje vrednosti sa intervalima poverenja grafički su prikazani na slici 108.



Sl. 108. Grafički prikaz srednjih vrednosti fizičkih osobina zemljišta sa intervalima poverenja

### 7.3.1. Rezultati stanja fizičkih osobina zemljišta po tretmanima

Poređenje sabijenosti posmatranih varijanti obavljeno je primenom Duncan-ovog testa sa pragom značajnosti od 5%. Iz tabele 31 se može konstatovati da postoji statistički značajna razlika u izmerenim prosečnim vrednostima sabijenosti zemljišta na tretmanu "O" u odnosu na tretman "T", a da su vrednosti tretmana "R" slične sa vrednostima sabijenosti iz tretmana "O" i "T". Najveća prosečna sabijenost zemljišta izmerena je na oranom (2,21 MPa), manja sabijenost bila je na razrivanom (1,89 MPa), a najmanja na tanjiranom (1,62 MPa) delu parcele.

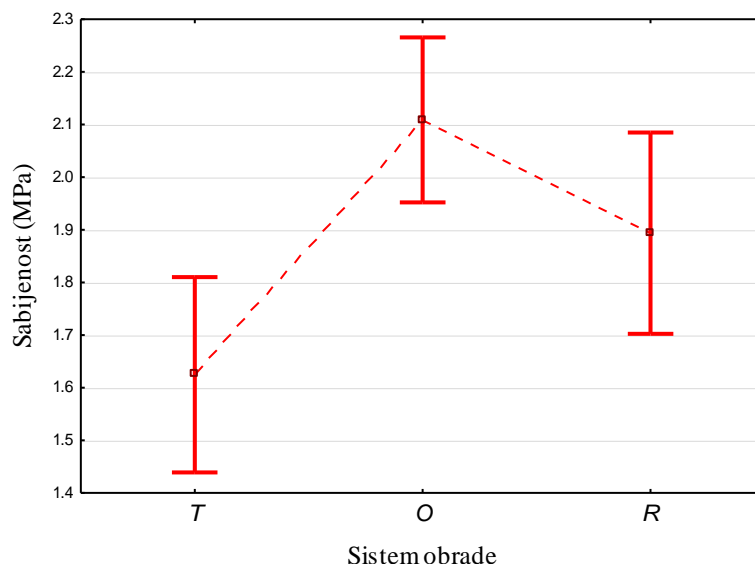
Tab. 31. Prosečno stanje sabijenosti po tretmanima

Tretman	Sabijenost (MPa)				
	Sr. vred.	St. dev.	CV	Min	Max
T	1,62 <sup>a</sup>	0,26	15,97	1,21	2,16
O	2,11 <sup>b</sup>	0,22	10,39	1,64	2,39
R	1,89 <sup>ab</sup>	0,27	14,12	1,48	2,26



Najveća varijabilnost prosečne sabijenosti zabeležena je na tanjiranom delu parcele (15,97%), na razrivanom (14,12%), a najmanja na oranom (10,39%) što se može zaključiti i sa grafika 109.

Na slici 109 prikazane su srednje vrednosti sabijenosti sa intervalima poverenja na nivou značajnosti od 95% u odnosu na prethodnu obradu (tretmane).



Sl. 109. Grafički prikaz srednjih vrednosti sabijenosti zemljišta po tretmanima sa intervalima poverenja

Sabijenost zemljišta po slojevima je poređena Duncan-ovim testom u odnosu na prethodnu obradu (tretman, tab. 32.). Jednakost srednjih vrednosti sabijenosti za sve tretmane je potvrđena u sloju 3,5 cm, 7 cm, 14 cm i 17,5 cm, na dubini od 21 cm, 24,5 cm, 28 cm i 31,5 cm se po sabijenosti zemljišta tretman oranje "O" statistički značajno razlikuje od ostala dva tretmana. Na dubini 31,5 cm tretman tanjiranje "T" je različit od druge dve obrade, dok se sabijenost na dubini 28 cm za sva tri načina obrade međusobno razlikuju.

Tab. 32. ANOVA – načini obrade za sabijenost po slojevima

Sloj (cm)	Tretmani	Sabijenost (MPa)								
		3,5	7	10,5	14	17,5	21	24,5	28	31,5
	T	0,59 <sup>a</sup>	0,82 <sup>a</sup>	1,11 <sup>b</sup>	1,18 <sup>a</sup>	1,09 <sup>a</sup>	1,20 <sup>a</sup>	1,54 <sup>a</sup>	2,70 <sup>a</sup>	4,36 <sup>a</sup>
	O	0,59 <sup>a</sup>	0,76 <sup>a</sup>	0,87 <sup>a</sup>	1,06 <sup>a</sup>	1,28 <sup>a</sup>	1,69 <sup>b</sup>	2,75 <sup>b</sup>	4,48 <sup>c</sup>	5,47 <sup>b</sup>
	R	0,63 <sup>a</sup>	0,87 <sup>a</sup>	0,97 <sup>ab</sup>	1,19 <sup>a</sup>	1,32 <sup>a</sup>	1,35 <sup>a</sup>	1,90 <sup>a</sup>	3,74 <sup>b</sup>	5,04 <sup>b</sup>

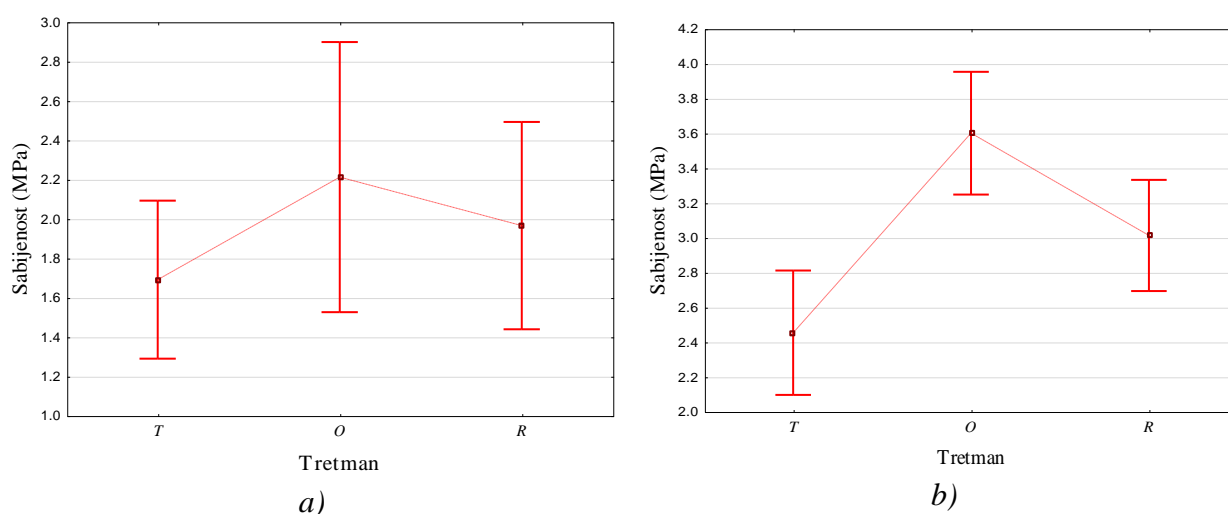
Radi mogućeg poređenja sa ostalim parametrima zemljišta koji su određeni na osnovu uzoraka uzetih iz dva sloja, podaci o sabijenosti po slojevima su takođe objedinjeni i podeljeni



u dva sloja. Poređenje srednjih vrednosti rađeno je pomoću Duncan-ovog testa na nivo značajnosti 95% (tab. 33).

Tab. 33. Poređenje sabijenosti zemljišta po tretmanima i po slojevima

		Sabijenost (MPa)	
		Sloj	
Tretman	T	0,93 <sup>a</sup>	2,45 <sup>a</sup>
	O	0,82 <sup>a</sup>	3,60 <sup>c</sup>
	R	0,92 <sup>a</sup>	3,01 <sup>b</sup>



Sl. 110. Grafički prikaz srednjih vrednosti sabijenosti zemljišta po tretmanima:

a - sloj 0-15 cm; b - sloj 15,1-30 cm

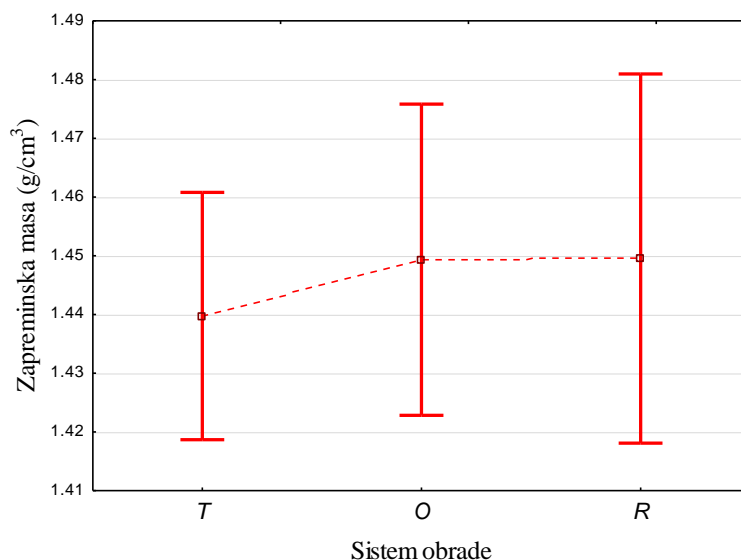
Iz tabele 33 se može konstatovati da u sloju od 0-15 cm nema statistički značajnih razlika u sabijenosti u odnosu na tretmane. U sloju od 15,1-30 cm sabijenost je različita za sve tretmane. Najveća srednja vrednost je na tretmanu oranje (3,6 MPa) u sloju 15,1-30 cm, a najmanja na istom tretmanu (0,82 MPa) ali u sloju od 0-15 cm. Na slici 110 dat je prikaz srednjih vrednosti sabijenosti zemljišta sa intervalima poverenja na nivou značajnosti od 95%.

Poređenje vrednosti zapreminske mase na varijantama ogleda obavljeno je primenom Duncan-ovog testa sa pragom značajnosti od 5%. Iz tabele 34 se može konstatovati da ne postoji statistički značajna razlika u izmerenim prosečnim vrednostima zapreminske mase u odnosu na tretmane. Dobijene prosečne vrednosti su veoma slične za sve tretmane, na tanjiranom je nešto manja (1,44 g/cm<sup>3</sup>) u odnosu na orano i razrivano (1,45 g/cm<sup>3</sup>). Najveća varijabilnost zapreminske mase zabeležena je na razrivanom delu parcele (3,03%), a najmanja na tanjiranom (2,04%) što se može zaključiti i sa grafika 111.



Tab. 34. Deskriptivni pokazatelji parametra zapreminske masa po tretmanima

Tretman	Zapreminska masa ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )				
	Sr. vred.	St. dev.	CV	Min	Max
T	1,44 <sup>a</sup>	0,029	2,04	1,40	1,48
O	1,45 <sup>a</sup>	0,037	2,56	1,38	1,51
R	1,45 <sup>a</sup>	0,044	3,03	1,37	1,54

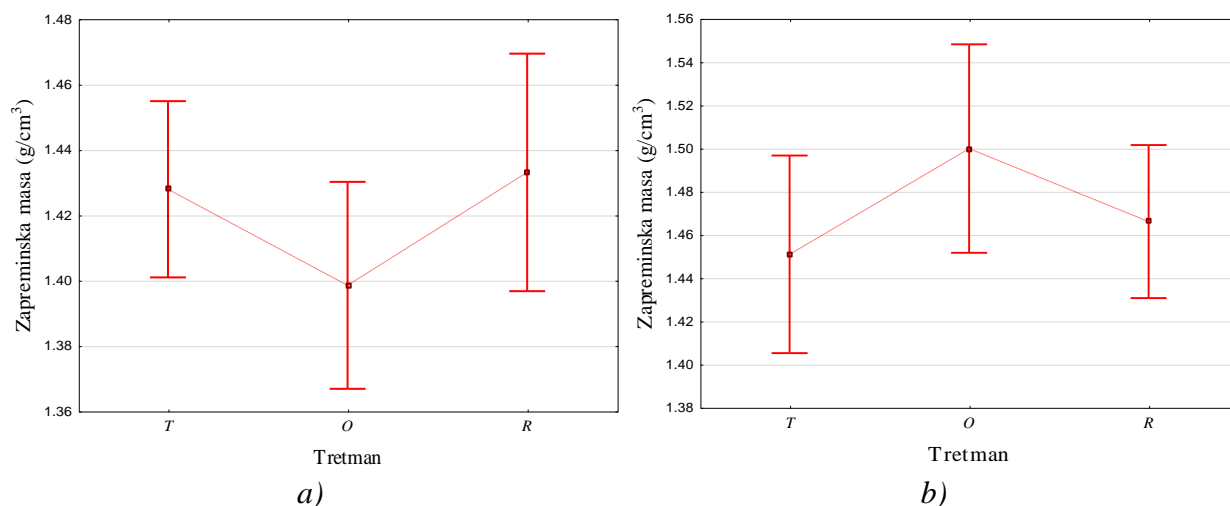


Sl. 111. Grafički prikaz srednjih vrednosti zapreminske mase zemljišta po tretmanima sa intervalima poverenja

Poređenje srednjih vrednosti po slojevima je rađeno pomoću Duncan-ovog testa na nivou značajnosti 5% (tab. 35). Iz tabele 35 može se konstatovati da u oba sloja nema statistički značajne razlike u zapreminskoj masi gledano po tretmanima. Vrednosti su vrlo slične posmatrano i po tretmanim i po slojevima. Srednje vrednosti i varijabilnosti zapreminske mase po tretmanima prikazane su na slici 112. Poređenje vrednosti vlažnosti zemljišta iz uzoraka na varijantama oglada obavljeno je primenom Duncan-ovog testa sa pragom značajnosti od 5%. Iz tabele 36 se može zaključiti da postoji statistički značajna razlika u izmerenim prosečnim vrednostima vlažnosti između varijanti oglada.

Tab. 35. Zapreminska masa po slojevima za svaki tretman

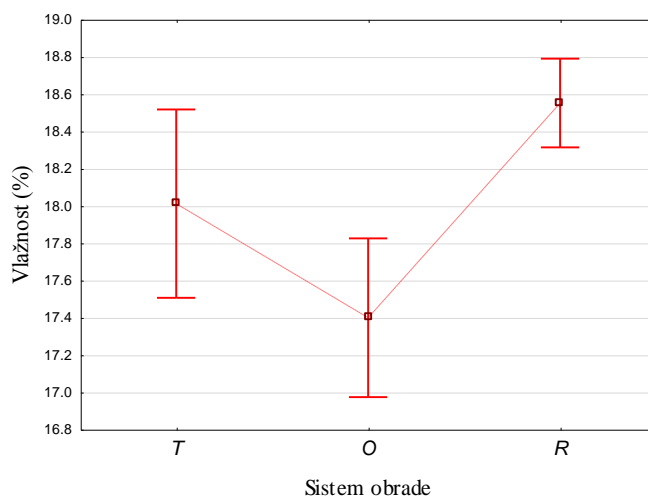
Sloj (cm)	Zapreminska masa ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		
	0-15 cm	15,1-30 cm	
Tretman	T	1,42 <sup>a</sup>	1,45 <sup>a</sup>
	O	1,40 <sup>a</sup>	1,49 <sup>a</sup>
	R	1,43 <sup>a</sup>	1,46 <sup>a</sup>



Sl. 112. Grafički prikaz srednjih vrednosti zapreminske mase zemljišta po tretmanima:

a - sloj 0-15 cm; b - sloj 15,1-30 cm

Najveća vlaga izmerena je na razrivanom zemljištu (18,55%), a najmanja na oranom (17,40%). Najveća varijabilnost vlažnosti zemljišta izmerena je na tanjiranom delu parcele (3,93%), a najmanja na razrivanom (1,79%) što se može primetiti i na grafiku 113 srednjih vrednosti sa intervalima poverenja.



Sl. 113. Grafički prikaz srednjih vrednosti vlažnosti zemljišta po tretmanima sa intervalima poverenja

Tab. 36. Statistički pokazatelji parametra vlažnosti zemljišta po tretmanima

Tretman	Vlažnost zemljišta (%)				
	Sr. vred.	St. dev.	CV	Min	Max
T	18,01 <sup>b</sup>	0,71	3,93	16,88	18,89
O	17,40 <sup>a</sup>	0,60	3,42	16,54	18,31
R	18,55 <sup>c</sup>	0,33	1,79	17,99	19,00



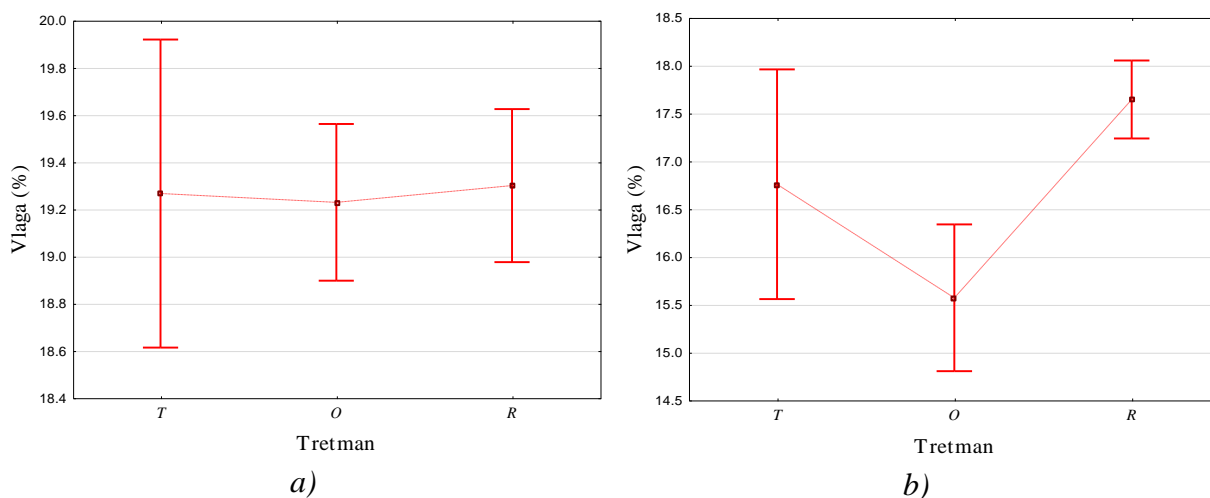


Poređenjem srednjih vrednosti vlažnosti u slojevima pomoću Duncan-ovog testa na nivou značajnosti 5% (tab. 37), može se konstatovati da u sloju 0-15 cm nema statistički značajnih razlika u vlažnosti zemljišta u odnosu na tretmane.

Tab. 37. Vlažnost zemljišta po slojevima za svaki tretman

Sloj (cm)		Vlažnost zemljišta (%)	
		0-15 cm	15,1-30 cm
Tretman	T	19,26 <sup>a</sup>	16,75 <sup>b</sup>
	O	19,23 <sup>a</sup>	15,57 <sup>a</sup>
	R	19,29 <sup>a</sup>	17,64 <sup>b</sup>

U sloju 15,1-30 cm postoji statistički značajna razlika između vlažnosti na oranom zemljištu u odnosu na tanjirano i razrivano. Najveća srednja vrednost je izmerena na tretmanu razrivanje (19,29%) u sloju 0-15 cm, a najmanja na oranom (15,57%) u sloju od 15,1-30 cm. Na slici 114 su prikazane srednje vrednosti vlage u zemljištu sa intervalima poverenja.



Sl. 114. Grafički prikaz srednjih vrednosti vlažnosti zemljišta po tretmanima:

a - sloj 0-15 cm; b - sloj 15,1-30 cm

Poređenje vrednosti mehaničkog sastava zemljišta iz uzoraka na varijantama oglada obavljeno je primenom Duncan-ovog testa na pragu značajnosti od 5%. Iz tabele 38 se može zaključiti da udeli frakcije peska i praha na svim tretmanima nemaju statistički značajnu razliku, dok se udeo gline razlikuje na tanjiranom u odnosu na oranom, a na razrivanom je udeo sličan sa ostala dva tretmana. Varijabilnost svih merenih parametara se kretala u

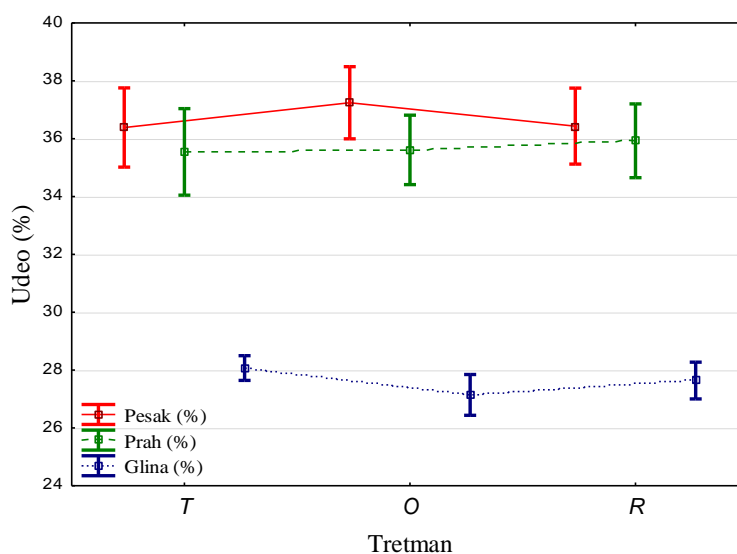


granicama od 2,55% u slučaju udela gline na tanjiranom zemljištu do 5,9% u slučaju udela praha na tanjiranom zemljištu.

Tab. 38. Statistički pokazatelji mehaničkog sastava zemljišta po tretmanima

Frakcija	Tretman	Mehanički sastav (%)				
		Sr. vred.	St. dev.	CV	Min	Max
Pesak	T	36,38 <sup>a</sup>	1,95	5,35	33,28	39,60
	O	37,24 <sup>a</sup>	1,84	4,93	32,84	40,76
	R	36,4 <sup>a</sup>	1,95	5,36	33,76	40,64
Prah	T	35,54 <sup>a</sup>	2,10	5,90	31,44	38,24
	O	35,61 <sup>a</sup>	1,75	4,91	32,12	38,00
	R	35,92 <sup>a</sup>	1,82	5,06	31,76	38,04
Glina	T	28,07 <sup>b</sup>	0,71	2,55	26,04	29,48
	O	27,14 <sup>a</sup>	1,07	3,93	25,36	29,52
	R	27,64 <sup>ab</sup>	1,04	3,76	26,24	30,52

Grafički prikaz srednjih vrednosti sa intervalima poverenja na nivou poverenja od 95% prikazan je na slici 115.



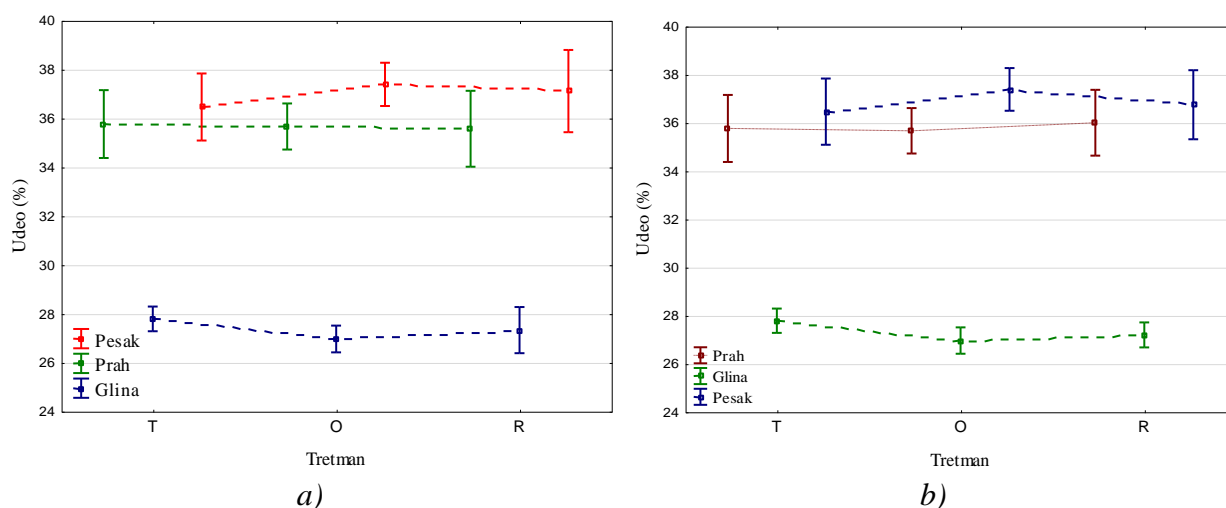
Sl. 115. Grafički prikaz srednjih vrednosti udela pojedinih frakcija u zemljištu po tretmanima sa intervalima poverenja

Poređenjem srednjih vrednosti mehaničkog sastava u slojevima pomoću Duncan-ovog testa na nivou značajnosti 0,05 (tab. 39), može se konstatovati da u oba sloja nema statistički značajne razlike u udelu frakcija na svim tretmanima. Na slici 116 su prikazane srednje vrednosti vlage u zemljištu sa intervalima poverenja na nivou poverenja od 95%.



Tab. 39. Mehanički sastav zemljišta po slojevima za svaki tretman

Frakcija	Tretman	Sloj (cm)	
		0-15 cm	15,1-30 cm
Pesak (%)	T	36,45 <sup>a</sup>	36,32 <sup>a</sup>
	O	37,38 <sup>a</sup>	37,11 <sup>a</sup>
	R	37,11 <sup>a</sup>	36,05 <sup>a</sup>
Prah (%)	T	35,76 <sup>a</sup>	35,32 <sup>a</sup>
	O	35,66 <sup>a</sup>	35,56 <sup>a</sup>
	R	35,56 <sup>a</sup>	35,86 <sup>a</sup>
Glina (%)	T	27,78 <sup>a</sup>	28,35 <sup>a</sup>
	O	26,96 <sup>a</sup>	27,32 <sup>a</sup>
	R	27,32 <sup>a</sup>	28,08 <sup>a</sup>



Sl. 116. Grafički prikaz srednjih vrednosti udela gline, praha i peska u zemljištu po tretmanima:

a - sloj 0-15 cm; b-sloj 15,1-30 cm

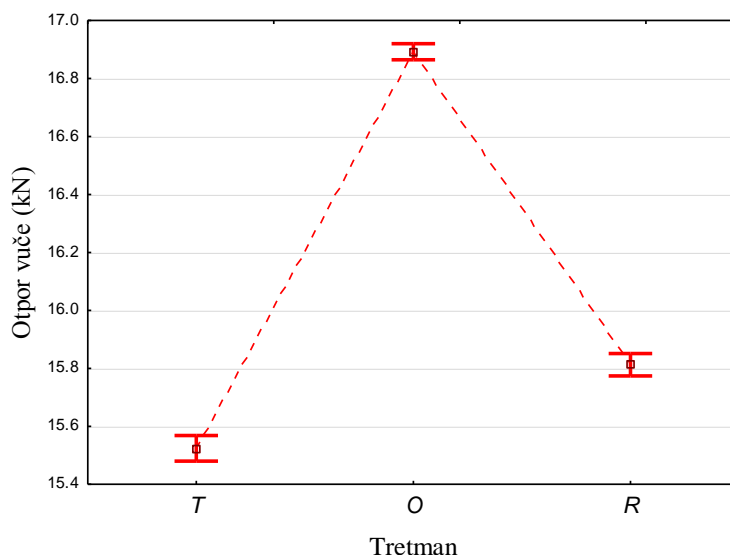
### 7.3.2. Analiza podataka otpora vuče i klizanja pogonskog točka po tretmanima

Analiza varijanse po Duncan-ovom testu ukazuje da postoji statistički značajna razlika u otporima vuče između svih tretmana sa pragom značajnosti od 5% (tab. 40). Najveća srednja vrednost otpora vuče je dobijena na oranom zemljištu (16,90 kN), pa na razrivanom (15,81 kN) i najmanja vrednost je dobijena na tanjiranom zemljištu (15,52 kN). Najveća varijabilnost je ustanovljena na tanjiranom tretmanu (14,99%), a najmanja na oranom (8,40%). Minimalna vrednost otpora vuče izmerena je na tanjiranom (9,50 kN), a maksimalna na oranom (22,70 kN). Na slici 117 su prikazane srednje vrednosti otpora vuče u odnosu na tretmane sa intervalima poverenja na nivou poverenja od 95%.



Tab. 40. Prosečne vrednosti otpora vuče po tretmanima

Tretman	Sr. vred.	Otpor vuče (kN)			
		St. dev.	CV	Min	Max
T	15,52 <sup>a</sup>	2,33	14,99	9,50	21,91
O	16,90 <sup>c</sup>	1,42	8,40	11,82	22,70
R	15,81 <sup>b</sup>	1,98	12,53	10,05	21,11



Sl. 117. Grafički prikaz srednjih vrednosti otpora vuče raonog pluga po tretmanima sa intervalima poverenja

Otpor vuče posmatrano po tretmanima za svaki prohod zasebno, imao je različite karaktere. Na tanjiranom (tretman "T"), srednje vrednosti otpora vuče po prohodima se statistički značajno razlikuju (Duncan-ov test sa razlikom od 5%), osim u slučaju 9. i 10. prohoda kod kojih su otpori u istim klasama (tab. 41). Najveći prosečni otpor vuče postignut je u 6. prohodu (18,94 kN), a najveća varijabilnost u 10. prohodu (15,65%). Minimalna vrednost otpora vuče izmerena je u 7. prohodu (7,73 kN), a maksimalna u 6. (21,99 kN).

Srednje vrednosti otpora vuče na tretmanu oranje ("O") po prohodima se međusobno statistički razlikuju na nivou poverenja od 95% (tab. 42). Najveći prosečni otpor vuče postignut je u 4. prohodu (18,13 kN), a najveća varijabilnost u 8. prohodu (8,45%). Minimalna vrednost izmerena je u 3. prohodu (10,39 kN), a maksimalna u 1. (22,76 kN). U poređenju sa prethodnim tretmanom, primetne su veće prosečne vrednosti, kao i manje varijacije.



Tab. 41. Otpori vuče po prohodima na tretmanu "T" (tanjiranje)

Prohod	Otpor vuče (kN)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sr. vred.	17,01 <sup>f</sup>	17,32 <sup>h</sup>	17,13 <sup>g</sup>	13,96 <sup>c</sup>	14,40 <sup>d</sup>	18,94 <sup>i</sup>	13,19 <sup>a</sup>	13,54 <sup>b</sup>	14,87 <sup>e</sup>	14,86 <sup>c</sup>
St. dev.	1,32	0,99	0,80	0,87	1,28	2,25	0,96	1,61	1,04	2,32
CV	7,77	5,72	4,68	6,24	8,91	11,86	7,28	11,90	7,02	15,64
Min	14,21	12,70	15,73	11,90	11,03	10,66	7,73	9,49	12,51	10,00
Max	19,76	18,66	19,47	16,01	17,09	21,99	16,31	17,33	17,58	21,65

Tab. 42. Otpori vuče po prohodima na tretmanu "O" (oranje)

Prohod	Otpor vuče (kN)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sr. vred.	17,89 <sup>i</sup>	16,16 <sup>b</sup>	16,58 <sup>d</sup>	18,13 <sup>j</sup>	17,54 <sup>h</sup>	16,85 <sup>f</sup>	15,74 <sup>a</sup>	17,02 <sup>g</sup>	16,71 <sup>e</sup>	16,37 <sup>c</sup>
St. dev.	1,35	0,96	0,86	1,54	0,93	1,36	0,96	1,44	1,32	1,28
CV	7,57	5,96	5,22	8,48	5,28	8,09	6,07	8,45	7,89	7,84
Min	15,68	13,26	10,39	12,57	16,13	13,68	13,73	14,11	12,08	12,03
Max	22,76	17,95	17,92	20,54	19,72	19,05	17,72	19,61	18,34	18,69

Tab. 43. Otpori vuče po prohodima na tretmanu "R" (razrivanje)

Prohod	Otpor vuče (kN)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sr. vred.	16,41 <sup>c</sup>	18,13 <sup>g</sup>	15,34 <sup>c</sup>	14,71 <sup>b</sup>	14,51 <sup>a</sup>	14,42 <sup>a</sup>	15,58 <sup>d</sup>	14,54 <sup>ab</sup>	17,76 <sup>f</sup>	15,22 <sup>c</sup>
St. dev.	1,45	0,86	1,44	1,18	0,89	1,69	1,04	1,38	1,39	2,80
CV	8,87	4,50	9,38	8,02	6,04	11,56	6,58	9,28	7,85	18,41
Min	14,00	15,61	12,54	12,43	12,44	9,69	10,52	12,11	14,10	10,12
Max	20,75	20,75	17,47	17,40	16,55	17,79	18,28	18,84	20,32	21,63

Srednje vrednosti otpora vuče na tretmanu oranje ("R") po prohodima se međusobno statistički razlikuju na nivou poverenja od 95% (tab. 43), izuzev 5. i 6., odnosno 3. i 10. koji pripadaju istoj klasi. Prohod 8 je statistički sličan prohodima 4, 5 i 6. Najveći otpor vuče postignut je u 2. prohodima (18,13 kN), a najveća varijabilnost u 10. prohodima (18,41%). Minimalna vrednost izmerena je u 6. prohodima (9,69 kN), a maksimalna u 10. (21,63 kN).

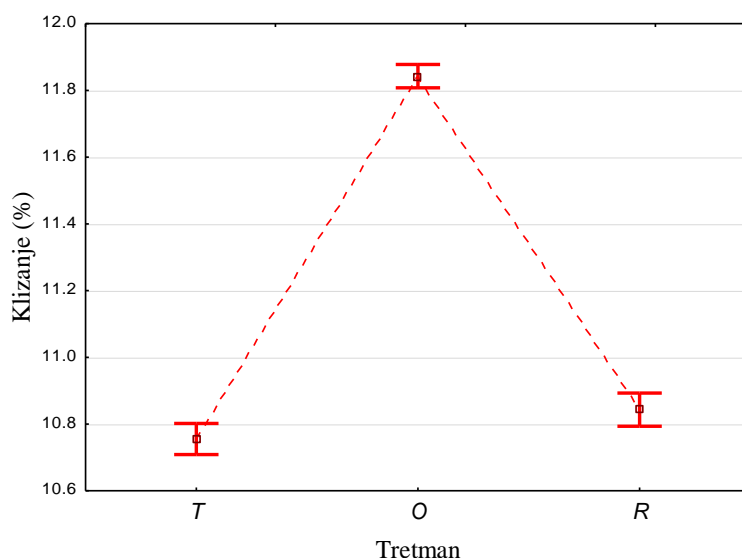
Analiza varijanse po Duncan-ovom testu ukazuje da postoji statistički značajna razlika u klizanju pogonskog točka u odnosu na tretmane na pragu značajnosti od 5% (tab. 44). Najveća srednja vrednost klizanja dobijena je na oranom zemljištu (11,84%), pa na razrivanom (10,84%) i najmanja na tanjiranom zemljištu (10,74%). Najveća varijabilnost je ustanovljena na tanjiranom tretmanu (22,68%), a najmanja na oranom (15,26%). Minimalna vrednost klizanja izmerena je na tanjiranom (3,82%), a maksimalna na oranom (20,50%). Na



slici 118 su prikazane srednje vrednosti klizanja točka u odnosu na tretmane sa intervalima poverenja.

Tab. 44. Prosečne vrednosti klizanja pogonskog točka po tretmanima

Tretman	Sr. vred.	St. dev.	CV	Min	Max
T	10,74 <sup>a</sup>	2,43	22,68	3,82	18,05
O	11,84 <sup>c</sup>	1,81	15,26	4,95	20,50
R	10,84 <sup>b</sup>	1,86	17,74	5,68	17,89



Sl. 118. Grafički prikaz srednjih vrednosti klizanja pogonskog točka po tretmanima sa intervalima poverenja

Na osnovu rezultata poređenja vrednosti prema Duncan-ovom testu za nivo poverenja od 95%, utvrđeno je da se srednje vrednosti klizanja točka statistički razlikuju međusobom, posmatrano za svaki prohod pojedinačno na tretmanu "T" (tab. 45).

Tab. 45. Klizanje pogonskog točka po prohodima na pretretmanu "T" (tanjiranje)

Prohod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sr. vred.	12,38 <sup>h</sup>	12,63 <sup>i</sup>	12,92 <sup>j</sup>	9,44 <sup>c</sup>	8,38 <sup>a</sup>	11,90 <sup>g</sup>	9,04 <sup>b</sup>	9,78 <sup>d</sup>	10,06 <sup>e</sup>	10,99 <sup>f</sup>
St. dev.	1,82	2,27	2,34	1,67	1,82	2,16	1,27	1,30	1,54	2,60
CV	14,71	17,97	18,12	17,67	21,72	18,13	14,09	13,26	15,35	20,14
Min	8,04	8,47	8,05	5,44	3,81	6,82	6,15	6,67	2,48	6,23
Max	18,22	18,08	18,87	13,05	12,88	16,66	20,49	12,79	14,19	25,29



Najveća prosečna vrednost klizanja postignuta je u 3. prohodu (12,92%), a najveća varijabilnost u 10. prohodu (21,72%). Minimalna vrednost izmerena je u 9. prohodu (2,48%), a maksimalna u 5. (25,29%).

Na tretmanu "O" su utvrđene određene sličnosti u podacima. Srednje vrednosti klizanja u 10. prohodu su slične sa vrednostima iz 6. i 7. prohoda. Podaci iz 4, 5. i 9. prohoda pripadaju istoj klasi, tj. ne razlikuju se na nivou poverenja od 95% (tab. 46). Najveća prosečna vrednost klizanja na ovom tretmanu ("O") postignuta je u 1. prohodu (13,41%), a najveća varijabilnost u 3. prohodu (17,21%). Minimalna vrednost izmerena je u 10. prohodu (1,66%), a maksimalna u 3. (23,41%).

Tab. 46. Klizanje pogonskog točka na predtretmanu "O" (oranje)

Prohod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sr. vred.	13,41 <sup>g</sup>	12,65 <sup>f</sup>	11,74 <sup>d</sup>	12,24 <sup>e</sup>	12,22 <sup>c</sup>	11,26 <sup>c</sup>	11,10 <sup>b</sup>	10,41 <sup>a</sup>	12,16 <sup>e</sup>	11,16 <sup>bc</sup>
St. dev.	1,52	1,66	2,02	1,45	1,42	1,62	1,44	1,71	1,68	1,55
CV	11,37	13,12	17,21	11,83	11,64	14,43	12,95	16,42	13,78	13,88
Min	9,91	5,06	7,73	9,17	8,91	7,62	7,20	6,08	8,85	1,66
Max	17,05	16,25	23,41	16,49	15,72	15,53	15,66	14,09	17,38	13,97

Slično kao i na prethodnim tretmanima, klizanja po prohodima na tretmanu "R" se razlikuju, osim za prohode 3, 4 i 8 odnosno 9 i 10 (tab. 47). Podaci o klizanju u ostalim prohodima pripadaju posebnoj klasi, i ne može se govoriti o njihovoj međusobnoj povezanosti. Najveća srednja vrednost je zabeležena u 2. prohodu (12,82%), dok je najveća varijabilnost u 7 (29,82%). Minimalna (1,49%) i maksimalna (23,01%) vrednost klizanjaja registrovane su u 7. prohodu.

Tab. 47. Klizanje pogonskog točka na pretretmanu "R" (razrivanje)

Prohod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sr. vred.	11,74 <sup>e</sup>	12,82 <sup>g</sup>	10,40 <sup>b</sup>	10,17 <sup>b</sup>	9,36 <sup>a</sup>	11,15 <sup>f</sup>	11,18 <sup>d</sup>	10,28 <sup>b</sup>	11,72 <sup>e</sup>	10,80 <sup>c</sup>
St. dev.	2,05	1,73	1,63	2,53	1,91	1,81	3,33	2,41	1,85	1,92
CV	17,45	13,48	15,69	24,89	20,38	16,25	29,82	23,42	15,76	17,78
Min	2,88	8,71	6,32	4,57	2,88	6,58	1,49	3,96	7,01	7,03
Max	15,55	16,87	15,28	21,68	13,56	21,37	23,01	18,60	17,16	17,92

### 7.3.3. Komparativna analiza podataka za tretmane

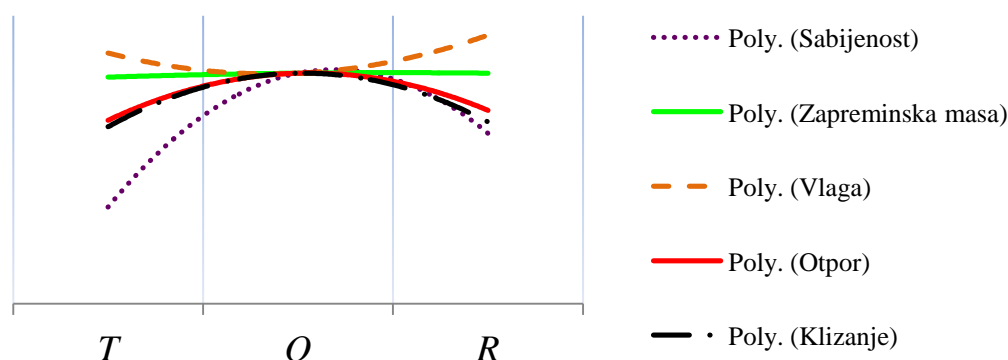
Radi lakšeg sagledavanja uticaja tretmana-prethodne obrade na vrednosti pokazatelja fizičkog stanja zemljišta, kao i uticaja na otpor vuče raonog pluga, odnosno klizanja



podataka, tokom merenja, obrađeni podaci su prikazani objedinjeno u tabeli 48. Isti podaci su prikazani grafički u vidu "trend" linija na slici 119. Podaci o mehaničkom sastavu nisu obuhvaćeni u ovom komparativnom prikazu, jer generalno nisu posledica primenjenog tretmana, nego prirodne nehomogenosti zemljišta.

Tab. 48. Komparativni prikaz merenja po prethodnoj obradi

	Tretman	Sabijenost (MPa)	Zapreminska masa ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Vlaga (%)	Otpor (kN)	Klizanje (%)
Sr. vred.	T	1,62 <sup>a</sup>	1,44 <sup>a</sup>	18,01 <sup>b</sup>	15,52 <sup>a</sup>	10,74 <sup>a</sup>
	O	2,11 <sup>b</sup>	1,45 <sup>a</sup>	17,40 <sup>a</sup>	16,90 <sup>b</sup>	11,84 <sup>c</sup>
	R	1,89 <sup>ab</sup>	1,45 <sup>a</sup>	18,55 <sup>c</sup>	15,81 <sup>a</sup>	10,84 <sup>b</sup>
St. dev.	T	0,26	0,03	0,71	2,33	2,43
	O	0,22	0,04	0,60	1,41	1,81
	R	0,27	0,04	0,33	1,98	1,84
CV	T	15,97	2,04	3,93	14,99	22,68
	O	10,39	2,56	3,42	8,40	15,26
	R	14,12	3,03	1,79	12,53	17,74



Sl. 119. Trendovi fizičkih parametara zemljišta u odnosu na tretmane

#### 7.3.4. Analiza parametara za konkretne geografske lokacije na nivou cele parcele

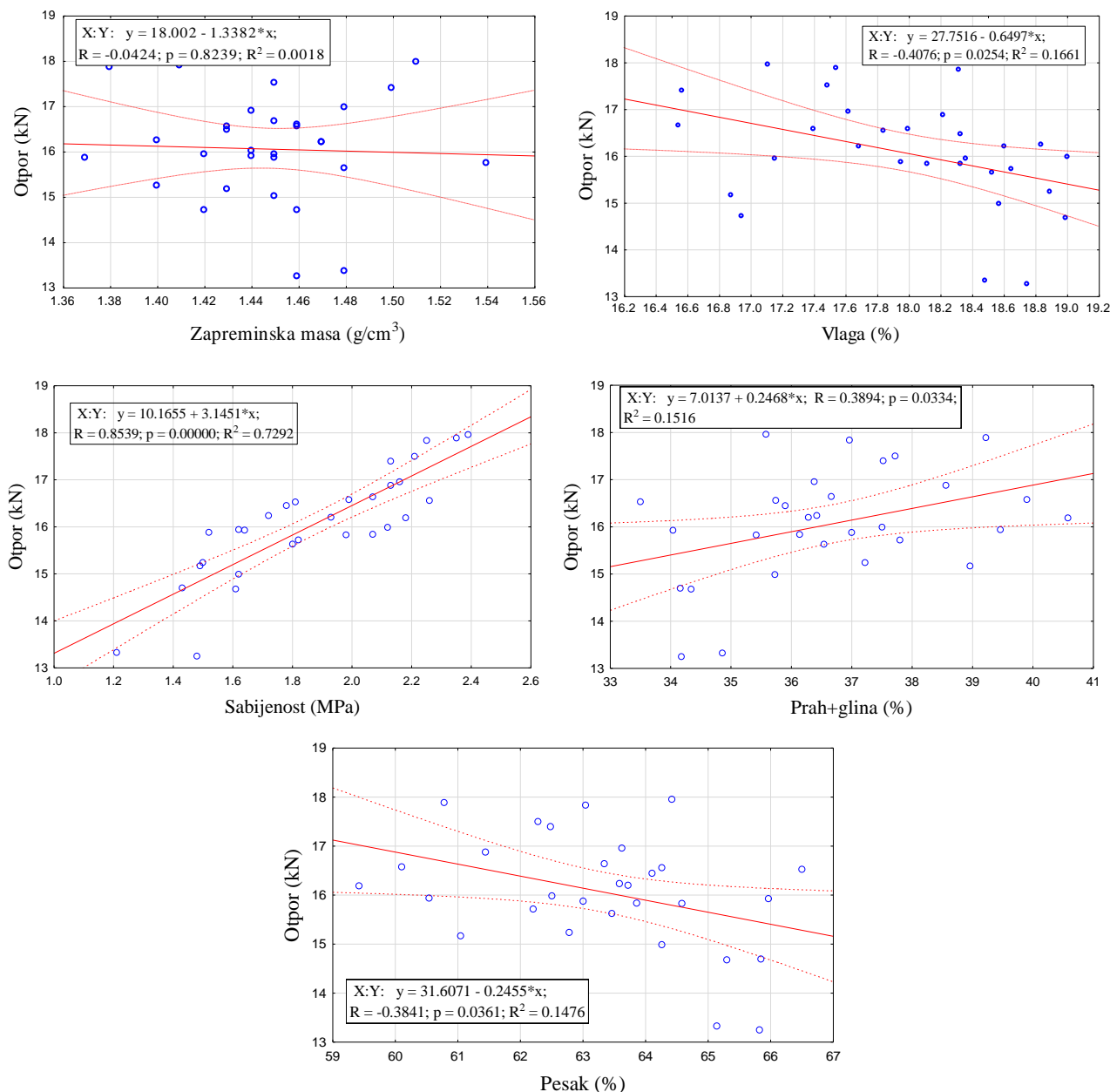
U cilju određivanja pouzdane relacije između posmatranih parametara, analiza podataka je obavljena metodom poređenja po kriterijumu zajedničke geografske lokacije (kontrolne tačke) u ovom slučaju neuzimajući u obzir tretmane. Obzirom da su podaci o otporu geografski određeni, izdvojene su samo one vrednosti koje su prostorno blizu kontrolnim tačkama. Za svaku kontrolnu tačku izračunata je prosečna vrednost otpora vuče koja je potom poređena sa vrednostima fizičkih osobina zemljišta iste lokacije. Iz analize su izostavljeni podaci o klizanju točka, jer je klizanje direktna posledica otpora vuče, što se vidi iz prethodne analize.





Frakcije zemljišta su podeljene u dve grupe, na finu (gprah+glina) i grubu (pesak). Prethodna analiza pokazala je da pojedinačne frakcije imaju prilično ujednačenu raspodelu po tretmanima, što ne mora da bude slučaj ukoliko se frakcije grupišu.

U tabeli 49, date su vrednosti Pirsonovog koeficijenta korelacije među posmatranim svojstvima u objedinjenom uzorku za sve tretmane.



Sl. 120. Korelacija otpora vuče sa parametrima fizičkih osobina zemljišta u zoni kontrolnih tačaka na nivou cele parcele

Na osnovu tabele 49 primećuje se da među podacima otpora vuče i sabijenosti zemljišta postoji jaka pozitivna korelacija ( $R=0,85$ ). Slaba pozitivna korelacija je prisutna između vrednosti udela praha sa glinom i otpora vuče ( $R=0,39$ ), kao i praha sa glinom i sabijenosti



( $R=0,36$ ). Slabe negativne korelacije postoje između otpora vuče i vlažnosti ( $R=-0,41$ ), otpora vuče i udela peska ( $R=-0,38$ ) i sabijenosti i udela peska ( $R=-0,36$ ).

Pomoću linearne regresije određeni su matematički modeli koji opisuju zavisnosti otpora vuče od fizičkih parametara zemljišta, kao i stepen determinacije ( $R^2$ ) za usvojene modele. Na slici 120, prikazani su grafici linearne regresije sa intervalima poverenja za modele. Na osnovu izračunatih vrednosti koeficijenta determinacije, može se konstatovati da se promena otpora vuče dobro opisuje prametrom sabijenosti zemljišta ( $R^2=0,73$ ). Za ostale modele može se konstatovati da slabo objašnjavaju promenu otpora vuče.

Tab. 49. Korelacija među posmatranim svojstvima u objedinjenom merenju

	Zapreminska masa ( $\text{g/cm}^3$ )	Vlaga (%)	Sabijenost (MPa)	Prah+glina (%)	Pesak (%)	Otpor vuče (kN)
Zapreminska masa ( $\text{g/cm}^3$ )	1,00	-0,26	0,02	-0,06	0,07	-0,04
Vlaga (%)	-0,26	1,00	-0,24	-0,04	0,03	-0,41
Sabijenost (MPa)	0,02	-0,24	1,00	0,36	-0,36	0,85
Prah+glina (%)	-0,06	-0,04	0,36	1,00	-1,00	0,39
Pesak (%)	0,07	0,03	-0,36	-1,00	1,00	-0,38
Otpor (kN)	-0,04	-0,41	0,85	0,39	-0,38	1,00

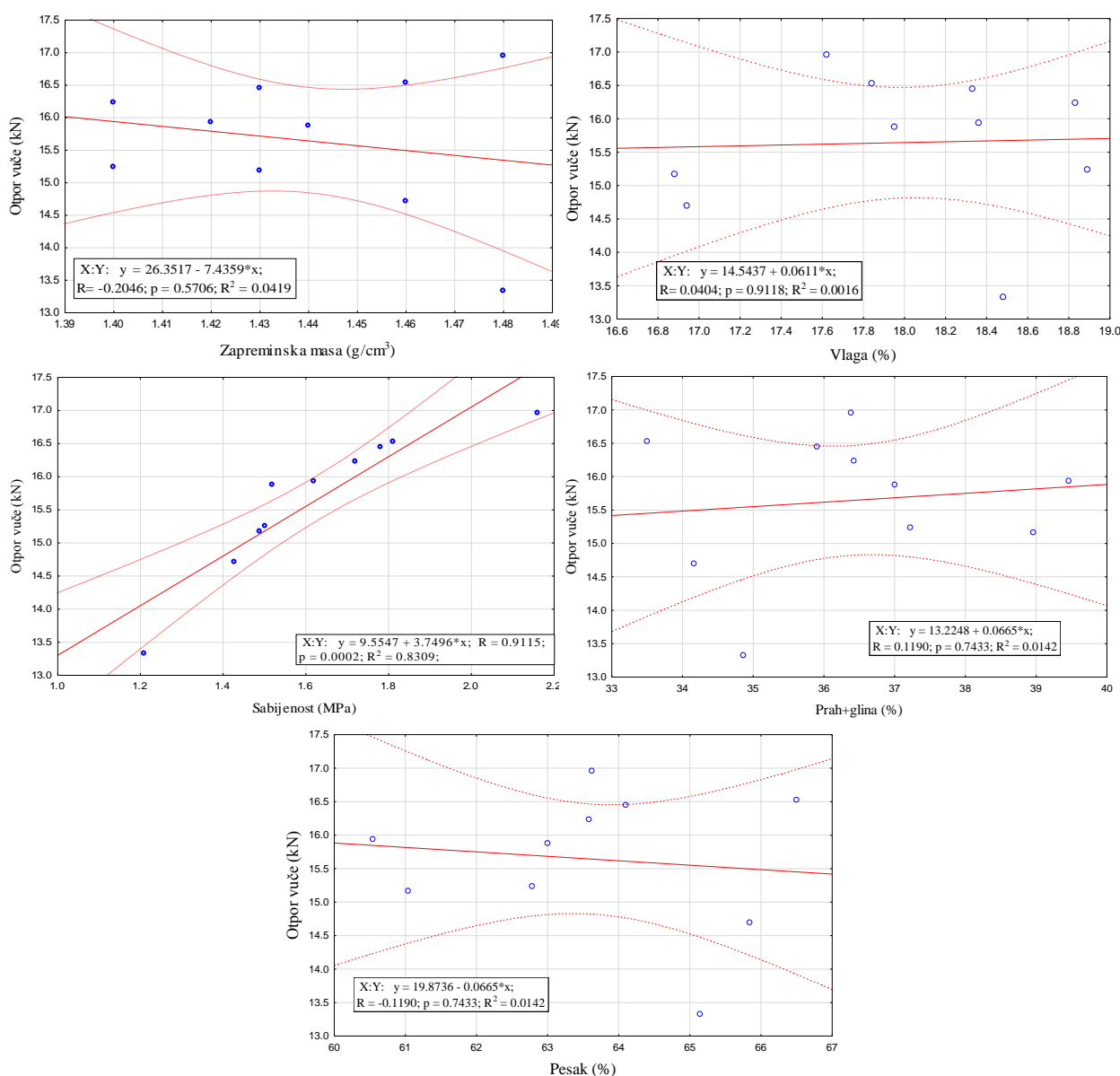
### 7.3.5. Analiza parametara za konkretne geografske lokacije po tretmanima

Kod ove analize, poređene je obavljeno po istom principu kao u prethodnom slučaju, s tim što su analize razdvojene za svaki tretman posebno. Cilj je bio da se utvrdi da li različita fizička stanja zemljišta imaju uticaj na korelacije otpora vuče sa fizičkim osobinama zemljišta. U tabeli 50, date su vrednosti Pirsonovog koeficijenta korelacije među posmatranim svojstvima za tretman tanjiranje. Evidentno je da među podacima otpora vuče i sabijenosti zemljišta postoji jaka pozitivna korelacija ( $R=0,91$ ). Slaba veza postoji između zapreminske mase i udela praha sa glinom ( $R=0,55$ ), odnosno zapreminske mase i udela peska ( $R=-0,55$ ). Nešto slabija negativna veza prisutna je između vlage i zapreminske mase ( $R=-0,47$ ).



Tab. 50. Korelacija među posmatranim svojstvima na tretmanu TANJIRANJE

	Zapreminska masa (g/cm <sup>3</sup> )	Vlaga (%)	Sabijenost (MPa)	Prah+glina (%)	Pesak (%)	Otpor (kN)
Zapreminska masa (g/cm <sup>3</sup> )	1,00	-0,47	0,08	0,55	-0,55	-0,20
Vlaga (%)	-0,47	1,00	-0,03	0,07	-0,07	0,04
Sabijenost (MPa)	0,08	-0,03	1,00	-0,02	0,02	0,91
Prah+glina (%)	0,55	0,07	-0,02	1,00	-1,00	0,12
Pesak (%)	-0,55	-0,07	0,02	-1,00	1,00	-0,12
Otpor (kN)	-0,20	0,04	0,91	0,12	-0,12	1,00

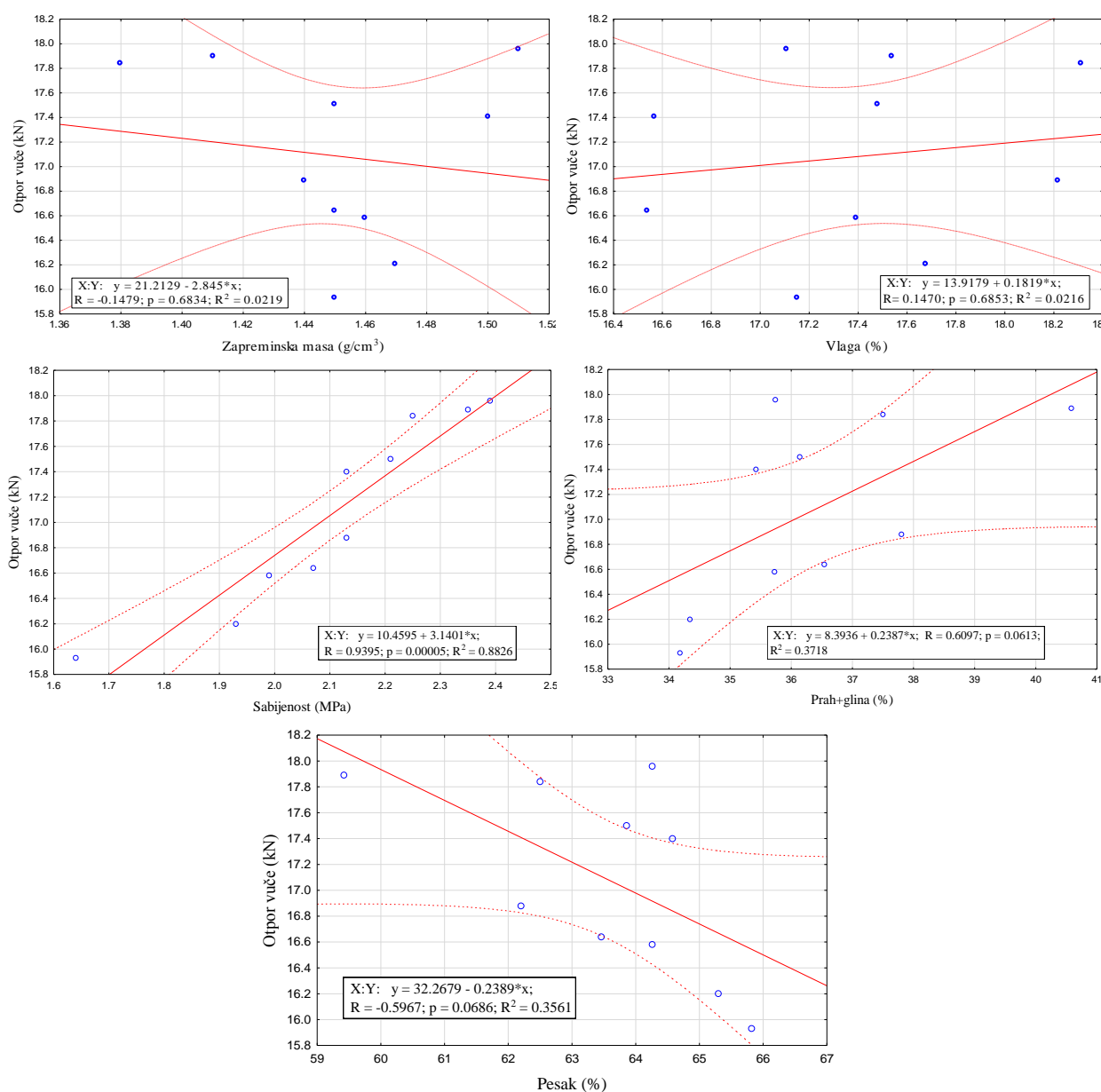


Sl. 121. Korelacija svojstva zemljišta u kontrolnim tačkama na tretmanu tanjiranje



Linearnom regresijom dobijeni su matematički modeli koji prikazuju zavisnosti otpora vuče od fizičkih parametara zemljišta i preciznost modela ( $R^2$ ) za tretman TANJIRANJE. Na slici 121, prikazani su grafici linearne regresije sa intervalima poverenja za modele. Na osnovu izračunatih vrednosti koeficijenta determinacije, može se konstatovati da se promena otpora vuče dobro opisuje linearnim modelom preko parametra sabijenosti zemljišta (83%). Za stale modele se može konstatovati da slabo objašnjavaju promenu otpora vuče.

U tabeli 51, date su vrednosti Pirsonovog koeficijenta korelacije među posmatranim svojstvima za tretman ORANJE.



Sl. 122. Korelacija parametara u kontrolnim tačkama na tretmanu oranje



Primetno je da među podacima otpora vuče i sabijenosti zemljišta postoji jaka pozitivna korelacija ( $R=0,94$ ). Slaba pozitivna korelacija prisutna je između vrednosti udela praha sa glinom i sabijenosti ( $R=0,66$ ), udela praha sa glinom i otpora vuče ( $R=0,61$ ). Slaba negativna veza utvrđena je između zapreminske mase i vlage ( $R=-0,64$ )

Tab. 51. Korelacija među posmatranim svojstvima na tretmanu ORANJE

	Zapreminska masa ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Vlaga (%)	Sabijenost (MPa)	Prah+glina (%)	Pesak (%)	Otpor (kN)
Zapreminska masa ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,00	-0,64	-0,09	-0,61	0,61	-0,15
Vlaga (%)	-0,64	1,00	0,16	0,36	-0,37	0,15
Sabijenost (MPa)	-0,09	0,16	1,00	0,66	-0,65	0,94
Prah+glina (%)	-0,61	0,36	0,66	1,00	-1,00	0,61
Pesak (%)	0,61	-0,37	-0,66	-1,00	1,00	-0,61
Otpor (kN)	-0,15	0,15	0,94	0,61	-0,61	1,00

Regresiona analiza podataka za tretman ORANJE. (sl. 122) pokazuje da se promena otpora vuče dobro opisuje linearnim modelom preko parametra sabijenosti zemljišta (88%). Ostali modeli slabo objašnjavaju promenu otpora vuče, pa prema tome, za te faktore se ne može reći da imaju direktan uticaj na promenu otpora.

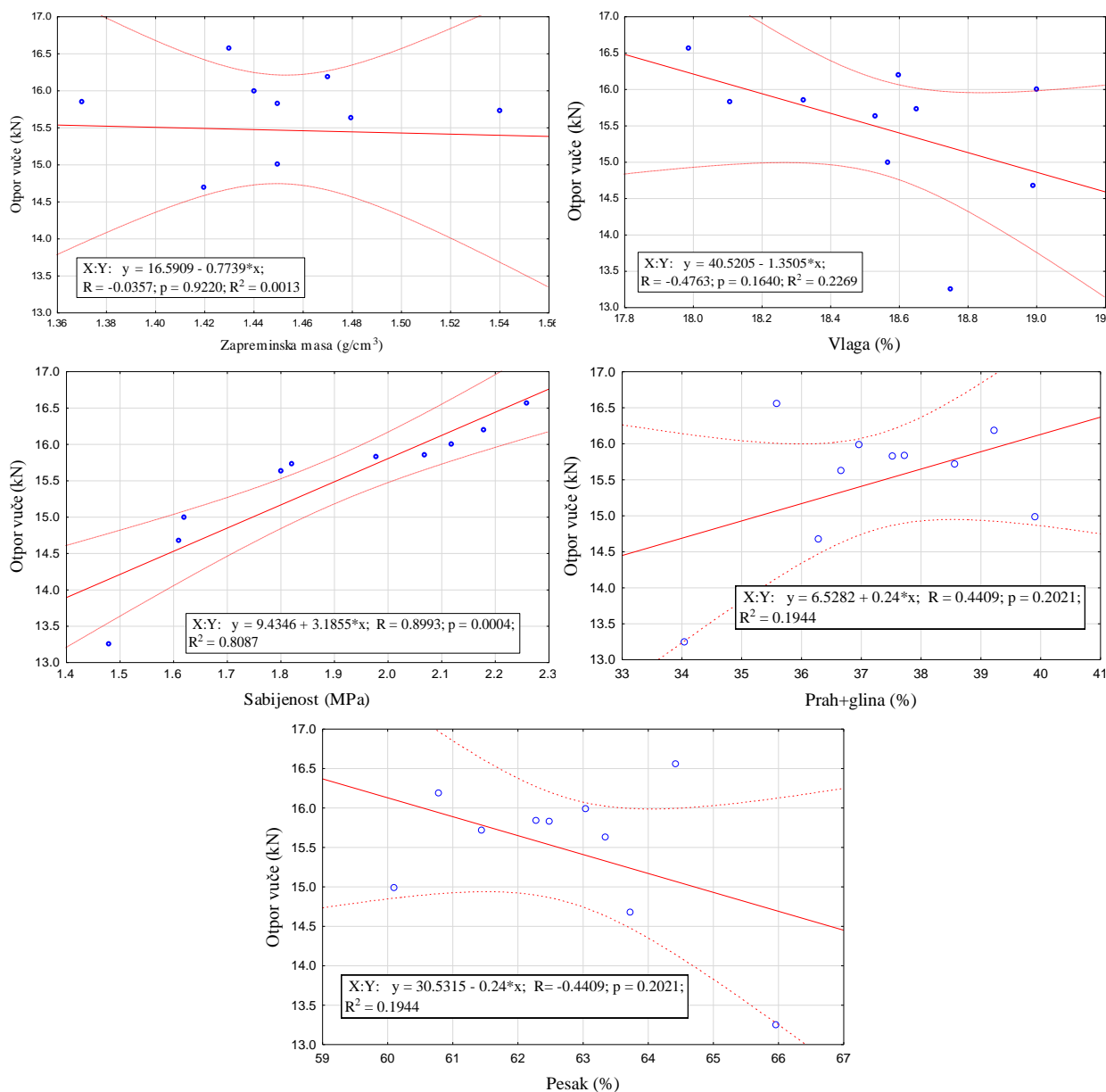
U tabeli 52, date su vrednosti Pirsonovog koeficijenta korelacije među posmatranim svojstvima na tretmanu RAZRIVANJE.

Tab. 52. Korelacija među posmatranim svojstvima na tretmanu RAZRIVANJE

	Zapreminska masa ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Vlaga (%)	Sabijenost (MPa)	Prah+glina (%)	Pesak (%)	Otpor (kN)
Zapreminska masa ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,00	-0,05	-0,22	0,20	-0,20	-0,04
Vlaga (%)	-0,05	1,00	0,18	-0,06	0,06	0,09
Sabijenost (MPa)	-0,22	0,18	1,00	0,20	-0,20	0,90
Prah+glina (%)	0,20	-0,06	0,20	1,00	-1,00	0,44
Pesak (%)	-0,20	0,06	-0,20	-1,00	1,00	-0,44
Otpor (kN)	-0,04	0,09	0,90	0,44	-0,44	1,00



Može se zaključiti da među podacima otpora vuče i sabijenosti zemljišta postoji jaka pozitivna korelacija ( $R=0,90$ ). Slabe korelacije prisutne su između udela peska i otpora vuče ( $R=-0,44$ ), odnosno udela praha sa glinom i otpora vuče ( $R=0,44$ ).



Sl. 123. Korelacija parametara u kontrolnim tačkama na tretmanu razrivanje

Na slici 123, prikazani su grafici linearne regresije sa intervalima poverenja za modele. Na osnovu izračunatih vrednosti koeficijenta determinacije, može se konstatovati da se promena otpora vuče dobro opisuje linearnim modelom preko parametra sabijenosti zemljišta (81%). Ostali modeli zavisnosti otpora od fizičkih osobina slabo objašnjavaju njihovu povezanost.



Srednje vrednosti otpora zemljišta (kN), zapreminske mase ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), vlage (%), sabijenosti (MPa), količine peska (%) i praha sa glinom (%) izmerene u kontrolnim tačkama na različitim tretmanima su poređene statističkom metodom analize varijansi (ANOVA), za šta je korišćen je Duncan-ov test sa 5% rizika. Rezultati su prikazani u tabeli 53, gde je pored srednjih vrednosti naznačeno kojim klasama pripadaju. Statistički značajna bliskost između srednjih vrednosti u sva tri načina obrade je potvrđena u slučaju zapreminske mase, peska i praha sa glinom. Takođe, srednja vrednost otpora, vlažnost zemljišta, odnosno srednja vrednost sabijenosti na tretmanu TANJIRANJE se statistički značajno razlikuju od dobijenih srednjih vrednosti na druga dva tretmana.

Tab. 53. Poređenje uprosečenih vrednosti merenih parametara u kontrolnim tačkama

Tretman	Otpor (kN)	Zapr, masa ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Vlaga (%)	Sabijenost (MPa)	Pesak (%)	Prah+glina (%)
T	15,46 <sup>a</sup>	1,44 <sup>a</sup>	18,01 <sup>b</sup>	1,62 <sup>a</sup>	36,38 <sup>a</sup>	63,62 <sup>a</sup>
O	17,08 <sup>b</sup>	1,45 <sup>a</sup>	17,40 <sup>a</sup>	2,1 <sup>b</sup>	37,24 <sup>a</sup>	62,76 <sup>a</sup>
R	15,64 <sup>a</sup>	1,45 <sup>a</sup>	18,55 <sup>b</sup>	1,89 <sup>b</sup>	36,4 <sup>a</sup>	63,6 <sup>a</sup>

### 7.3.6. Semivariogramsko modelovanje geopodataka

Semivariogramska analiza omogućava uspostavljanje prostornih veza između vrednosti koje su izmerene na geografski definisanim lokacijama. Polazna osnova geostatističke analize je da su tačke koje se nalaze na malim prostornim udaljenostima jedna drugoj sličnije po merenom parametru u odnosu na one koje su udaljenije. U tom pravcu se izračunava semivariogramski model koji predviđa prostornu relaciju između prostornih parametara. Taj odnos je poznat pod nazivom variografija.

Kako bi se načinila kvalitetna prostorna predikcija nekog posmatranog parametra za potrebe kartografskog prikazivanja (mapiranja) neophodna je prethodna analiza sirovih podataka radi boljeg razumevanja istih. Prilikom pomenute analize neophodno je obratiti pažnju na vrednosti koje očigledno odstupaju od sredine osnovnog skupa. Ako se te vrednosti obuhvate tokom prostorne analize, moguće je da će se dobiti drastične negativne posledice po krajnji izgled predikcione površine. Iz tog razloga se posmatraju globalni trendovi podataka.

U postupku izrade mapa otpora vuče, klizanja točkova traktora kao i fizičkih parametara zemljišta (zapreminska masa, sabijenost i vlažnost) korišćeni su sledeći postupci provere sirovih podataka, i to:

- provera raspodele podaka,



- identifikacija prostornog trenda i
- razumevanje prostorne korelacije i pravca interakcije.

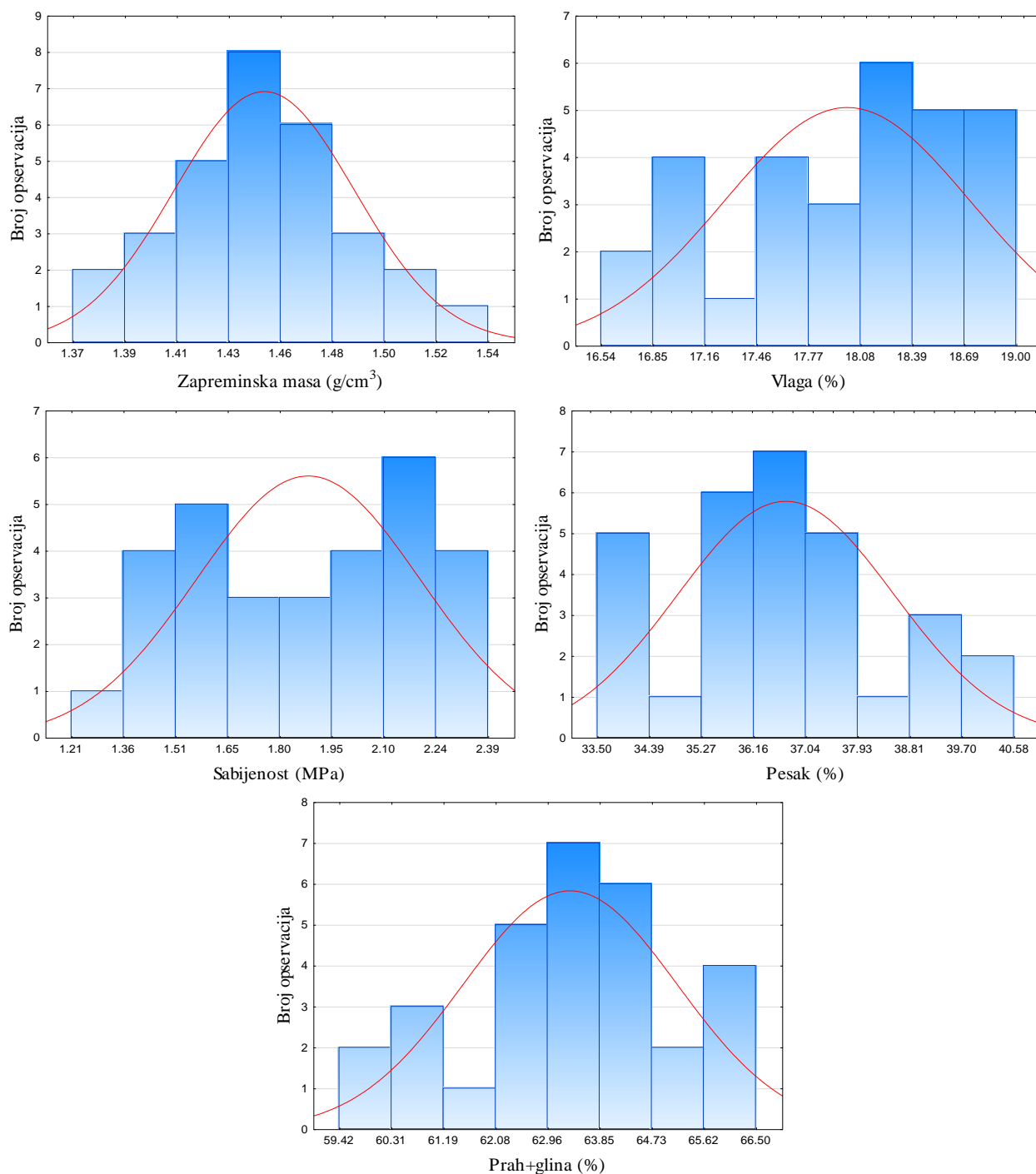
Metodi interpolacije podataka koji se koriste za generaciju mapa-karata daju najbolje rezultate ukoliko su podaci normalno raspoređeni (formiraju Gausovu krivu raspodele). Ukoliko je raspodela podataka asimetrična, odnosno spljoštena, obično se rade određene transformacije podataka kako bi se od istih dobila približno normalna distribucija. Veoma je važno razumeti distribuciju podataka pre samog postupka kreiranja mapa. U ovu svrhu se koristi histogramski prikaz vrednosti, koji omogućava ispitivanje normalnosti distribucije podataka za svako obeležje koje je bilo predmet istraživanja. U tabeli 54 prikazani su pokazatelji distribucije podataka za svako posmatrano obeležje.

Tab. 54. Statistički pokazatelji oblika distribucije podataka

	Zapreminska masa (g/cm <sup>3</sup> )	Vlaga (%)	Sabijenost (MPa)	Pesak (%)	Prah+glina (%)	Otpor (kN)	Klizanje (%)
Broj merenja	30	30	30	30	30	2732	2667
Min	1,37	16,45	1,21	33,5	59,42	9,5	3,82
Max	1,54	19	2,39	40,58	66,5	22,68	20,5
Sr. vred.	1,47	17,99	1,87	36,67	63,31	16,03	11,02
St. dev.	0,037	0,73	0,31	1,82	1,81	2,05	2,19
Asimetričnos t	0,14	-0,47	-0,18	0,27	-0,28	-0,04	0,13
Kurtosis	3,35	2,13	1,96	2,42	2,45	2,98	3,35
1. Quartile	1,43	17,48	1,61	35,58	62,28	14,63	9,62
Median	1,45	18,16	1,87	36,48	63,52	16,02	10,99
3. Quartile	1,47	18,57	2,13	37,72	64,42	17,36	12,41

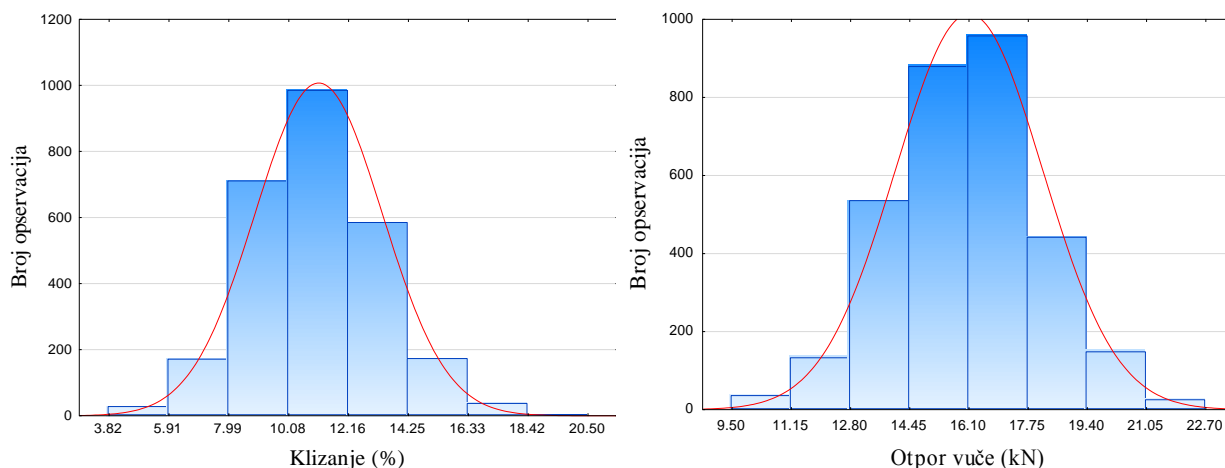
Na slici 124 prikazani su histogrami distribucije podataka na osnovu 30 uzoraka uzetih sa parcele na kojoj je između ostalog meren otpor vuče raonog pluga i klizanje pogonskog točka. Na osnovu slike se može zaključiti da najveću pravilnost imaju podaci zapreminske mase, dok podaci o sadržaju gline, praha i peska imaju delimično normalnu raspodelu. Podaci sabijenosti zemljišta imaju značajnu disperziju i daleko najviše odstupaju od normalne raspodele.





Sl. 124. Grafički prikaz distribucije podataka dobijenih iz malog uzorka

Slika 125 prikazuje histograme raspodele podataka otpora vuče i klizanja pogonskog točka. Može se reći da obe serije podataka imaju normalnu raspodelu. Podaci dobijeni iz velikog uzorka (klizanje i otpor vuče) imaju izraženu pravilnu raspodelu podataka, stoga se može reći da su njihove srednje vrednosti pouzdani pokazatelji centralne tendencije ovih parametra.

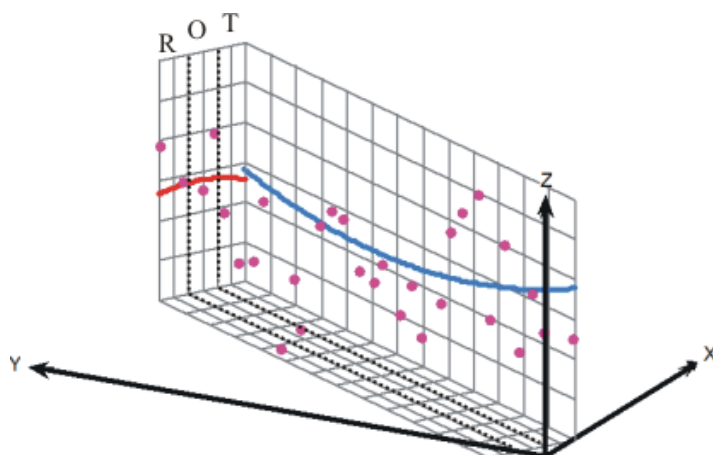


Sl. 125. Grafički prikaz distribucije podataka dobijenih iz velikog uzorka

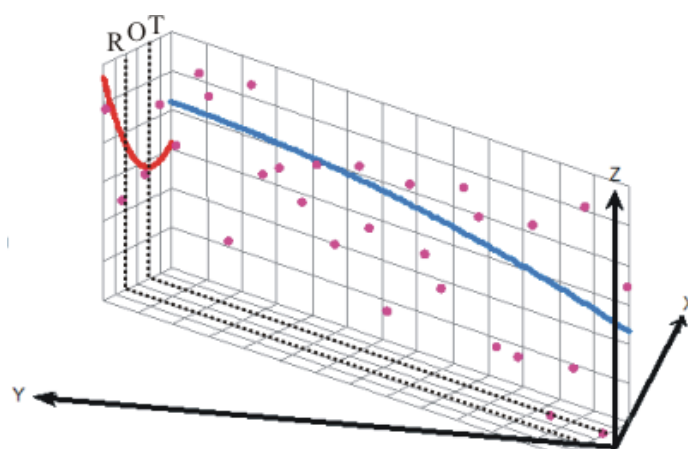
Ukoliko postoji trend podataka posmatranog obeležja, moguće je determinističke komponente tog obeležja predstaviti pomoću odgovarajućeg matematičkog modela. U nekim slučajevima matematički model podataka nije u mogućnosti da najtačnije opiše prostorne varijabilnosti, tj. aproksimacija je gruba. Analiza trenda omogućava identifikaciju globalnog trenda seta podataka. Ovim postupkom se podaci predstavljaju u trodimenzionoj perspektivi. Lokacije uzorkovanja-merenja se prikazuju u  $x$ - $y$  ravni, a trećom dimenzijom se prikazuje intenzitet promenljive. Jedinstvena karakteristika analize trenda je ta da se vrednosti projektuju na  $x$ - $z$  ravni i  $y$ - $z$  ravni.

U konkretnom slučaju, trendovi parametara biće prikazani po dužini (plava linija) i širini parcele (crvena linija). Osa  $x$  je pravac koji odgovara pravcu istok-zapad, a osa  $y$  pravcu sever-jug. Linije trenda predstavljene su polinomom drugog reda.

Aproksimacija trenda izmerenih vrednosti zapreminske mase na parceli prikazan je na slici 126. Sa slike se može uočiti da zapreminska masa posmatrano po širini parcele (po tretmanima) ima blago rastući trend od periferije (tanjirano i razrivano) prema sredini (oranom). Posmatrano po dužini, zapreminska masa idući sa krajeva opada prema sredini parcele. Aproksimacija trenda izmerenih vrednosti vlažnosti zemljišta na parceli prikazan je na slici 127. Sa slike se može uočiti da vlažnost zemljišta posmatrano po širini parcele (po tretmanima) ima blago rastući trend od sredine (orano) prema istočnom delu (tanjirano), odnosno jači porast prema zapadnom delu (razrivano). Posmatrano po dužini, vlažnost opada od severnog dela prema južnom delu parcele.

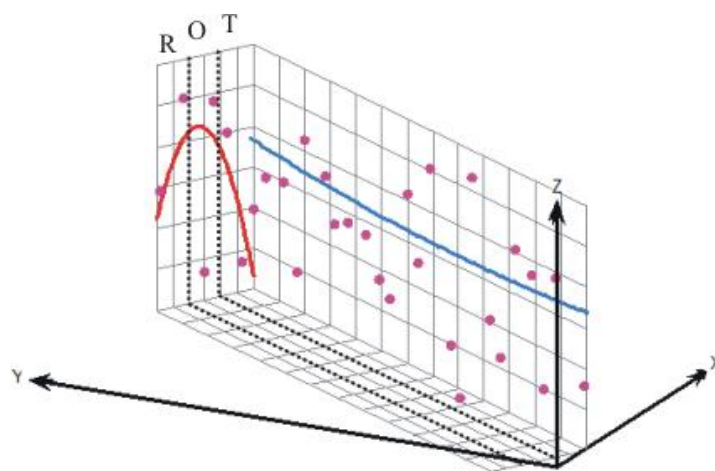


Sl. 126. Trendovi zapreminske mase po dužini i širini parcele



Sl. 127. Trendovi vlažnosti zemljišta po dužini i širini parcele

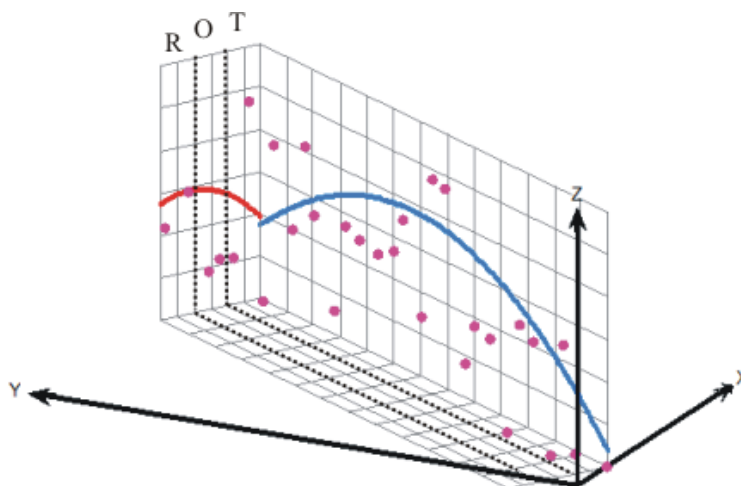
Aproksimacija trenda izmerenih vrednosti sabijenosti zemljišta na parceli prikazan je na slici 128.



Sl. 128. Trendovi sabijenosti zemljišta po dužini i širini parcele



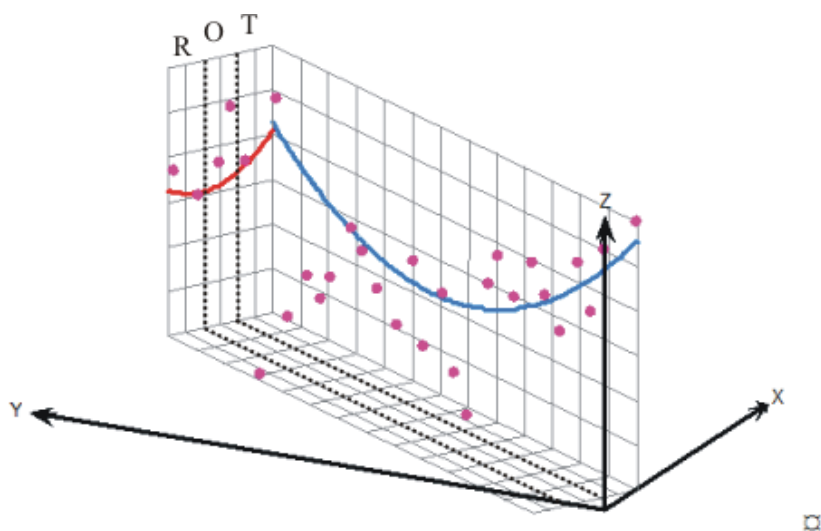
Sa slike se uočava da sabijenost po širini parcele (po tretmanima) ima znatan rastući trend od periferije (tanjirano i razrivano) prema sredini (oranom). Posmatrano po dužini, može se reći da je sabijenost ujednačena. Aproksimacija trenda vrednosti udela peska u zemljištu na parceli prikazan je na slici 129.



Sl. 129. Trendovi udela peska po dužini i širini parcele

Sa slike se može uočiti da količina peska posmatrano po širini parcele (po tretmanima) ima blago rastući trend od periferije (tanjirano i razrivano) prema sredini (oranom). Posmatrano po dužini, udeo peska raste od krajeva prema sredini.

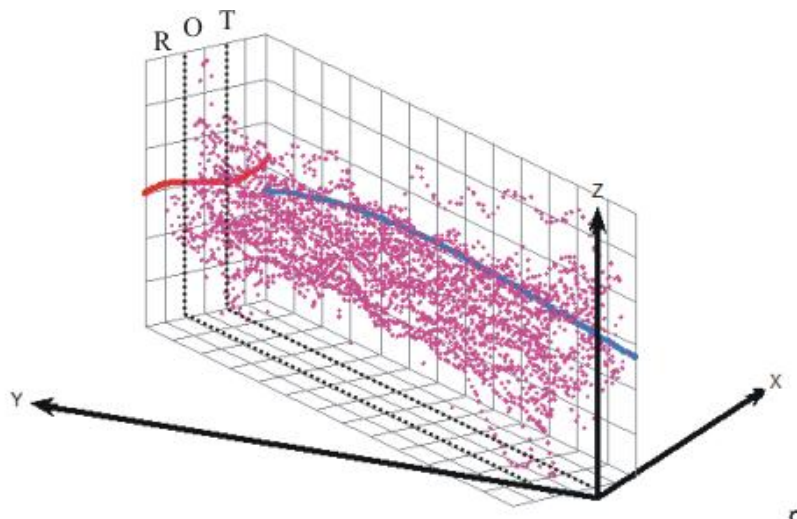
Aproksimacija trenda procentualnog udela frakcija praha i gline u zemljištu na parceli prikazan je na slici 130. Suprotno udelu peska, trend procentualnog sadržaja praha i gline u zemljištu se posmatrano po širini parcele smanjuje od krajeva prema sredini što se isto može reći i za trend po dužini parcele.



Sl. 130. Trendovi promene udela praha i gline po dužini i širini parcele

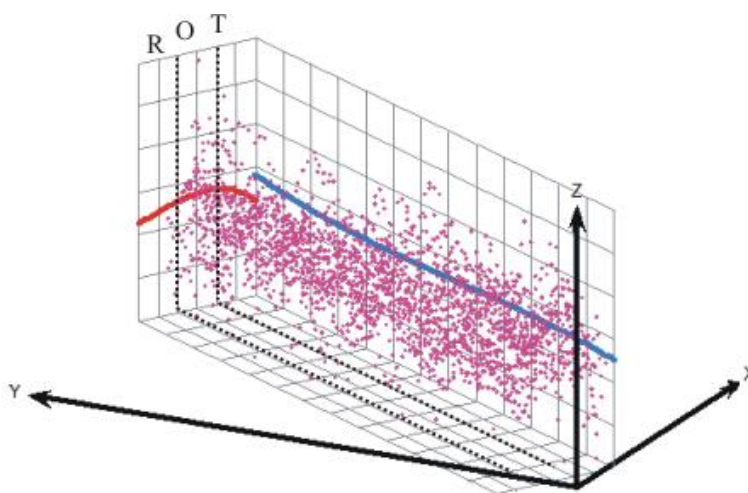


Aproksimacija trenda georeferenciranih vrednosti otpora vuče na parceli prikazana je na slici 131. Sa slike se može primetiti da se prosečne vrednosti otpora vuče menjaju sa krajeva prema sredini parcele. Uočljivo je da posmatrano po širini parcele (po tretmanima), otpori vuče imaju blago rastući trend od periferije (tanjirano i razrivano) prema sredini (oranom). Posmatrano po dužini, zapreminska masa idući sa krajeva raste prema sredini parcele.



Sl. 131. Trendovi promene otpora vuče po dužini i širini parcele

Aproksimacija trenda izmerenih vrednosti klizanja pogonskog točka tokom merenja otpora vuče na parceli prikazan je na slici 132. Na osnovu slike se može zaključiti da klizanje pogonskog točka posmatrano po širini parcele (po tretmanima) ima blago rastući trend od krajeva (tanjirano i razrivano) prema sredini (oranom). Posmatrano po uzdužnoj osi parcele, može se reći da je klizanje ima konstantno.



Sl. 132. Trendovi promene klizanja pogonskog točka po dužini i širini parecele



### 7.3.7. Prostorno mapiranje prikupljenih geopodataka

Tokom postupka mapiranja parametara, odnosno interpolacije podataka, moguće je prethodno dobijene globalne trendove za pojedinačne parametre uvrstiti u sam postupak interpolacije ukoliko se na taj način poboljšava kvalitet prostornog predviđanja. U ovom slučaju, dobijeni trendovi iz prethodne analize, ne opisuju najpreciznije lokalne varijabilnosti već ih u velikoj meri aproksimiraju, a obzirom da je cilj istraživanja u okviru disertacije, prepoznavanje lokalnih "ekstrema", rezultati analize trenda nisu iskorišćeni tokom postupka interpolacije podataka.

U postupku mapiranja podataka svih posmatranih obeležja, primenjivan je ordinarni kriging postupak predviđanja na neuzorkovanim lokalitetima. Zavisno od kvaliteta rapodele serije podataka, na određenim grupama ulaznih podataka urađena je logaritamska transformacija.

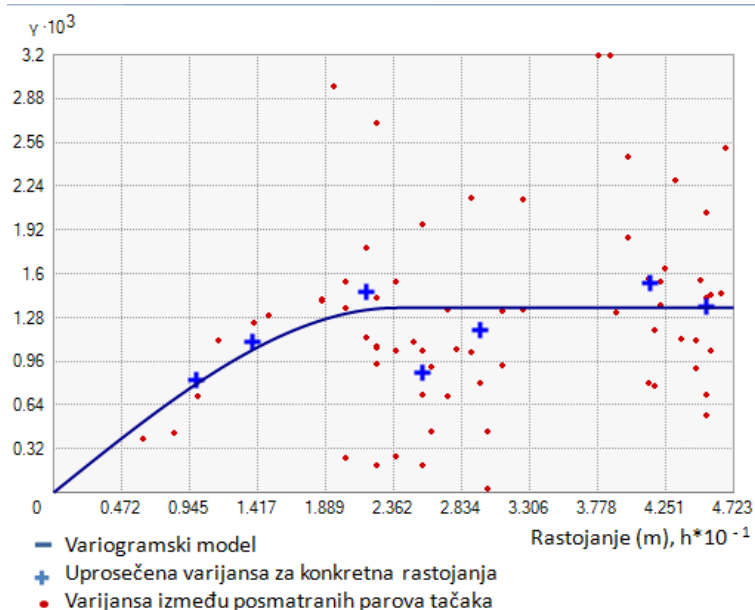
Kako bi se ocenila prostorna povezanost među podacima posmatranih parametara, izvršeno je semivariogramskom modelovanje. Odabrani su semivariogramski modeli koji najpribližnije opisuju prostornu povezanost tačaka u prostoru u funkciji njihovog međusobnog rastojanja. Odabrani fitovani modeli predstavljaju polaznu osnovu za predviđanje vrednosti parametra na mestima na kojima nije obavljeno uzorkovanje-merenje. Tako dobijene vrednosti se preslikavaju na projekcionu ravan Dekartovog koordinatnog sistema, a modelovane vrednosti parametra su asocirane spektrom različitih boja.

Prilikom modelovanja semivariograma, odabirani su početni parametri koji utiču na kvalitet fitovanja. To je pre svega dužina "koraka" (*eng, lag*) i njihov broj. Pravilo kod odabiranja tolerancije (*praga*) je da ne sme biti veći od polovine najveće razdaljine unutar jedne klase.

### 7.3.8. Mapiranje parametra zapreminska masa zemljišta

U prvom koraku izrade prostornih mapa, odabran je metod interpolacije podataka. Za predviđanje vrednosti zepreminske mase na neuzorkovanim lokalitetima, korišćen je *obični (ordinarni) kriging*.

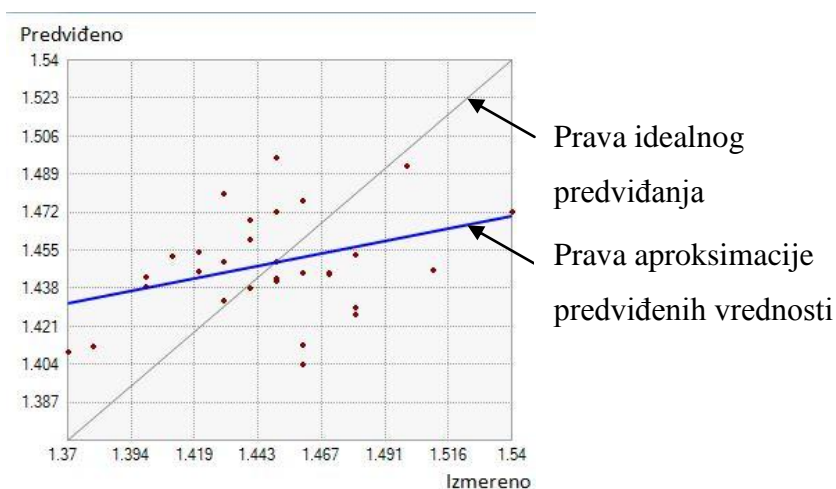
Na osnovu podataka o zapreminskoj masi zemljišta dobijenih iz 30 uzoraka, urađeno je semivariogramsko modelovanje, odnosno dobijen je fitovan variogram (sl. 133).



Sl. 133. Fitovani variogramski model dobijen iz podataka o zapreminskoj masi zemljišta

Kako bi se došlo do optimalne krive koja najpribližnije opisuje prostornu povezanost uzoraka, odabran je sferični model variograma ( $0 \cdot \text{Nugget} + 0,0013509 \cdot \text{Spherical}$ ) sa 12 klasa (*number of lags*) i tolerancijom (*lag size*) od 3,93 m. Odabrani model variograma ima malu "nugget" vrednost  $p_0=0$ , čime se predviđa minimalno odstupanje u uzorcima koji su prostorno bliski. Prag varijanse za variogram iznosi  $p=0,0013$ . Domet (*range*) variograma, tj. prostorna korelacija ide do rastojanja od 23,8 m. U ovom slučaju rađena je izotropna kalkulacija prostorne korelacije prilikom modelovanja variograma.

Na slici 134 prikazan je dijagram unakrsnog vrednovanja (*cross-validation*) podataka dobijenih na osnovu modela odabranog variograma.



Sl. 134. Korelacija procenjenih i izmerenih vrednosti zapreminske mase



Sa slike se vizuelno uočava ostupanje predviđenih u odnosu na stvarne (izmerene) vrednosti. Može se zaključiti da postoji prilično rasipanje dobijenih tačaka oko idealne prave, što znači da su neke od predviđenih vrednosti veće, a druge manje u odnosu na izmerene za datu lokaciju na parceli.

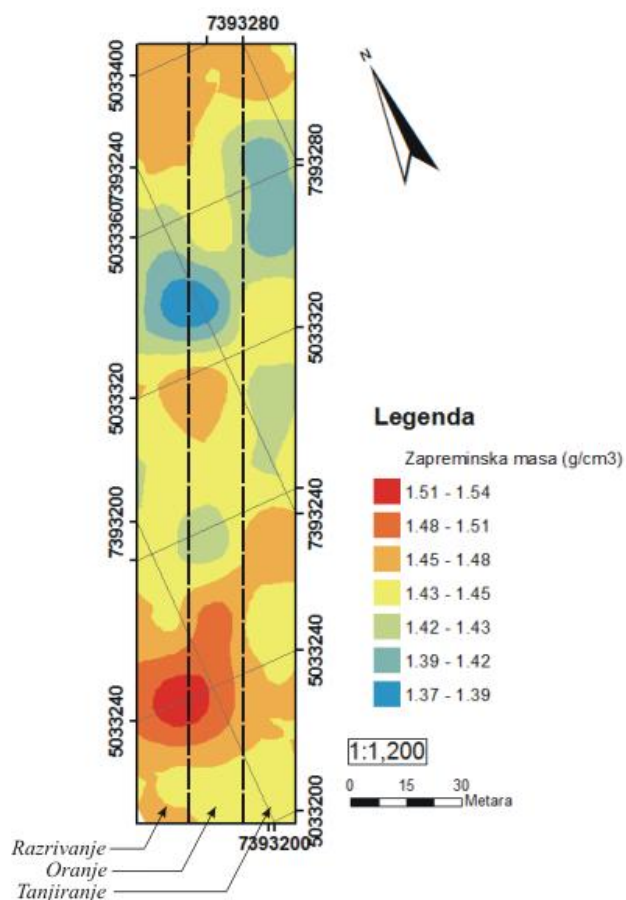
U tabeli 55 prikazani su statistički pokazatelji koji su upotrebljeni za ocenu i odabir modela. Na osnovu srednje vrednosti greške koja je bliska nuli, može se konstatovati da model daje relativno dobru predikciju, a na osnovu vrednosti korena standardizovane srednje kvadratne greške (približno 1) može se reći da je predikcija objektivna.

Tab. 55. Statistika variogramskog modela zapreminske mase

Jednačina linearne regresije	$y=0,23 \cdot x + 1,12$
Srednja vrednost predikcione greške	0,0001
Koren srednje kvadratne greške	0,03
Standardizovana srednja vrednost greške	0,0007
Koren standardizovane srednje kvadratne greške	1,04
Prosečna standardna greška	0,03

Na slici 135 prikazana je mapa zapreminske mase zemljišta na parceli dobijena *kriging* tehnikom interpolacije. Vrednosti zapreminske mase asocijativno su prikazane različitim bojama gde svaka predstavlja interval vrednosti. Vrednosti su grupisane u 7 jednakih intervala. Sa slike 135 može se konstatovati da zone koje opisuju određene intervale zapreminske mase nisu orjentisane i raspoređene po parceli u skladu sa primenjenim tretmanima, na osnovu čega se može zaključiti da zapreminska masa nije direktna posledica sistema obrade primenjenog u prethodnoj godini.





Sl. 135. Kriging mapa zapreminske mase zemljišta na parceli

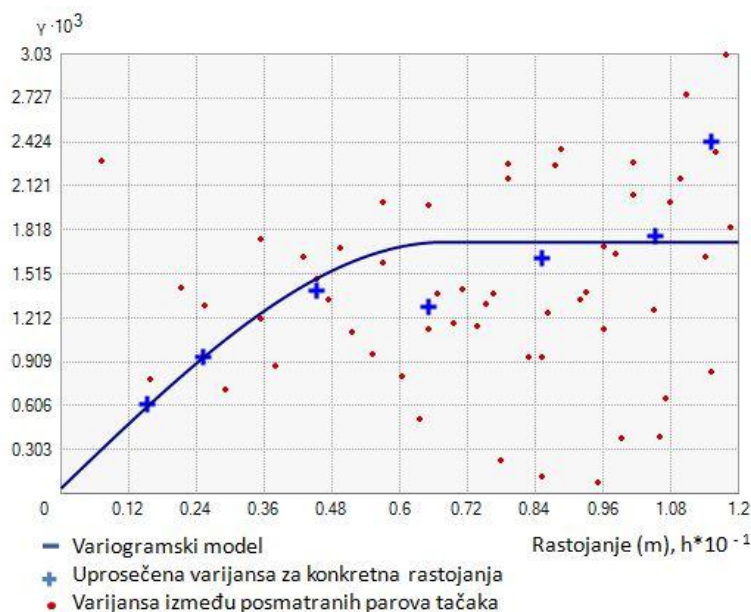
### 7.3.9. Mapiranje parametra vlažnost zemljišta

Za predviđanje vrednosti vlažnosti zemljišta na neuzorkovanim lokalitetima, korišćen je obični (*ordinarni*) kriging.

S obzirom da podaci imaju nepravilnu raspodelu, pre variogramskog modelovanja, urađena je logaritamska transformacija istih. Na osnovu transformisanih podataka iz 30 uzoraka, dobijen je fitovan variogram za optimalnu krivu koja najbolje opisuje prostornu povezanost uzoraka, odabran je sferični model variograma (sl. 136) sa 12 klasa sa tolerancijom od 10 m. Odabrani model variograma ( $0 * \text{Nugget} + 0,0015454 * \text{Spherical}$ ) ima malu "nugget" vrednost  $p_0=0$ , čime se predviđa minimalno početno odstupanje u uzorcima koji su prostorno bliski. Prag varijanse za variogram iznosi  $p=0,002$ . Domet (*range*) variograma, tj, prostorna korelacija iznosi 68,2 m. Kalkulacija prostorne korelacije radi modelovanja variograma je rađena anizotropno, u pravcu kretanja agregata po parceli, tj. uzdužno. Kalkulacija prostorne

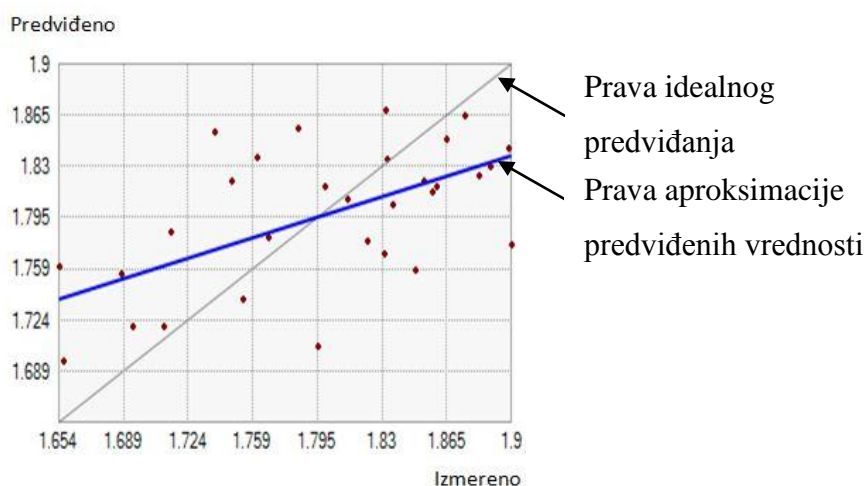


korelacije radi modelovanja variograma rađena je anizotropno, pod uglom od  $25,13^\circ$  u odnosu na uzdužnu osu parcele.



Sl. 136. Fitovani variogramski model dobijen iz podataka vlažnosti zemljišta

Na slici 137 dat je dijagram unakrsne validacije (*cross-validation*) podataka dobijenih na osnovu modela odabranog variograma. Kao i u slučaju zapreminske mase, prisutno je određeno odstupanje vrednosti dobijenih po modelu u odnosu na izmerene vrednosti. Na osnovu ugla dveju prava prikazanih na slici 137, može se konstatovati da su srednje vrednosti predviđenih podataka bliske srednjim izmerenim vrednostim parametra vlažnosti zemljišta.



Sl. 137. Korelacija procenjenih i izmerenih vrednosti vlažnosti zemljišta

U tabeli 56 prikazani su statistički pokazatelji koji su upotrebljeni za ocenu i odabir modela. Na osnovu srednje vrednosti greške koja je bliska nuli ( $-0,025$ ), može se konstatovati da

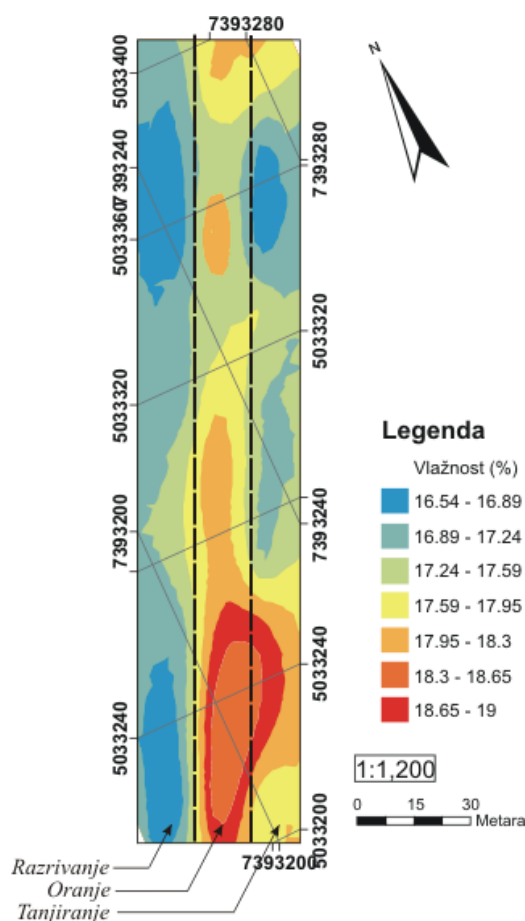


model daje relativno dobru predikciju, a na osnovu vrednosti korena standardizovane srednje kvadratne greške (1,087) može se zaključiti da je predikcija nepristrasna.

Tab. 56. Statistika variogramskog modela vlažnosti zemljišta

Jednačina linearne regresije	$y=0,4 \cdot x+10,76$
Srednja vrednost predikcione greške	-0,025
Koren srednje kvadratne greške	0,599
Standardizovana srednja vrednost greške	-0,042
Koren standardizovane srednje kvadratne greške	1,087
Prosečna standardna greška	0,54

Na slici 138 je prikazana tematska karta-mapa vlažnosti zemljišta na celoj parceli, i dobijena je *kriging* tehnikom interpolacije.



Sl. 138. Kriging mapa vlažnosti zemljišta na parceli

Plava boja označava veću vlažnost zemljišta, dok crvena predstavlja manju. Vrednosti su grupisane u 7 jednakih intervala. Sa slike 138 može se zaključiti da se određene zone

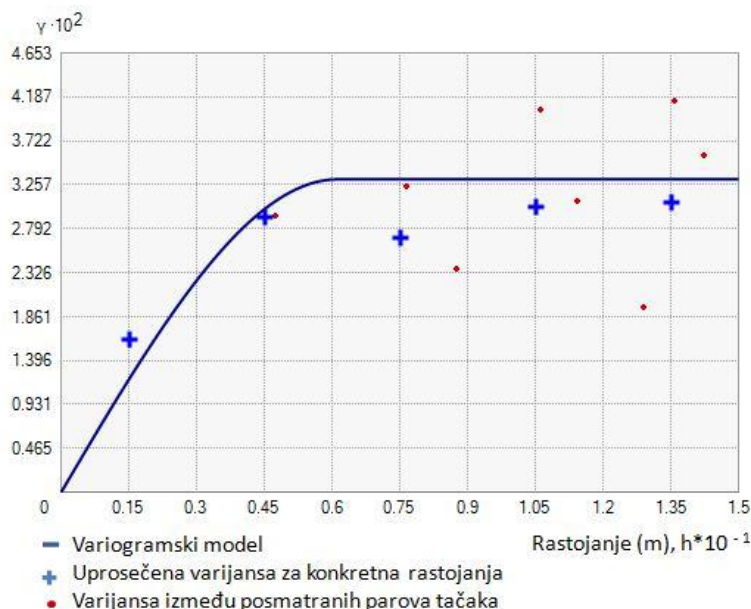


(intervali) vlažnosti dominantno nalaze na konkretnom tretmanu. Crvene i žute zone (niža vlažnost) se rasprostiru u središnjem delu parcele, na kojem je pretretman bio oranje. Više vlažnosti su više pristne na delovima, gde je primenjeno tanjiranje i razrivanje kao tretman. Ovo ukazuje da je parametar vlažnosti zemljišta u određenoj meri posledica sistema obrade primenjenog u prethodnoj godini.

### 7.3.10. Mapiranje parametra sabijenosti zemljišta

Za predviđanje vrednosti sabijenosti zemljišta na neuzorkovanim lokalitetima, korišćen je obični (ordinarni) kriging.

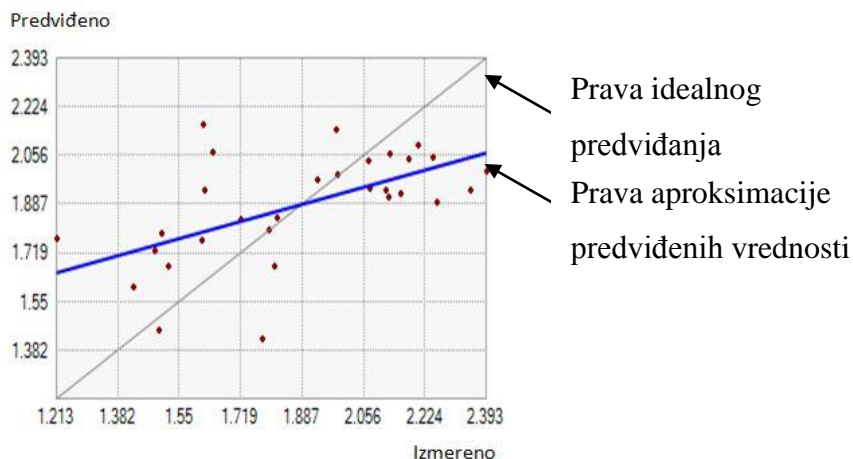
Obzirom da podaci imaju nepravilnu raspodelu, pre variogramskog modelovanja, urađena je logaritamska transformacija istih. Na osnovu transformisanih podataka dobijenih iz 30 uzoraka, dobijen je fitovan variogram. Kao optimalna kriva koja najbolje opisuje prostornu povezanost uzoraka, odabran je sferični model variograma ( $0 \cdot \text{Nugget} + 0,033144 \cdot \text{Spherical}$ ) sa 5 klasa sa tolerancijom od 45 m. Odabrani model variograma ima malu "nugget" vrednost  $p_0=0$ , čime se predviđa minimalno početno odstupanje u uzorcima koji su prostorno bliski (sl. 139). Prag varijanse za variogram iznosi  $p=0,003$ . Domet (range) variograma, tj, prostorna korelacija iznosi 61,96 m. Kalkulacija prostorne korelacije radi modelovanja variograma je rađena anizotropno, pod uglom od  $24,6^\circ$  u odnosu na uzdužnu osu parcele.



Sl. 139. Fitovani variogramski model dobijen iz podataka sabijenosti zemljišta



Na slici 140 prikazan je dijagram validacije (*cross-validation*) podataka dobijenih na osnovu modela odabranog variograma. Izgled unakrsnog dijagrama ukazuje na odstupanja dobijenih od predviđenih vrednosti.



Sl. 140. Korelacija procenjenih i izmerenih vrednosti sabijenosti zemljišta

Ta odstupanja su, ako se izuzmu nekoliko ekstremnih vrednosti zadovoljavajuća, što govori međusobni položaj dveju prikazanih prava. U tabeli 57 prikazani su statistički pokazatelji koji su upotrebljeni za ocenu i odabir modela. Na osnovu srednje vrednosti greške koja je bliska nuli (0,0045), može se konstatovati da model daje relativno dobru predikciju, a na osnovu vrednosti korena standardizovane srednje kvadratne greške (1,05) može se zaključiti da je predikcija nepristrasna.

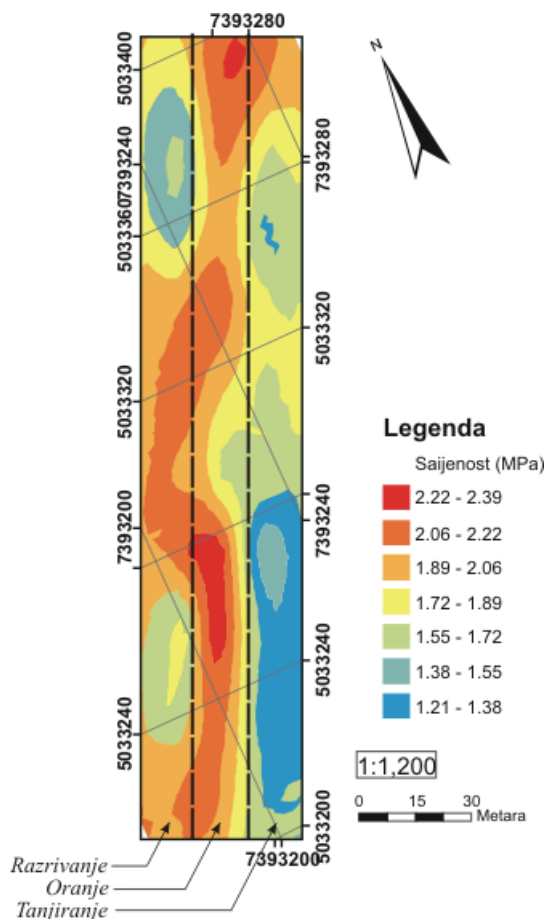
Tab. 57. Statistika variogramskog modela vlažnosti zemljišta

Jednačina linearne regresije	$y=0,35 \cdot x+1,22$
Srednja vrednost predikcione greške	0,0045
Koren srednje kvadratne greške	0,25
Standardizovana srednja vrednost greške	0,013
Koren standardizovane srednje kvadratne greške	1,05
Prosečna standardna greška	0,25

Na slici 140 prikazana je tematska karta-sabijenosti zemljišta na celoj parceli, dobijena kriging tehnikom interpolacije. Plava boja asocira manju sabijnost zemljišta, dok crvena asocira veću. Vrednosti su grupisane u 7 jednakih intervala. Sa slike 141 se može zaključiti da se određene zone (intervali) sabijenosti grupišu delimično prema tretmanima. Crvene i žute zone (viša) se rasprostiru u središnjem delu parcele (orano) i jednim delom na levom



(razrivano), dok su niže vrenosti na delu koje prethodno obrađeno tanjiranjem. To ukazuje da je sabijenost zemljišta u određenoj meri uzrokovano sistemom obrade, koje je primenjeno u prethodnoj godini.



Sl. 141. Kriging mapa sabijenosti zemljišta na parceli

### 7.3.11. Mapiranje parametra sadržaja gline i praha u zemljištu

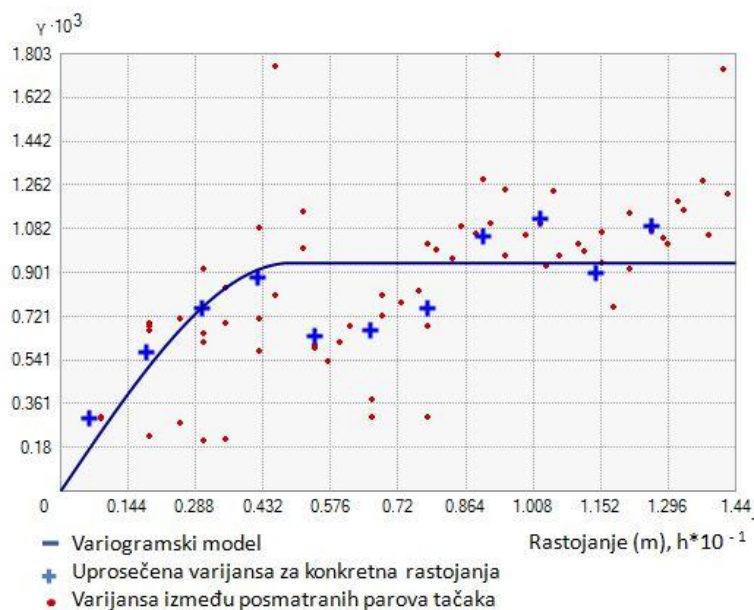
Za predviđanje vrednosti sadržaja gline i praha u zemljištu na neuzorkovanim lokalitetima, korišćen je *obični (ordinarni) kriging*.

Na podacima je primenjena logaritamska transformacija kako bi se dobila njihova pravilnija raspodela. Na osnovu polaznih podataka dobijenih iz 30 uzoraka, odabran je odgovarajući tip i oblik variograma (sl. 142). Kao optimalna kriva koja najbolje opisuje prostornu povezanost uzoraka, odabran je sferični model variograma ( $0 \cdot \text{Nugget} + 0,033144 \cdot \text{Spherical}$ ) sa 12 klasa sa tolerancijom od 12 m. Odabrani model variograma ima "nugget" vrednost  $p_0=0$ , što ukazuje na postojanje minimalnog početnog odstupanja u uzorcima koji su prostorno bliski. Prag varijanse za variogram iznosi  $p=0,001$ . Domet (*range*) variograma, tj. prostorna



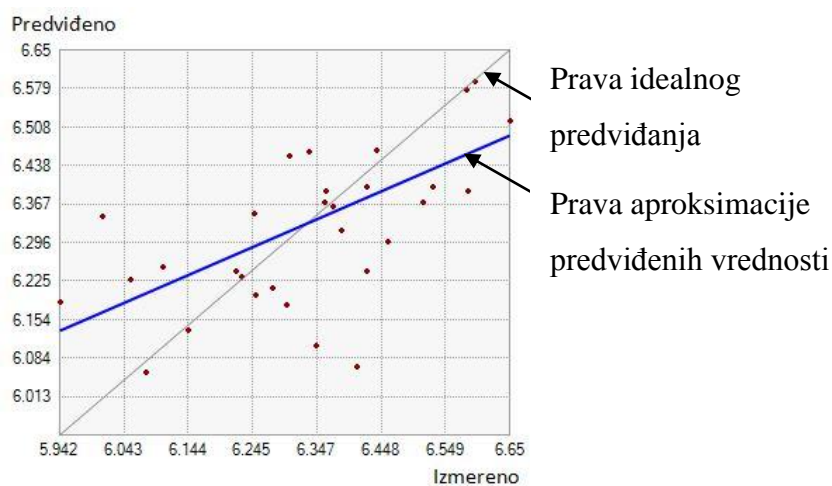


korelacija ide do razdaljine od 46,15 m. Kalkulacija prostorne korelacije radi modelovanja variograma je rađena jednako u svim pravcima (izotropno).



Sl. 142. Fitovani variogramski model dobijen iz podataka sadržaja prah+glina

Na slici 143 prikazan je dijagram validacije (*cross-validation*) podataka dobijenih na osnovu modela odabranog variograma. Sa dijagrama se uočava da su izmereni i predviđeni podaci u pozitivnoj korelaciji, dok otklon dveju prava ukazuje da su srednje predviđene i srednje izmerene vrednosti međusobno bliske.



Sl. 143. Korelacija procenjenih i izmerenih vrednosti sadržaja prah+glina

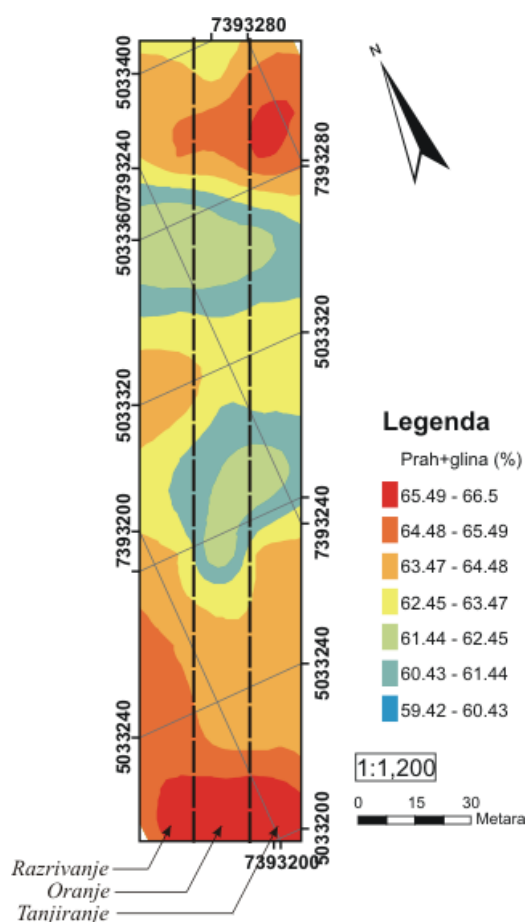
U tabeli 58 prikazani su statistički pokazatelji koji su upotrebljeni za ocenu i odabir modela. Na osnovu srednje vrednosti greške koja je bliska nuli (-0,15), može se konstatovati da model



daje relativno dobru predikciju, a na osnovu vrednosti korena standardizovane srednje kvadratne greške (1,14) može se zaključiti da je predikcija nepristrasna.

Tab. 58. Statistika variogramskog modela sadržaja gline i praha u zemljištu

Jednačina linearne regresije	$y=0,5*x+31,61$
Srednja vrednost predikcione greške	-0,15
Koren srednje kvadratne greške	1,41
Standardizovana srednja vrednost greške	-0,083
Koren standardizovane srednje kvadratne greške	1,14
Prosečna standardna greška	1,25



Sl. 144. Kriging mapa sadržaja prah+glina u zemljištu na parceli

Na slici 144 prikazana je tematska karta-mapa sadržaja gline i praha u zemljištu na celoj parceli, dobijena kriging tehnikom interpolacije. Plava boja asocira manji sadržaj, dok crvena asocira veći. Vrednosti su grupisane u 7 jednakih intervala. Sa slike 144 se može zaključiti da



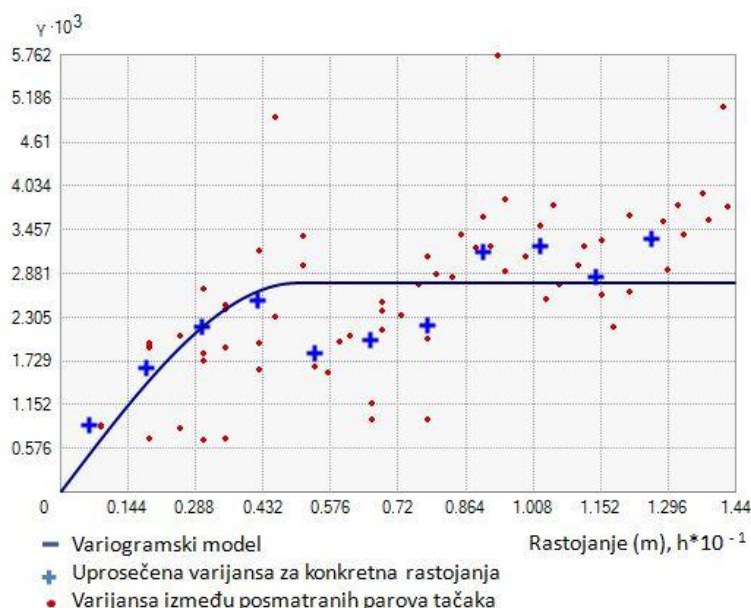


se udeo gline i praha menjaju potpuno nezavisno od primenjenog tretmana. Crvene i žute zone (viša) se rasprostiru najviše na početku i na kraju parcele, dok su niže vrednosti na središnjem delu.

### 7.3.12. Mapiranje parametra sadržaja peska u zemljištu

Za predviđanje vrednosti sadržaja peska u zemljištu na neuzorkovanim lokalitetima, korišćen je *obični (ordinarni) kriging*.

Primenjena je logaritamska transformacija kako bi se dobila njihova pravilna raspodela podataka. Na osnovu polaznih podataka dobijenih iz 30 uzoraka, odabran je odgovarajući tip ( $0 \cdot \text{Nugget} + 0,0027562 \cdot \text{Spherical}$ ) i oblik variograma (sl. 145). Kao optimalna-preporučena kriva koja najbolje opisuje prostornu povezanost uzoraka, odabran je sferični model variograma sa 12 klasa sa tolerancijom od 12 m. Odabrani model variograma pretpostavlja "nugget" vrednost  $p_0=0$ , što ukazuje na postojanje minimalnog odstupanja u uzorcima koji su prostorno bliski. Prag varijanse za variogram iznosi  $p=0,003$ . Domet (*range*) variograma, tj, prostorna korelacija podataka ide do razdaljine od 50,6 m. Kalkulacija prostorne korelacije radi modelovanja variograma je rađena jednako u svim pravcima (izotropno).

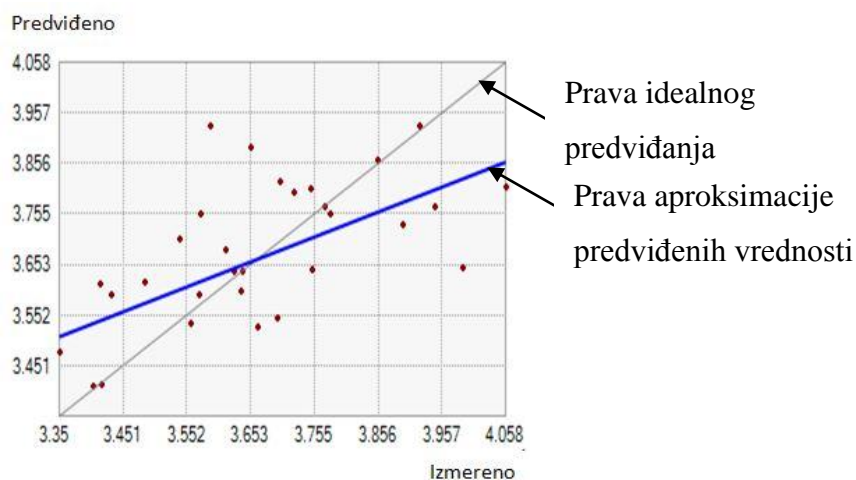


Sl. 145. Fitovani variogramski model dobijen iz podataka sadržaja peska

Na slici 146 prikazan je dijagram validacije (*cross-validation*) podataka dobijenih na osnovu modela odabranog variograma. Sa dijagrama se može zaključiti da postoji pozitivna korelacija uz određeni stepen odstupanja izmerenih od predviđenih vrednosti. Mali otklon



dveju prava nedvosmisleno je pokazatelj kvalitetne prostorne predikcije u zonama gde nisu obavljene poljske operacije.



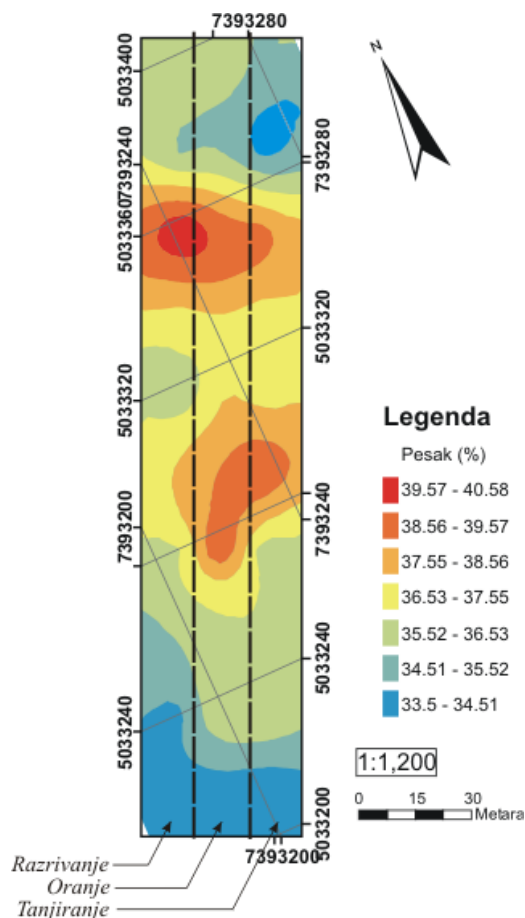
Sl. 146. Korelacija procenjenih i izmerenih vrednosti sadržaj peska u zemljištu

U tabeli 59 prikazani su statistički pokazatelji koji su upotrebljeni za ocenu i odabir modela. Na osnovu srednje vrednosti greške koja je bliska nuli (0,16), može se konstatovati da model daje relativno dobru predikciju, a na osnovu vrednosti korena standardizovane srednje kvadratne greške (1,19) zaključuje se da je predikcija nepristrasna.

Tab. 59. Statistika variogramskog modela sadržaja peska u zemljištu

Jednačina linearne regresije	$y=0,49 \cdot x+18,55$
Srednja vrednost predikcione greške	0,16
Koren srednje kvadratne greške	1,47
Standardizovana srednja vrednost greške	0,07
Koren standardizovane srednje kvadratne greške	1,19
Prosečna standardna greška	1,24

Na slici 147 prikazana je tematska karta-mapa sadržaja peska u zemljištu na celoj parceli, dobijena *kriging* tehnikom interpolacije. Plava boja asocira manji sadržaj, dok crvena asocira veći. Vrednosti su grupisane u 7 jednakih intervala. Sa slike 147 se može zaključiti da se udeo gline i praha menjaju potpuno nezavisno od primenjenog tretmana. Crvene i žute zone (viša) se rasprostiru najviše na početku i na kraju parcele, dok su niže vrednosti na središnjem delu.

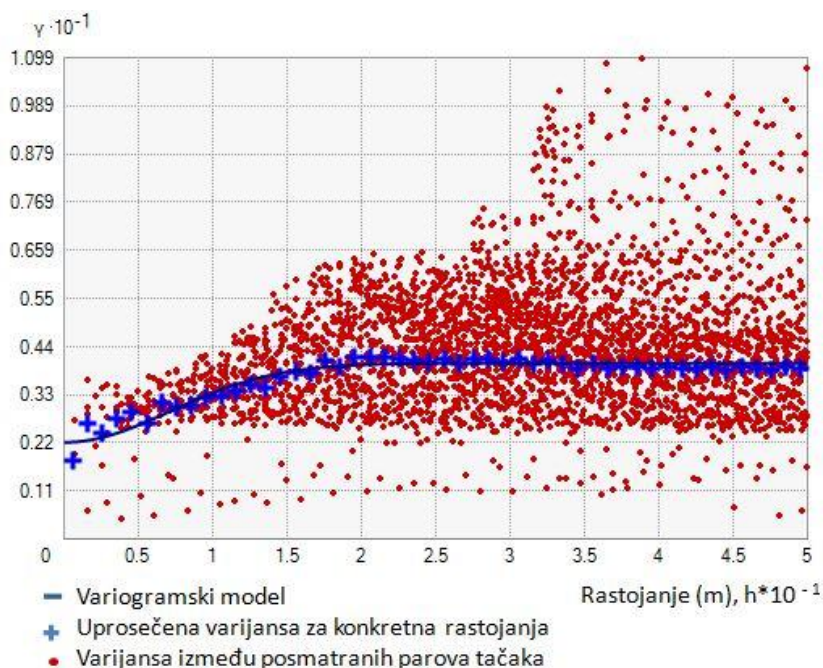


Sl. 147. Kriging mapa sadržaja peska u zemljištu na parceli

### 7.3.13. Mapiranje vučnih otpora zemljišta

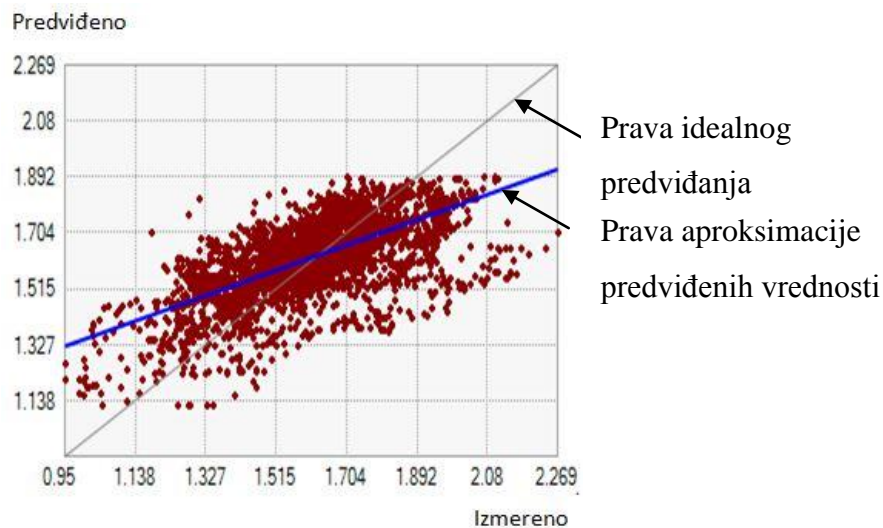
Za predviđanje vrednosti vučnih otpora raonog pluga na lokalitetima koja nisu bila predmet opservacije, korišćen je *obični (ordinarni) kriging*.

Na podacima nije bilo potrebe da se primenjuje transformacija zbog izražene centralne tendencije u raspodeli. Na osnovu polaznih podataka dobijenih iz 2732 uzoraka, odabran je odgovarajući tip i oblik variograma (sl.148). Za optimalnu-preporučenu krivu koja najbolje opisuje prostornu povezanost uzoraka, odabran je Gausov model variograma ( $0 \cdot \text{Nugget} + 1,765 \cdot \text{Spherical}$ ) sa 50 klasa sa tolerancijom od 1 m. Odabrani model variograma ima "nugget" vrednost  $p_0 = 2,2$ , što ukazuje na postojanje određenog odstupanja u uzorcima koji su prostorno bliski. Domet (*range*) variograma ide do razdaljine od 17,84 m. Prag varijanse za variogram iznosi  $p = 1,8$ . Kalkulacija prostorne korelacije radi modelovanja variograma je rađena jednako u svim pravcima (izotropno).



Sl. 148. Fitovani variogramski model (Gausov) dobijen iz podataka otpora vuče

Na slici 149 prikazan je dijagram validacije (*cross-validation*) podataka dobijenih na osnovu modela odabranog variograma. Sa dijagrama se vidi da su izmereni i predviđeni podaci otpora vuče u snažnoj pozitivnoj korelaciji čime se potvrđuje da je odabrani model variograma kvalitetan procenitelj na neispitanim lokacijama na parceli.



Sl. 149. Korelacija procenjenih i izmerenih vrednosti otpora vuče

U tabeli 60 prikazani su statistički pokazatelji koji su upotrebljeni za ocenu i odabir modela. Na osnovu srednje vrednosti greške koja je bliska nuli (0,008), može se konstatovati da model

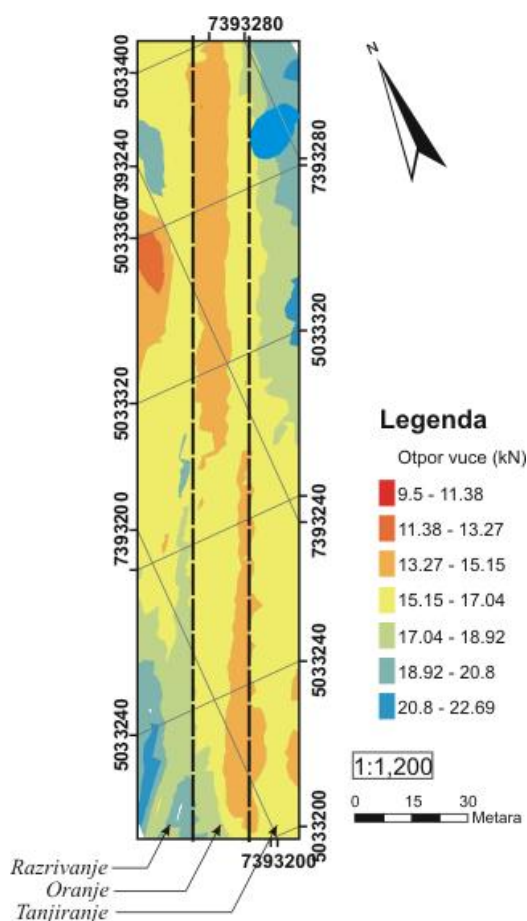


daje veoma dobru predikciju, a na osnovu vrednosti korena standardizovane srednje kvadratne greške (1,029) može se zaključiti da je predikcija nepristrasna.

Tab. 60. Statistika variogramskog modela otpora vuče

Jednačina linearne regresije	$y=0,45 \cdot x+8,92$
Srednja vrednost predikcione greške	0,008
Koren srednje kvadratne greške	1,584
Standardizovana srednja vrednost greške	0,005
Koren standardizovane srednje kvadratne greške	1,029
Prosečna standardna greška	1,540

Na slici 150 prikazana je tematska karta-mapa otpora vuče na celoj parceli, dobijena *kriging* tehnikom interpolacije.



Sl. 150. Kriging mapa otpora vuče na parceli



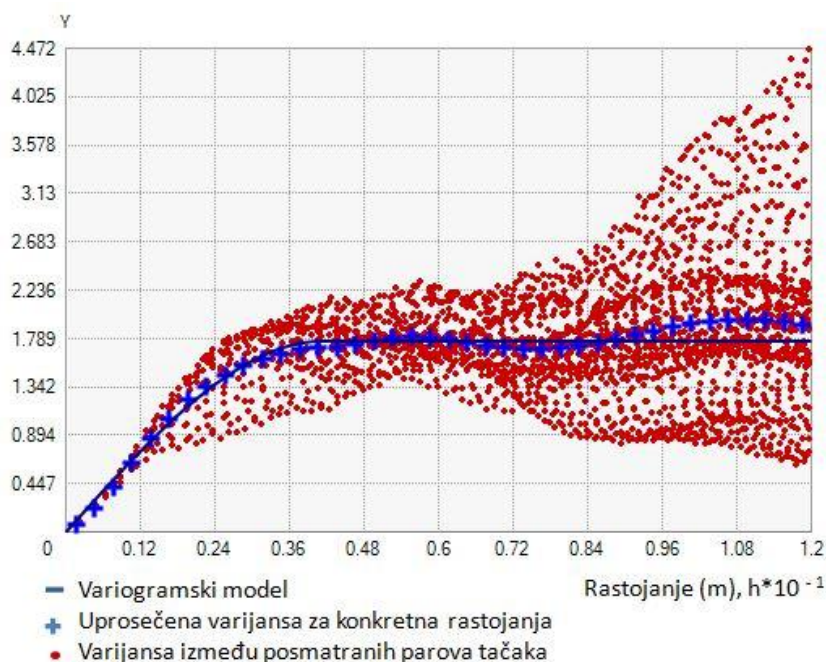


Plava boja predstavlja manji otpor vuče, dok crvena asocira veći. Vrednosti su grupisane u 7 jednakih intervala. Sa slike 150 se može zaključiti da se vrednosti otpora vuče grupišu prema tretmanima na parceli, odnosno da postoji određena korelacija između tretmana i otpora vuče. Crvene i žute zone (viša) se rasprostiru najviše na središnjem delu parcele, tj. na tretmanu oranje, dok se niže vrednosti nalaze na tretmanu tanjiranje i razrivanje.

### 7.3.14. Mapiranje parametra klizanje pogonskog točka

Za predviđanje vrednosti klizanja točka na delovima gde nije vršeno merenje, korišćen je obični (ordinarni) kriging.

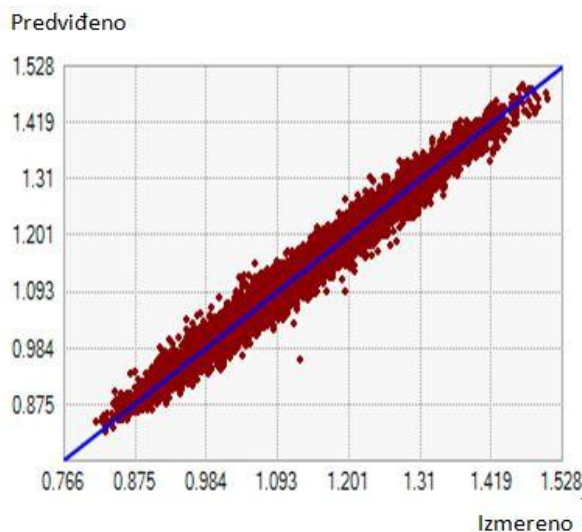
Na podacima nije rađena transformacija. Na osnovu polaznih podataka dobijenih iz 2681 uzoraka, odabran je odgovarajući oblik variograma (sl. 151). Kao optimalna-preporučena kriva koja najbolje opisuje prostornu povezanost uzoraka, odabran je sferni model variograma ( $0 \cdot \text{Nugget} + 1,765 \cdot \text{Spherical}$ ) sa 40 klasa sa tolerancijom od 3 m. Odabrani model variograma ima "nugget" vrednost  $p_0=0$ , što ukazuje na minimalno odstupanje u uzorcima koji su prostorno bliski. Domet (range) variograma, tj. prostorna korelacija podataka ide do razdaljine od 41,32 m. Prag varijanse za variogram iznosi  $p=1,76$ . Kalkulacija prostorne korelacije radi modelovanja variograma je rađena jednako u svim pravcima (izotropno).



Sl. 151. Fitovani variogramski model (Gausov) dobijen iz podataka klizanja točka



Na slici 152 prikazan je dijagram validacije (*cross-validation*) podataka dobijenih na osnovu modela odabranog variograma. Sa dijagrama se vidi da su vrednosti klizanja koje su dobijene na osnovu variogramskog modela i stvarne vrednosti skoro identične iz čega proizilazi zaključak da je odabrani model veoma kvalitetan za slučaj prostornog predviđanja klizanja pogonskog točka na delovima gde je izostalo merenje.



Sl. 152. Korelacija procenjenih i izmerenih vrednosti klizanja točka

U tabeli 61 prikazani su statistički pokazatelji koji su upotrebljeni za ocenu i odabir modela. Na osnovu srednje vrednosti greške koja je bliska nuli (0,0001), može se konstatovati da model daje veoma dobru predikciju, a na osnovu vrednosti korena standardizovane srednje kvadratne greške (0,71) može se zaključiti da je predikcija relativno nepristrasna.

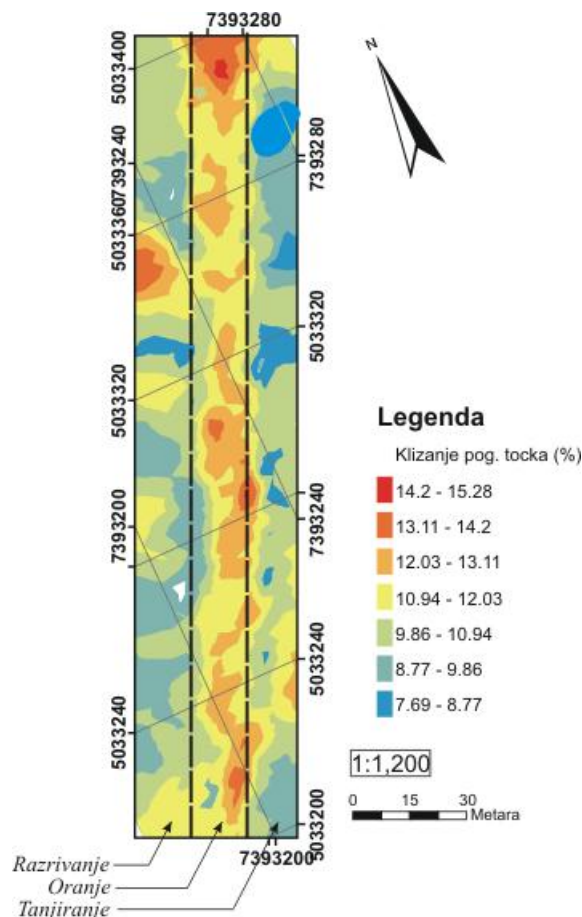
Tab. 61. Statistika variogramskog modela klizanja pogonskog točka

Jednačina linearne regresije	$y=0,99 \cdot x+0,05$
Srednja vrednost predikcione greške	0,00001
Koren srednje kvadratne greške	0,11
Standardizovana srednja vrednost greške	0,00003
Koren standardizovane srednje kvadratne greške	0,71
Prosečna standardna greška	0,16

Na slici 153 prikazana je tematska karta-mapa klizanja pogonskog točka na celoj parceli, dobijena *kriging* tehnikom interpolacije. Plava boja asocira manje vrednosti klizanja, dok crvena asocira veće. Vrednosti su grupisane u 7 jednakih intervala. Sa slike 153 se može



zaključiti da se vrednosti klizanja grupišu prema prethodnom tretmanu, odnosno da postoji određena korelacija između tretmana i klizanja. Crvene i žute zone (viša) se rasprostiru najviše na središnjem delu parcele, tj. na tretmanu oranje, dok se niže vrednosti nalaze na tretmanu tanjiranje i razrivanje.



Sl. 153. Kriging mapa proklizavanja pogonskog točka na parceli

#### 7.4. Rezultati merenja otpora vuče u funkciji radne brzine (TEST 4)

Preliminarno utvrđivanje stanja fizičkih svojstava zemljišta na parcelama na kojima je obavljeno merenje otpora vuče prikazano je u tabeli 62. Rezultati pokazuju da je u slučaju sabijenosti, najveća prosečna vrednost izmerena na parceli B (1,59 MPa), a najmanja na parceli C (1,40 MPa). Vlažnost zemljišta je bila približno jednaka na svim parcelama, najveća srednja vrednost je izmerena na parceli C (19,79%), a najmanja na parceli A (19,10%). U slučaju parametra zapreminske mase, nešto veće odstupanje postoji kod parcele C (1,39 g/cm<sup>3</sup>) u odnosu na zapreminsku masu na parceli A (1,51 g/cm<sup>3</sup>) i parceli B (1,48 g/cm<sup>3</sup>). Na slici 154 grafički su prikazane srednje vrednosti pokazatelja fizičkog stanja zemljišta, sa



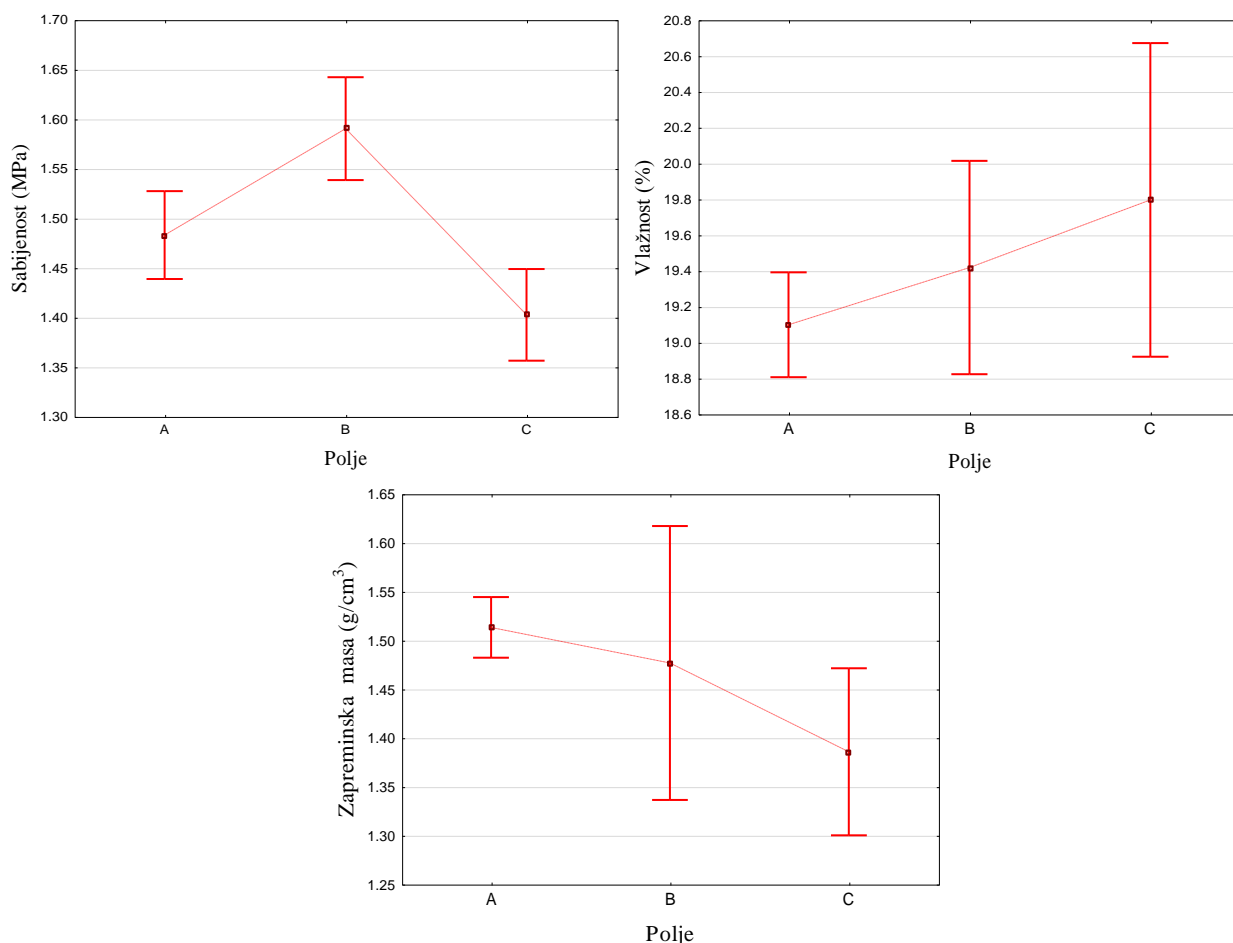


intervalima poverenja na nivou značajnosti od 95%. Za sva tri parametra izvršena je ANOVA preko Duncan-ovog testa, sa rizikom od 5%, i odgovarajuće klase su date u tabeli 62.

Tab. 63. Parametri fizičkog stanja zemljišta na parcelama

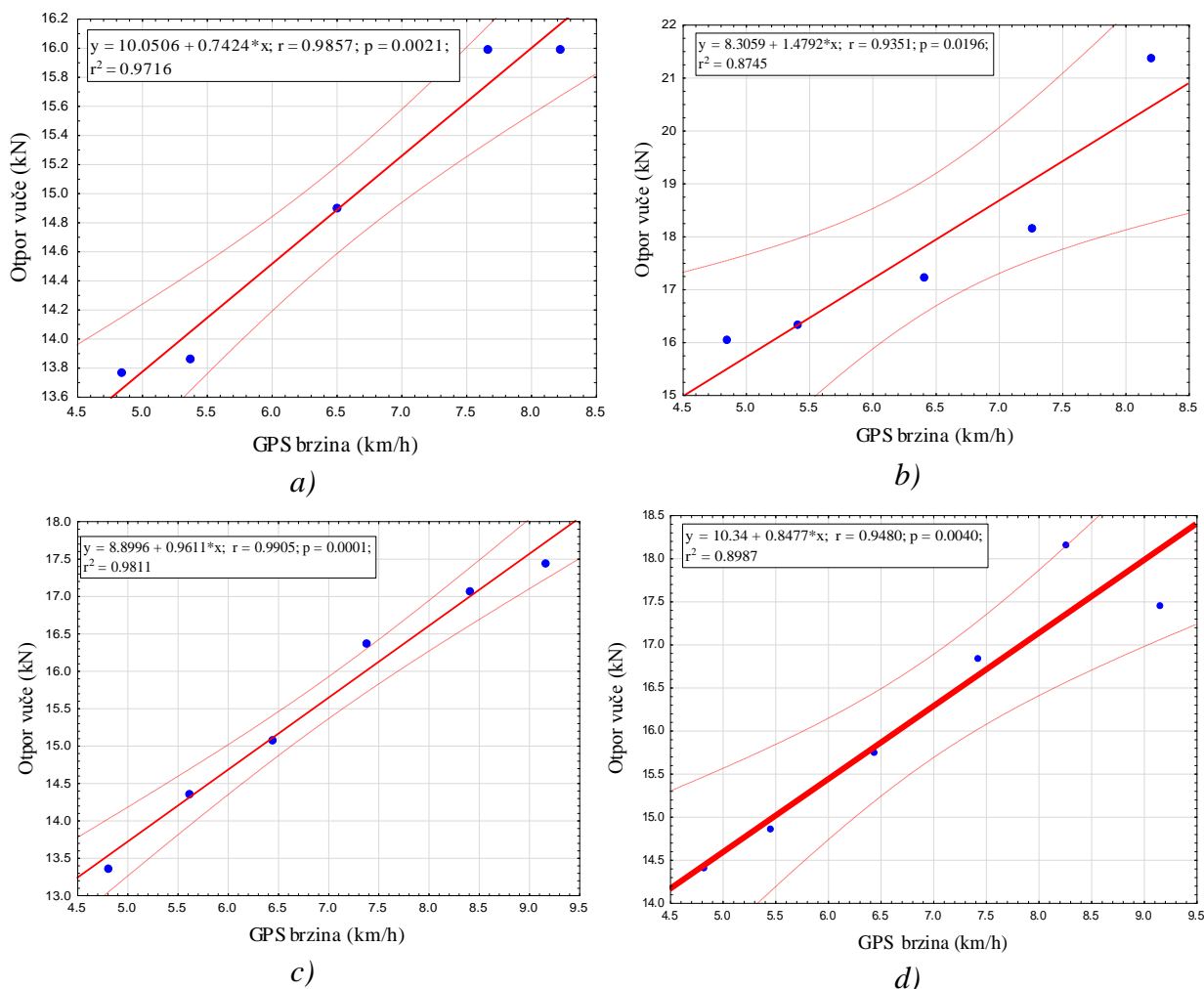
Sabijenost (MPa)				
Parcela	Sr. vred.±St. dev.	Min	Max	CV
A	1,48 <sup>b</sup> ±0,44	0,00	2,41	29,89
B	1,59 <sup>c</sup> ±0,44	0,00	2,19	27,65
C	1,40 <sup>a</sup> ±0,45	0,00	2,31	31,98
Vlažnost (%)				
A	19,10 <sup>a</sup> ±0,41	18,44	19,63	2,14
B	19,42 <sup>ab</sup> ±0,48	19,14	20,27	2,47
C	19,79 <sup>b</sup> ±0,70	18,85	20,33	3,56
Zapreminska masa (kg/cm <sup>3</sup> )				
A	1,51 <sup>a</sup> ±0,04	1,42	1,58	2,87
B	1,48 <sup>a</sup> ±0,08	1,40	1,59	5,42
C	1,39 <sup>b</sup> ±0,06	1,31	1,45	4,04

Poljsko merenje obavljeno je pri visokim frekvencijama očitavanja vrednosti sa dinamometara (600 Hz). Kako bi se eliminisale parazitske frekvencije koje nisu posledica promene otpora vuče nego pojave šuma, osnovni signal je u post procesnoj analizi propušten kroz Bassel-ov niskopropusni filter kojim su eliminisane frekvencije više od 50 Hz. Nakon toga urađena je interpolacija podataka (1 Hz) kako bi se njihova količina redukovala, odnosno svela na meru sa kojom je moguće raditi dalju manipulaciju u drugim programskim paketima. Na slici 155 prikazani su dijagrami zavisnosti otpora vuče raonog trobraznog pluga, za konstantne radne parametre u odnosu na parcelu. Zavisnost posmatranih promenljivih opisana je opštim linearnim modelom  $y=kx+n$ . Sa slike 155 se može zaključiti da na svim parcelama postoji jaka linearna veza između otpora vuče i radne brzine, što govori koeficijent determinacije ( $R^2$ ) koji ima visoku vrednost za sva tri linearna modela. Linearni model najbolje opisuje zavisnost brzine i otpora za parcelu C ( $R^2=0,98$ ), a najslabije za parcelu B ( $R^2=0,87$ ). Na slici 155d prikazan je linearni model koji opisuje korelaciju otpora i brzine prosečno za sve parcele. Objašnjenost variranja otpora u funkciji brzine je u ovom slučaju 90%, što i dalje predstavlja veoma dobru (preciznu) vezu.



Sl. 154. Grafički prikaz srednjih vrednosti fizičkih osobina sa intervalima poverenja za svaku parcelu

Na osnovu koeficijenta  $k$  iz linearnih modela, može se konstatovati da je najveći porast otpora vuče za jediničnu promenu radne brzine u slučaju parcele B ( $k=1,47$ ), a najslabiji porast u slučaju parcele A ( $k=0,74$ ). Kod uprosečenog linearnog modela (sl. 155d), dobijen koeficijent  $k$  ima vrednost 0,85. Ako se otpor vuče posmatra specifično, kao sila otpora po poprečnom preseku zahvaćene plastice, dobija se da se u slučaju parcele A, za svaki 1 km/h (m/s) porasta brzine, specifični otpor poveća za 3,26 kN/m<sup>2</sup> (5,16 kN/m<sup>2</sup>), za parcelu B to je 5,03 kN/m<sup>2</sup> (8,05 kN/m<sup>2</sup>), a za parcelu C je 2,55 kN/m<sup>2</sup> (4,08 kN/m<sup>2</sup>). Prosečno za sve parcele specifičan porast otpora je 2,9 kN/m<sup>2</sup> (4,64 kN/m<sup>2</sup>).



Sl. 155. Zavisnost otpora vuče raonog pluga od radne brzine:

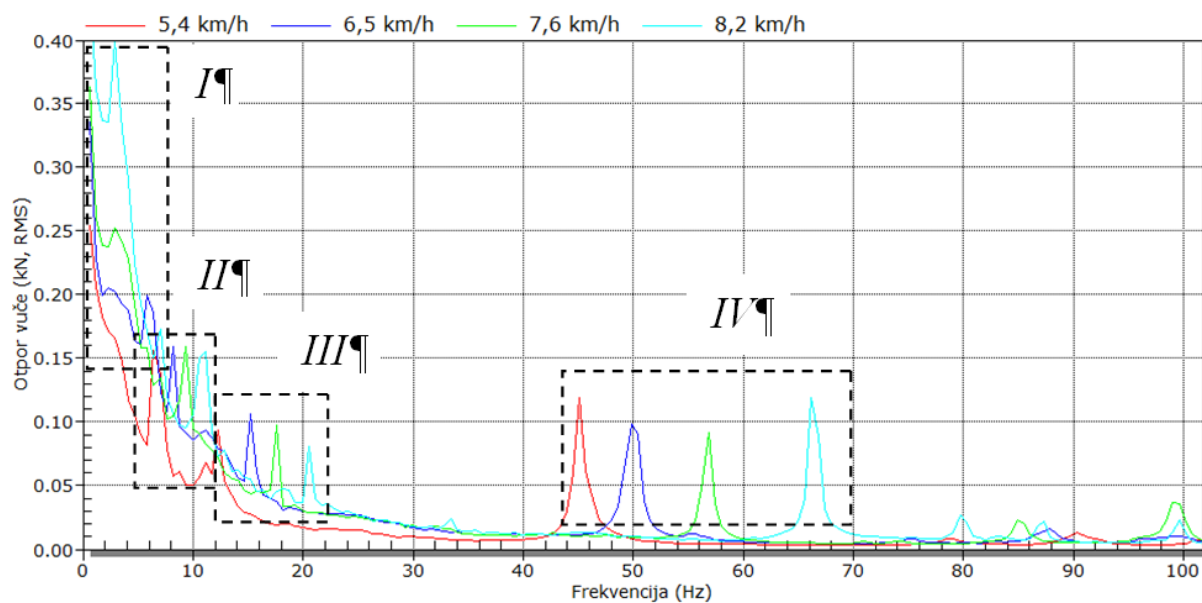
a - polje A; b - polje B; c - polje C; d - prosek za polje ABC

## 7.5. Rezultati spektralne analize signala otpora vuče (TEST 5)

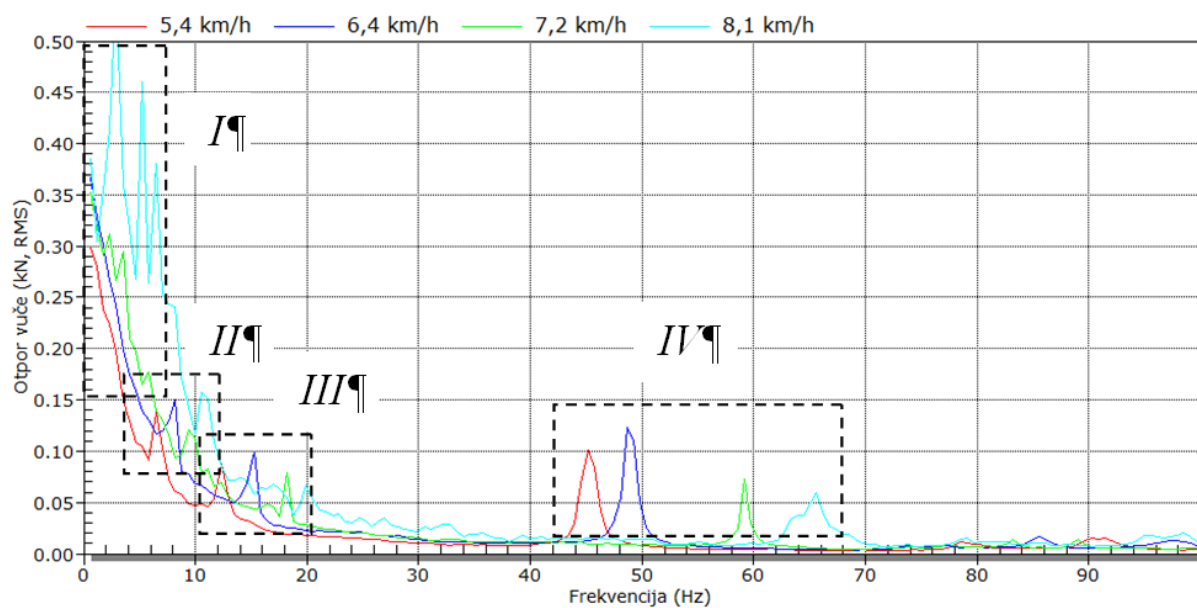
Na slici 156 prikazani su dijagrami spektralnih gustina signala ukupnog otpora vuče za različite radne brzine, odnosno parcele (tretmane). Spektralna analiza urađena je na rezultujućem signalu otpora vuče dobijenog na tri dinamometra koji su deo mernog sistema - mernog rama. Signali sa davača propušteni su kroz niskopropusni filter koji je eliminisao komponente čija frekvencija prelazi 300 Hz, obzirom da je svrha testa bila analiza frekventnog spektra pri različitim režimima obrade zemljišta. Kod standardnih procedura merenja otpora, frekvencije merenja su daleko manje (do 100 Hz) jer su prethodne studije pokazale da se preko 90% frekventnog spektra signala otpora vuče nalazi u granicama od 0-20 Hz (Hayhoe et al., 2002).



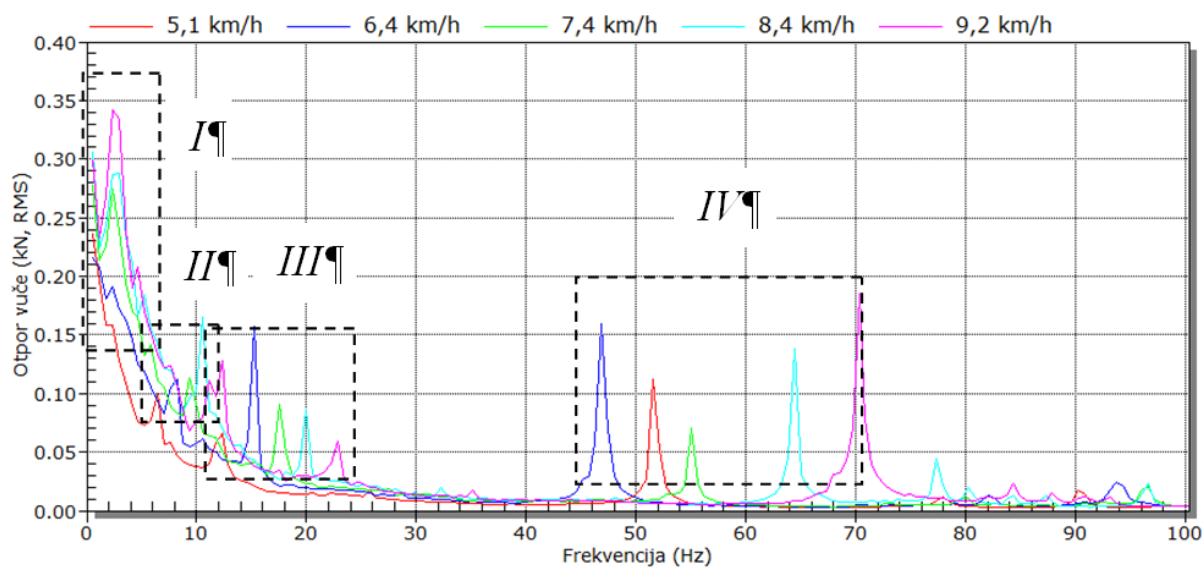
Na slici 156a prikazane su spektralne gustine signala otpora vuče pri različitim brzinama obrade zemljišta na parceli A.



a)



b)



c)

Sl. 156. Frekventni spektar signala otpora vuče u odnosu na radna brzinu i parcelu:

a - parcela A; b - parcela B; c - parcela C

Sa slike se može primetiti više periodičnih varirajućih ciklusa signala (I, II, III i IV) za sve radne brzine. Najuočljivije su spektralne gustine sa frekvencijama od 40 do 70 Hz (IV) sa amplitudama koje su veoma ujednačene za sve brzine. Na manjim frekvencijama primetna su još dva karakteristična ekstrema i to u granicama od 8 do 12 Hz (II) i 12 do 20 Hz (III). Spektralne gustine su jednako raspoređene za sve radne brzine, što znači da se one pojavljuju na nižim frekvencijama kod manjih radnih brzina, odnosno višim kod signala dobijenog pri većim radnim brzinama. Najveće amplitude signala otpora vuče su se pojavljivale pri frekvencijama manjim od 5 Hz što se slaže sa rezultatima autora *Oven et al. (1990)*. Stabilnost signala velikih amplituda je u obrnutoj relaciji sa radnom brzinom traktorskog agregata. Najizraženija varijabilnost signala je kod najveće brzine (8,2 km/h), dok se stabilnost povećava sa smanjenjem radne brzine, tako da signal brzine 5,4 km/h u opsegu frekvencija od 0 do 5 Hz (I) ima skoro linearni karakter.

Na slici 156b prikazane su spektralne gustine signala otpora vuče pri različitim brzinama obrade zemljišta na parceli B. U poređenju sa prethodnim slučajem, može se reći da je spektralna karakteristika veoma slična za sve radne brzine, s tom razlikom da je veća nestabilnost signala za brzinu 8,1 km/h u opsegu niskih frekvencija (0-5 Hz). U zoni frekvencija IV najveću amplitudu ima signal brzine 6,4 km/h, a najmanju signal brzine 8,1 km/h. U zoni spektralnih gustina II i III amplitude su približne.



Na slici 156c prikazane su spektralne gustine signala otpora vuče pri različitim brzinama obrade zemljišta na parceli C. U zoni spektralnih gustina IV, najveća amplituda se javlja kod brzine 9,2 km/h pri frekvenciji 70 Hz. Najniža amplituda je za slučaj brzine 7,4 km/h. Za razliku od prethodna dva slučaja, spektralna gustina signala brzine 5,1 km/h javlja se na višoj frekvenciji (52 Hz) u poređenju sa signalom brzine 6,4 km/h (48 Hz). U spektralnoj zoni III amplitude signala opadaju (osim za brzinu 5,1 km/h) sa porastom radne brzine, dok vrhovi većih brzina odgovaraju višim frekvencijama. Spektralne gustine u zoni frekvencija II su isto raspoređeni kao i u zoni III. Spektralne gustine signala u oblasti I i II za brzine 5,1 km/h i 6,4 km/h pokazuju veću stabilnost u odnosu na signale većih radnih brzina.

## 7.6. Rezultati spektralne analize signala sa akcelerometra (TEST 6)

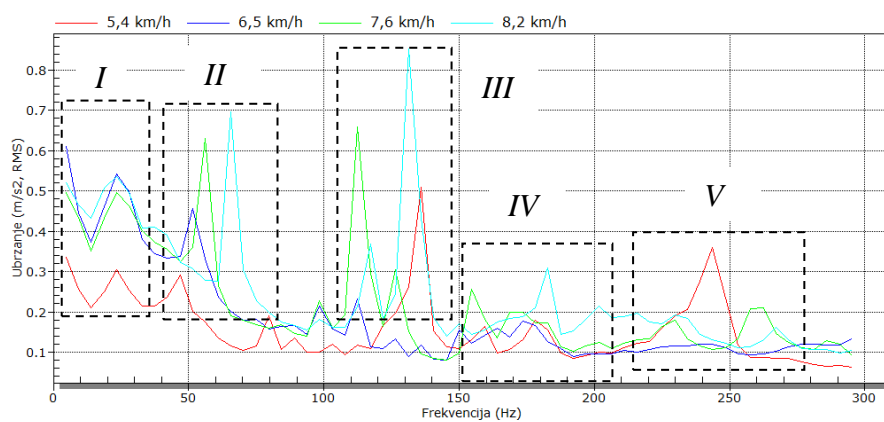
Na slici 157 prikazani su dijagrami frekventnog spektra signala sa akcelerometra za različite radne brzine, odnosno parcele (A, B, C). Opšta komparacija spektralnih karakteristika signala sa akcelerometra sa spektralnim karakteristikama signala otpora vuče, ukazuje da frekvencije otpora preko 100 Hz nisu registrovane od strane dinamometara, a da je akcelerometar registrovao značajne amplitude oscilacija radnog tela upravo na frekvencijama iznad 50 Hz. Karakteristične spektralne gustine pojavljuju se u pet frekventnih zona (sl. 157).

Na grafiku 157a prikazane su frekvencije oscilacija radnog tela na parceli A za različite radne brzine. U zoni frekvencija I, spektralna karakteristika signala za brzine 6,5 km/h, 7,6 km/h i 8,2 km/h skoro su identične, dok signal za brzinu 5,4 km/h ima najmanju amplitudu. U zoni II, gustine su ravnomerno raspoređene i međusobno pomerene. Signali većih brzina imaju vrhove na većim frekvencijama. Amplitude signala rastu sa porastom brzine tako da je najmanja amplituda signala 5,4 km/h, a najveća brzine 8,2 km/h. U zoni III, spektralne gustine su nepravilno raspoređene. U ovoj zoni signali brzina 5,4 km/h, 7,6 km/h i 8,2 km/h imaju maksimalnu amplitudu u čitavom frekventnom opsegu. U zoni IV i V signali su najmanje amplitude gde dominiraju najmanje i najveće radne brzine.

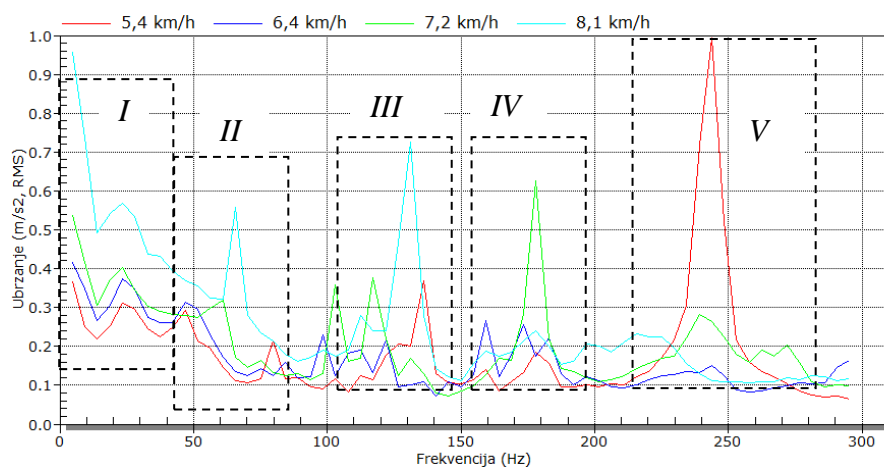
Na grafiku 157b prikazane su frekvencije oscilacija radnog tela na parceli B za različite radne brzine. U zoni frekvencija I, spektar signala za sve brzine ima veoma sličnu karakteristiku, s tim što su amplitude u pozitivnoj relaciji sa radnim brzinama. U zonama II i III, po amplitudi, izdvaja se signal najveće brzine (8,1 km/h), u zoni IV to je signal brzine 7,2 km/h, a u zoni V to je signal najmanje brzine (5,4 km/h). Zanimljiva je pojava ekstreme amplitude signala najmanje brzine koja ima najveću vrednost u zoni najvećih frekvencija



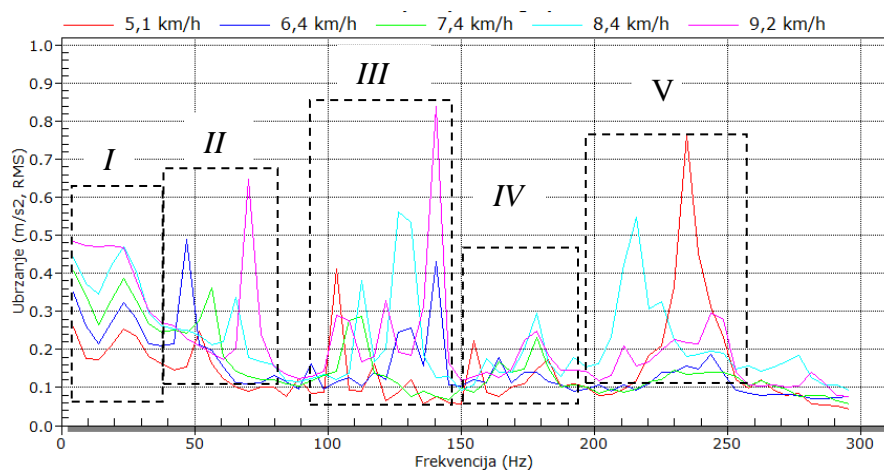
(zona V) i najveću vrednost u poređenju sa amplitudama ostalih brzina u odnosu na sve frekventne zone.



a)



b)



c)

Sl. 157. Frekventni spektar signala sa akcelerometra u odnosu na radn brzinu i parcelu:

a - parcela A; b - parcela B; c - parcela C



Na slici 157c, po amplitudama ističu se frekventne zone II, III i V. U zoni I, amplitudni maksimumi se javljaju pri istim frekvencijama za sve brzine kao i u prethodnim slučajevima. U ostalim frekventnim zonama, amplitudni maksimumi su nepravilno raspoređeni. U II zoni ističu se amplitude signala za brzine 9,2 km/h i 6,4 km/h, u zoni III to su signali brzina 8,4 km/h i 9,2 km/h, u IV zoni amplitude su slične, dok u petoj zoni dominira amplituda signala najmanje brzine (5,1 km/h) odnosno signala brzine 8,4 km/h.





## 8. Diskusija

Istraživačke aktivnosti u disertaciji bile su usmerene na projektovanje originalne arhitekture mernog sistema i proveru njegove pouzdanosti kroz seriju nezavisnih testiranja u poljskim i laboratorijskim uslovima. Svi sprovedeni eksperimenti, simulacije i analize imale su za cilj da se dođe do krajnje realizacije jednog konceptijski potpuno novog mernog sistema, koji će biti metodološki verodostojan ocenitelj vučnih otpora mašina za obradu zemljišta.

### 8.1. Tehničko rešenje mehaničke ramske konstrukcije (merni ram)

Projektovanje mehaničke ramske konstrukcije kao osnove mernog sistema je specifičan proces, koji se odvijao u nekoliko razvojnih faza. Prvenstveno, kreiranje ideje koja je realno ostvariva u pogledu trenutnih mogućnosti, a istovremeno originalna i u mnogim aspektima napredna u poređenju sa već postojećim rešenjima. Polazna osnova prilikom razrade idejnog rešenja mernog sistema, odnosno konstrukcije mehaničkog mernog rama, bila je univerzalnost njegove primene, jednostavnost i mobilnost. Išlo se ka rešenju koje će omogućiti rad (merenje) sa svim nošenim, polunošenim i vučenim mašinama II i III kategorije i traktorima II i III kategorije. S obzirom da su te kategorije mašina, odnosno traktora, najzastupljenije u domaćoj i svetskoj poljoprivredi, takav merni sistem, odnosno rezultati njegove primene, bili bi od opšteg značaja ne samo u sferi naučno-istraživačkog rada, nego i direktno u primeni za dobijanje informacija o stanju zemljišta za potrebe savremene poljoprivredne proizvodnje.

Realizovano originalno rešenje mehaničke konstrukcije rešava problem merenja mehaničkog otpora obrade zemljišta (otpora vuče) različitim poljoprivrednim priključnim mašinama pri izvođenju same operacije. Konfiguracija i dimenzije uređaja omogućavaju merenje mehaničkog otpora za sve nošene, polunošene i vučene mašine (bez obzira na način



priključivanja za traktor) II i III kategorije kao i sa svim traktorima II i III kategorije prema standardu (ISO 730-1:1994) (R2007). Takođe, uređaj ne zahteva dodatne mere prilagođavanja (ukrućivanja, uključivanja, isključivanja, itd.) kod podizanja i spuštanja priključne mašine i prelaženja iz radnog u transportni položaj i obrnuto, što je veoma važno, jer na taj način procedura merenja ne zahteva dodatno angažovano vreme u odnosu na vreme koje se utroši tokom normalne operacije obrade zemljišta. Uređaj ne utiče na kvalitet rada mašine za obradu niti učinak traktorskog agregata. Dodatna mogućnost po kojoj se ovo rešenje izdvaja u odnosu na postojeća je omogućnost ekscentričnog priključivanja mašina u odnosu na simetralu traktora, odnosno simuliranje ekscentričnog opterećenja za potrebe određivanja vučnih karakteristika traktora (*Simikić et al., 2012*). Sva podešavanja priključne mašine u potpunosti zadržavaju svoju funkciju kada se mašina prikopča za merni ram. Praktično, sa ovim uređajem nema nikakvih smetnji u normalnoj operaciji obrade zemljišta. Ram omogućava da se zajedno sa priključnom mašinom podiže, spušta i transportuje bez dopunskih mera fiksiranja ili zaštite davača sile od preopterećenja, koja su prema autoru *Palmer (1992)* moguća pri transportu teških nošenih mašina.

Statička analiza rama obavljena je softverski, simulacijom opterećenja primenom metode konačnih elemenata. Softverska simulacija je značajno olakšala i ubrzala postupak projektovanja i realizacije ramske konstrukcije jer su se na 3D modelu radile brojne simulacije opterećenja kako bi se uvidele eventualne slabosti koje su korigovane sve dok se nije došlo do konačnog rešenja.

Kalibracija mernog rama obavljena je u stacionarnim (laboratorijskim) uslovima, simuliranjem horizontalnog opterećenja rama pomoću navojnog vretena. Paralelno je merena simulirana sila otpora i ukupno izmerena pomoću mernog sistema. Rezultati poređenja stvarnog i izmerog opterećenja pokazuju direktnu linearnu korelaciju među posmatranim veličinama ( $R^2=0,99$ ). Linearni model preseca  $y$  osu u vrednosti 0,07, a koeficijent uz promenljivu  $X$  ima vrednost 0,97 što govori da je prava pod uglom od približno 45%. Iz prethodnog se može konstatovati da je odziv mernog sistema jednako pouzdan kako pri malim tako i pri većim opterećenjima i da je horizontalno opterećenje koje se javlja na mernom ramu tokom merenja u potpunosti izmereno, bez potrebe za korigovanjem izmerenih vrednosti uvođenjem popravnih koeficijenata.

Pored pozitivnih karakteristika mernog rama, treba istaći da konstrukcija ima određene nedostatke. Činjenica je da je konstrukcija prilično robusna i da svojim dimenzijama, a pre svega rastojanjem priramidalnih tačaka veze (prednja-zadnja) utiče na prilično udaljšavanje



težišta priključne mašine od podiznog mehanizma traktora, što dodatno opterećuje hidraulični sistem i remeti stabilnost u transportu. Pored toga, poprečne grede sa prednje i zadnje strane onemogućavaju prenos pogona preko priključnog vratila traktora na radnu mašinu jer praktično postoji fizička barijera od same konstrukcije za prolazak kardanskog vratila od traktora prema radnoj mašini.

U svakom slučaju, originalno rešenje ramske konstrukcije mernog sistema zadovoljilo je sve prethodno postavljene ciljeve koji se tiču lakog priključivanja, univerzalnosti primene (rad sa mašinama kategorije II i III) i lake prenosivosti **čime je potvrđena prva hipoteza**. Takođe, konstrukcija je pokazala veliku pouzdanost i funkcionalnost u radu sa mašinama za obradu zemljišta, time što nije bilo otkaza tokom merenja, niti je sam postupak merenja zahtevao dodatne operacije koje inače nisu uobičajene tokom normalne operacije obrade zemljišta.

## 8.2. Preliminarno poljsko testiranje mernog sistema

Cilj testiranja bilo je provera pouzdanosti podataka dobijeni tokom merenja i razrada metodologije merenja otpora vuče sa aspekta optimalne frekvencije prikupljanja podataka sa dinamometara. Provera pouzdanosti podataka obavljena je poređenjem prosečnih vrednosti otpora vuče izmerenih pri obradi raonim plugom sa procenjenim, saglasno ASAE standardu (ASAE D497.6) koji definiše otpore vuče za sve mašine za obradu zemljišta saglasno tipu zemljišta i radnim parametrima.

Rezultati otpora vuče po prohodima ukazuju da postoje značajne varijacije amplitude signala sa malom periodom, što su zaključili drugi autori u svojim istraživanjima (*Singh et al., 1991; Hayhoe et al., 2002;*). Uzrok tome je u najvećem delu posledica heterogenosti zemljišta koje se prostorno posmatrano i po horizontali i po vertikali razlikuje u pogledu sabijenosti, vlažnosti, zapreminske mase, poroznosti, biološke aktivnosti, itd. To je izazvalo ciklično smenjivanje manjih i većih opterećenja na radnom telu. Takođe, usled deformacije zemljišne plastice pri kretanju po radnom telu, dolazi do pojava pukutina u zahvaćenoj plastici što se odražava na pojavu spektralnih gustina u oblasti visokih frekvencija (*Payne, 1956; Hayhoe et al., 2002; Stafford, 1984*). Jedan deo frekvencija signala sigurno je doprinos tzv. prirodne frekvencije same konstrukcije koja se javlja usled pojave elastične deformacije (*Kheiralla et al., 2003*).



Analiza distribucije vrednosti realno u vremenu pokazuje da je u pitanju pravilna raspodela, tj. da su se karakteristične vrednosti pojavljivale tokom čitavog procesa merenja, nisu grupisane u pojedinačnim segmentima i ne mogu se podvesti pod slučajnost.

Provera pouzdanosti izmerenih vrednosti pokazala je da su prosečne izmerene vrednosti otpora vuče pomoću mernog sistema, vrlo slične vrednostima koje su predviđene prema ASAE D497.6 za tip zemljišta na kojem je obavljeno testiranje, odnosno vrsti mašine za obradu i radnim parametrima (brzina, dubina i radni zahvat). Na osnovu analize može se zaključiti da merni sistem sa velikom pouzdanošću generiše validne vrednosti otpora vuče za realne uslove testa **čime je potvrđena druga hipoteza.**

Analizom smanjenog uzorka (manje frekvencije merenja) dobijenog iz osnovnog uzorka (W), utvrđena je velika sličnost među srednjim vrednostima i standardnim odstupanjima sa svih 6 redukovanih uzoraka (H1, H2, Q1, Q2, Q3 i Q4). Korelaciona analiza podataka pokazuje snažnu pozitivnu vezu među svim uzorcima. Najmanje vrednosti korelacije su 0,81 (0,91) između uzoraka Q1 i Q4 u slučaju otpora, što predstavlja značajnu korelacionu vezu. Takođe, među uzorcima H1 i H2 je koeficijent korelacije veoma visok i iznosi 0,94 u slučaju otpora, odnosno 0,97 za brzinu. To znači da u konkretnim uslovima u kojima je sproveden test, frekvencija merenja od 50 Hz je bila prekomerna, jer je time generisan veliki broj sličnih podataka koji u statističkom smislu imaju malu razliku, dok sa druge strane otežavaju proces obrade i analize. Međutim, ova konstatacija nije univerzalna i treba je uzeti sa rezervom jer frekvencija promene opterećenja zavisi od velikog broja faktora. Na nju najviše utiču tip i stanje zemljišta, ali ne treba zanemariti ni brzinu obrade, vrstu oruđa za obradu, krutost celog sistema, itd. Shodno tome, poželjno je da se za svaki slučaj odredi odgovarajuća frekvencija uz kvalitetne filtere ili pak da se svesno ide sa povećanim frekvencijama, pa u postprocesnoj analizi primenjuju odgovarajuće operacije filtracije i interpolacije kako bi se smanjio obim uzorka.

JTF (*Joint-time-frequency*) analiza sirovog signala ukupnog otpora vuče pokazuje da se signali otpora vuče raonog pluga dominantno javljanju sa frekvencijama maksimalno od 0 do 10 Hz kao što je navedeno i u *Hayhoe et al. (2002)*.



### 8.3. Komparativno merenje otpora vuče na plugovima sa različitim tipom plužnih tela

Merenje otpora vuče obavljeno je na identičnim plugovima, na istom lokalitetu (tipu zemljišta), pri istim radnim parametrima sa ciljem ispitivanja uticaja vrste plužnog tela na krajnji rezultat merenja. Plugovi su bili opremljeni različitim tipovima plužnih tela (standardno-MP i rešetkasto-SMP). Merenje je obavljeno na neobrađenom i podrivanom zemljištu u tri ponavljanja za svaku varijantu.

Izmerene vrednosti opterećenja na mernim mestima na neobrađenoj parceli (A) se statistički značajno razlikuju osim opterećenja na donjoj desnoj poluzi (D). Srednja vrednost opterećenja u gornjoj pluzi (G) za MP plug bilo je 8,04 kN, a za plug SMP 9,44 kN. Opterećenje donje desne poluge (D) za MP plug imalo je srednju vrednost 30,29 kN, a za plug SMP 30,52 kN. Opterećenje donje leve poluge (L) za MP plug imala je srednju vrednost 9,43 kN, a za plug SMP 8,84 kN. Ukupan otpor (R) iznosio je 31,68 kN za MP plug, odnosno 29,92 kN za SMP plug.

Vrednosti otpora vuče na parceli (B) se statistički razlikuju za sve komponente osim desne kao i kod prethodnog slučaja. Gornja komponenta (G) za MP plug imala je srednju vrednost 7,22 kN, a za plug SMP 7,86 kN. Donja desna komponenta (D) za MP plug imala je srednju vrednost 25,54 kN, a za plug SMP 25,24 kN. Donja leva komponenta (L) za MP plug imala je srednju vrednost 10,33 kN, a za plug SMP 8,55 kN. Ukupan otpor (R) iznosio je 28,66 kN za MP plug, odnosno 25,94 kN za SMP plug.

Rezultati analize podataka posmatrano za celokupan test u odnosu na tip pluga, su pokazali da postoje statistički značajne razlike u komponentama otpora koje su izmerene na gornjoj i donjoj levoj poluzi, kao i ukupnom otporu. Takođe, na desnoj poziciji izmerene su daleko veće vrednosti otpora u poređenju sa ostalim pozicijama, što ukazuje da je tokom merenja (obrade) postojala ekscentrična vuča kao rezultat nejednakog opterećenja u tačkama priključivanja (*Simikić et al., 2012*). Uzrok ove negativne pojave tokom oranja je pre svega mehanička struktura zemljišta (ritska crnica) po kojoj se ono svrstava u kategoriju zemljišta koja su teška za obradu. Na takvim zemljištima, a naročito kada se radi sa višebraznim plugovima gde se linija vuče mimoilazi u odnosu na liniju otpora zbog širine radnog zahvata, skoro da nije moguće uravnotežiti traktorski oruči agregat bez pojave zakretnog momenta, odnosno nejednakog opterećenja u tačkama za priključivanje. Gornja horizontalna komponenta otpora vuče (G) imala je vrednost 7,68 kN za MP i 8,67 za SMP tip pluga. U



ovom slučaju, gornja komponenta je veća za plug SMP u odnosu na plug MP. Međutim ta komponenta je negativnog predznaka, jer je opterećena na sabijanje, pa time praktično izaziva umanjeње ukupnog otpora vuče. Takođe, zbog položaja gornje poluge, njenim većim opterećenjem povećava se vertikalno opterećenje pogonskih točkova traktora, čime se poboljšavaju vučne karakteristike zbog boljeg prijanjanja pneumatika uz podlogu. Prosečno za obe parcele, donja desna komponenta imala je vrednost 28,22 kN za plug MP, a za plug SMP 27,97 kN. Donja leva komponenta imala je vrednost 9,28 kN za plug MP, a za plug SMP 8,69 kN. Ukupan uprosečen otpor vuče na celokupnom testu za plug MP bio je 30,18 kN, a za plug SMP 27,93 kN.

Statistički značajna razlika utvrđena je i među svim vrednostima komponenti otpora vuče u odnosu na tretman zemljišta-parcelu. Gornja komponenta gledano za parcelu A imala je vrednost 8,69 kN, a za parcelu B 7,55 kN. Donja desna komponenta za parcelu A imala je vrednost 30,39 kN, a za parcelu B 25,38 kN. Donja leva komponenta za parcelu A imala je vrednost 9,15 kN, a za parcelu B 9,41 kN. Ukupan otpor vuče za parcelu A iznosio je 30,85 kN, a na parceli B 27,24 kN. Ovaj rezultat je u potpunosti u skladu sa očekivanjima obzirom da je na parceli B obavljena duboka prethodna obrada podrivanjem, čime je narušena kompaktnost zemljišta samim tim zemljište učinjeno lakšim za obradu.

Dobijeni rezultati pokazuju da postoji razlika u vučnim otporima pluga sa punom i rešetkastom plužnom daskom na neobrađenom (polje A) i podrivanom zemljištu (polje B) što potvrđuje hipotezu da otpori vuče, pored fizičkog stanja zemljišta i radnih parametara, zavise i od konstrukcije radnih delova oruđa (Askari et al., 2013, Al-Janobi et al., 1998). Manje vrednosti otpora vuče na plugu sa rešetkastom plužnom daskom u odnosu na plug sa punom plužnom daskom mogu se opravdati činjenicom da je zbog manje kontaktne površine zemljišta i metala, odnosno delova pluga u slučaju rešetkaste plužne daske smanjena sila trenja koja je rezultovala smanjenim otporom vuče. Skoro identična razlika u ukupnom otporu vuče (od 6% odnosno 7%) koja je utvrđena na oba tretmana, dodatno potvrđuje validnost mernog sistema i kvalitet obavljenog testa. Rezultati ovog testa su verifikovali pouzdanost mernog sistema i konstrukcionu funkcionalnost za različite zemljišne uslove i priključne mašine **čime je još jednom potvrđena druga hipoteza.**



## **8.4. DoE u eksperimentu merenja otpora vuče plugova sa različitim plužnim telima**

Metodom palniraja eksperimenta posmatrana su tri ulazna faktora (plužna daska, parcela i prohod) koja su potencijalno uticala na ishod merenja otpora vuče. Kombinacijom ovih faktora na dva nivoa (pl. daska i parcela), odnosno tri nivoa (prohod) dobijeno je 12 različitih slučajeva. Posmatrano je više izlaznih veličina: opterećenje na gornjoj upornoj poluzi (G), donjoj desnoj podiznoj poluzi (D), donjoj levoj podiznoj poluzi (L) i ukupan otpor vuče (R).

Rezultati DoE analize pokazuju da je opterećenje G i ukupan otpor R u najvećoj meri zavisio od parcele, odnosno nešto manje od tipa plužne daske. Prohod nije značajno uticao na ishod merenja. Na opterećenje u donjoj desnoj poluzi (D) je praktično uticao samo faktor parcele, dok ostali faktori nisu imali značajan uticaj. Na opterećenje na levoj podiznoj poluzi (L) najviše je uticao tip plužne daske dok su ostali faktori imali slabiji uticaj. Ovi rezultati ukazuju da se opterećenje koje je dolazilo od pluga menjalo kako po horizontali (levo-desno) tako i po vertikali (gornje) sa promenom plužne daske. Prelazak sa jedne na drugu plužnu dasku pored promene ukupnog otpora, dovodi i do promene interakcije zemljišta i radnog tela što se manifestovalo različitim nivoom opterećenja mernih mesta i ukupnog otpora. Minimalan uticaj prohoda na ukupan otpor vuče ukazuje da su parcele bile prilično ujednačene po fizičkim osobinama zemljišta, što je bitan pokazatelj kvaliteta sprovedenog eksperimenta. Time su eliminisane moguće varijacije otpora od strane nekontrolisanih faktora.

DoE metoda je dala težinsku sliku uticaja posmatranih faktora na pojedinačne izlazne (merene) veličine. Analiza ostataka pokazala je su ostaci (razlike izmerenih i predviđenih vrednosti) normalno raspoređeni i da su vrednosti dobijenim iz modela bliske stvarnim, što ukazuje na pouzdanost modela.

## **8.5. Analiza fizičkih osobina zemljišta sa otpora vuče raonog pluga**

Ispitivanje fizičko-mehaničkih osobina zemljišta obavljeno je na 30 lokacija na parceli koje su pravilno raspoređene po tretmanima (po 10 za svaki tretman). Tretmani su podrazumevali različite obrade zemljišta (tanjiranje "T", oranje "O" i razrivanje "R") u prethodnoj godini kako bi se stvorili različiti početni uslovi testa. Pravilan raspored lokacija uzorkovanja je u preciznoj poljoprivredi uobičajen pre svega jer je efikasan sa aspekta prikupljanja uzoraka,



postprocesne obrade i izrade karata (*Viscarra-Rossel i McBratney 1998*). Sve lokacije na parceli su geografski određene primenom GPS prijemnika visoke tačnosti pozicioniranja. Nakon analize stanja zemljišta, obavljena je obrada zemljišta raonim plugom pri konstantnim radnim parametrima. Tokom obrade mereni su otpori vuče i proklizavanje pogonskog točka uz simultano zapisivanje koordinata mernih lokacija.

Rezultati analize fizičkog stanja zemljišta po tretmanima pokazali su da je sistem obrade u prethodnoj godini imao željeni efekat na stvaranje različitih početnih stanja zemljišta u mometnu testa. Najveća sabijenost izmerena je na tretmanu "O" (2,11 MPa), a na tretmanima "T" i "R" bila slična (1,62 MPa i 1,89 MPa). Sabijenost na tretmanu "O" manja do dubine od 14 cm u donosu na ostale tretmane, međutim na većim dubinama, tretman "O" u odnosu na tretmane "T" i "R" ima veću vrednost. Slične rezultate u svojim istraživanjima dobili su i *Filipović et al. (2006)*. Vertikalni diskontinuitet u sabijenosti se obično javlja između sloja koji se intenzivno obrađuje i neobrađivanog sloja (*Glinski i Lipeć, 1990*). Posmatrano po zonama, sabijenost zemljišta bila je najveća na tretmanu "O" (5,47 MPa) u sloju od 28 do 31,5 cm. Maksimalne sabijenosti na ostalim tretmanima su takođe postignute u istom sloju, s tim što je nešto manja bila na tretmanu "T" (4,36 MPa) u odnosu na tretman "R" (5,04 MPa). Ovo ukazuje da je prisustvo plužnog đona na tretmanu "O" bilo izraženije u odnosu na ostale tretmane što se može pripisati činjenici da iako je na ostala dva tretmana obrada bila plića i manje intenzivna, obrada je obavljena bez dubinskog gaženja podoraničnog sloja kao što je to slučaj kod oranja. Veće vrednosti otpora konusa na tretmanu "O" jesu posledica većeg gaženja tokom operacije pripreme koja je zbog grube strukture morala biti sprovedena u više prohoda, ali i zbog manje otpornosti oranog zemljišta na gaženje u poređenju sa zemljištem koje je obrađeno mašinama za redukovanu obradu (*Tebrügge i Düring, 1999*).

Kod zapreminske mase nije bilo većih odstupanja u vrednostima gledano po tretmanima. Prosečne vrednosti po tretmanima kretale su se u granicama od 1,44 do 1,45 g/cm<sup>3</sup>. Posmatrano po slojevima (0-15 cm i 15-30 cm) nešto veća varijabilnost bila je na tretmanu "O" gde je zapreminska masa u sloju od 0-15 cm 1,4 MPa, a u sloju od 15-30 cm 1,49 MPa. Na tretmanu "R" zapreminska masa je u sloju od 0-15 cm 1,43 MPa, a u sloju od 15-30 cm 1,46 MPa. Na tretmanu "T" zapreminska masa je u sloju od 0-15 cm 1,42 MPa, a u sloju od 15-30 cm 1,45 MPa. Generalno, može se zaključiti da zapreminska masa zemljišta nije bila posledica primenjenog tretmana i kao takva nije mogla imati uticaj na rezultate otpora vuče. Slične rezultate u svojim istraživanjima dobili su i drugi autori (*D'Haene et al., 2008; Arshad et al., 1999; Jabro et al., 2008; Logsdon et al., 1999; Bogunović et al., 2013*).





Stanje vlažnosti zemljišta se razlikovalo kako po površini (tretmanima) tako i po dubini. Najmanja vlažnost zemljišta bila je na tretmanu "O" i iznosila je 17,4%, na tretmanu "T" 18,01%, a na tretmanu "R" 18,55%. Između vrednosti utvrđena je statistički značajna razlika na nivou značajnosi od 95%. U zoni od 0-15 cm praktično nije bilo razlika po tretmanima, razlike su se pojavile tek u sloju od 15-30 cm. Tu je najmanja vlaga izmerena na tretmanu "O" (15,57%), zatim na tretmanu "T" (16,75%) i najviše na tretmanu "R" (17,64%). Obzirom da se konzeracijskim sistemima obrade zemljište ne prevrće i delimično ostaje pokriveno biljnim ostacima, potpuno je očekivano da na varijantama "T" i "R" zbog manjeg stepena evaporacije bude veći sadržaj vlage u poređenju sa varijantom "O", što navode i autori *De Vita et al. (2007)*.

Mehanički sastav određen je iz istih uzoraka koji su korišćeni za zapreminsku masu i vlažnost. Međutim, poređenje podataka i po tretmanima i po slojevima za sve frakcije pokazuje da nema velikih razlika. Analiza mehničkog sastava nije obavljena da bi se sagledao eventualni efekat tretmana na distribuciju frakcija, već da se vidi da li postoje prirodne razlike u rasporedu po delovima parcele gde su primenjeni različiti tretmani.

Na osnovu prethodno iznetog, može se konstatovati da je tretman uticao na fizičko stanje zemljišta. Ovo je bio dobar pokazatelj da su stvoreni povoljni uslovi za prostorno mapiranje merenih parametara i njihovu komparaciju sa vučnim otporima izmerenih pomoću mernog sistema.

Rezultati analize otpora vuče pokazali su da postoji statistički značajna razlika u odnosu na tretmane. Najveća srednja vrednost otpora vuče dobijena na tretmanu "O" (16,90 kN), potom na tretmanu "R" (15,81 kN), a najmanja na tretmanu "T" (15,52 kN). U odnosu na prohode za čitavu parcelu, otpori su se razlikovali. Najveća srednja vrednost otpora na tretmanu "T" zabeležena je u 6. prohodu (18,94 kN), na tretmanu "O" u 4. prohodu (18,13 kN), a na tretmanu "R" u 2. prohodu (18,13 kN).

Klizanje pogonskog točka se takođe statistički razlikovalo po tretmanima. Najveća srednja vrednost zabeležena je na tretmanu "O" (11,84%), potom na tretmanu "R" (10,84%), a najmanja na tretmanu "T" (10,74%), što je potpuno analogno izmerenim vrednostima otpora vuče. Ta analogija je potvrđena u mnogobrojnim ispitivanjima (*Simikić et al., 2010; Schreiber i Kutzbah, 2008; Sümer i Sabanaci, 2005*). Proklizavanje se razlikovalo po prohodima u svakom od tretmana. Na tretmanu "T" najveće proklizavanje bilo je u 2. prohodu (12,63%). Na tretmanu "O" najveće klizanje bilo je u 1. prohodu (13,41%), dok je na tretmanu "R" najveće bilo u prohodu 2. (12,82%).



Korelaciona analiza združenih podataka (za sve tretmane) otpora vuče i fizičkih osobina zemljišta poređenih prema kriterijumu iste lokacije na parceli, pokazala je da je najснаžnija pozitivna veza postoji između otpora vuče i sabijenosti ( $R=0,85$ ). Slične rezultate istraživanja u svojim radovima navode autori *Desbiolles et al. (1999)*. Slaba negativna veza postignuta je između otpora vuče i vlažnosti zemljišta ( $R=-0,41$ ). U istraživanjima *Arvidsson i Keller (2011)* utvrđena je takođe negativna korelacija između otpora vuče i sadržaja vlage u zemljištu. Veza otpora obrade i vlažnosti zemljišta ne mora biti opšta, ona može važiti do određene "granične" vlažnosti zemljišta, preko koje bi otpor verovatno rastao zbog povećane adhezije.

Korelaciona analiza podataka na tretmanu "T" pokazala je najveću pozitivnu vezu između otpora vuče i sabijenosti ( $R=0,91$ ). Slaba veza postignuta je između zapreminske mase i sadržaja peska ( $R=-0,55$ ), odnosno zapreminske mase i praha sa glinom ( $R=0,55$ ). Na tretmanu "O" najveća pozitivna veza postignuta je između otpora vuče i sabijenosti ( $R=0,94$ ). Slabe korelacije utvrđene su između parametara sabijenosti zemljišta i udela peska ( $R=-0,66$ ), odnosno sabijenosti i udela praha sa glinom ( $R=0,66$ ), zapreminske mase i vlage ( $R=-0,64$ ), i otpora vuče sa udelom peska ( $R=-0,60$ ), odnosno otpora vuče sa udelom praha sa glinom ( $R=0,60$ ). Na tretmanu "R" najveća pozitivna veza postignuta je između otpora vuče i sabijenosti ( $R=0,90$ ). Slaba veza postignuta je između otpora vuče i udela peska ( $R=-0,44$ ), odnosno udela praha sa glinom i otpora ( $R=0,44$ ).

Rezultati korelacije podataka otpora vuče i fizičkih osobina zemljišta upoređenih u konkretnim lokacijama na parceli, pokazali su stabilnost bez obzira na tretman, te se na osnovu toga može reći da su postignute relacije relevantne. Na osnovu rezultata i njihove analize po tretmanima, može se zaključiti da postoji izvesna veza između otpora vuče i fizičkih osobina zemljišta, s tim što se od svih najviše istakao parametar sabijenost zemljišta (*Desbiolles et al., 1999; Arvidsson i Keller, 2011*), koji je u svim varijantama testa imao direktan uticaj na otpor vuče ( $R^2 > 73\%$ ), čime je potvrđena treća hipoteza.

## 8.6. Semivariogramsko modelovanje geopodataka

Semivariogramskom analizom istražene su prostorne relacije među podacima koji su geografski određeni, tj. u sebi nose informaciju o geografskoj poziciji. Na osnovu definisanih prostornih relacija, urađena je prostorna predikcija vrednosti u postupku variogramskog



modelovanja. Pre samog procesa kreiranja tematskih karata (mapa) urađena je prethodna analiza sirovih podataka.

U prvom koraku sagledan je kvalitet raspodele prikupljenih podataka. Osnovni preduslov za kvalitetnu predikciju je da su vrednosti normalno raspoređene. Na osnovu histogramске analize i dobijenih tabelarnih pokazatelja oblika distribucije, najveća pravilnost je utvrđena kod podataka zapreminske mase, dok podaci o sadržaju gline, praha i peska imaju delimično pravilnu raspodelu. Podaci sabijenosti zemljišta imaju značajnu disperziju i daleko najviše odstupaju od normalne raspodele. Ovo ukazuje na činjenicu da bi se sa većim brojem poljskih opservacija (pokazatelja fizičkog stanja zemljišta) dobile kvalitetnije odnosno verodostojnije prostorne relacije. Kada se govori o optimalnom broju prostornih opservacija, to prvenstveno zavisi od nivoa varijabilnosti i prostorne anizotropije parametra koji se posmatra (*Kerry et al., 2010*). Obzirom da je postupak uzorkovanja na parceli vremenski veoma zahtevan, u praksi se najčešće pribegava kompromisnom rešenju kako bi se zadovoljile organizacione i tehničke mogućnosti u tom momentu, što na kraju ne mora dati najbolji rezultat. Sa tog aspekta, planiranje eksperimenta veoma je nezahvalno, a ishodišno neizvesno. U naučnoj literaturi postoji samo nekoliko radova koji se bave problematikom uzorkovanja za potrebe precizne poljoprivrede (*Kerry et al., 2010*). Stoga je neophodno definisati jasne, konzistentne okvire uzorkovanja u preciznoj poljoprivredi (*McKenzie et al., 2008*).

U analizi geopodataka rađeno je grafičko prikazivanje trenda podataka u realnom prostoru. Linije trenda predstavljaju aproksimaciju podataka krivim linijama kao funkcija polinoma drugog reda. Analiza trenda omogućila je identifikaciju globalnog trenda seta podataka po dužini i širini parcele. Ovim su podaci predstavljeni u trodimenzionoj perspektivi tako što  $x$ - $y$  ravan predstavlja ravan parcele, a  $z$  osa izmerenu vrednost.

Trendovski prikazani podaci iako su samo orijentacioni (grafičko), u potpunosti su u saglasnosti sa rezultatima statističke analize prikazani numerički. Prostorno prikazivanje trenda pokazalo se kao brza, jednostavna, ali i korisna alatka za sagledavanje prostornog rasporeda podataka čime se mogu lako uočiti eventualni ekstremi kao i mesto njihove kvantifikacije.

Semivariogramsko modelovanje obavljeno je za svaku grupu podataka (parametar) pojedninačno kako bi se što podesnije obavila kriging interpolaciona tehnika predviđanja vrednosti na delovima parcele koji nisu evaluirani. Na osnovu parametara semivariogramskog modela utvrđen je kvalitet prostorne predikcije.



Parametri semivariograma podataka zapreminske mase zemljišta pokazali su da postoji određena prostorna zavisnost i da model daje dobru predikciju. Srednja vrednost greške predikcije je tek 0,0001, a koren standardizovane srednje kvadratne greške 1,04, što govori da je model pouzdan.

Odabrani semivariogramski model podataka vlažnosti zemljišta, na osnovu pokazatelja kvaliteta predikcije ima nešto veću grešku u odnosu na model zapreminske mase. Vrednost srednje predikcione greške je -0,025, a koren standardizovane srednje kvadratne greške 1,087, što govori da je model relativno pouzdan.

Semivariogramski model za podatke sabijenosti zemljišta ima dobre pokazatelje kvaliteta predikcije. Vrednost srednje predikcione greške je 0,0045, a koren standardizovane srednje kvadratne greške 1,05, što govori da je model pouzdan.

Izabrani semivariogramski model za podatke o udelu fine frakcije (glina+prah) ima nešto slabije pokazatelje kvaliteta predikcije u odnosu na prethodne modele. Vrednost srednje predikcione greške je -0,15, a koren standardizovane srednje kvadratne greške 1,14.

Variogramski model podataka udela peska u zemljištu praktično se kvalitativno ne razlikuje od prethodno pomenutog. Vrednost srednje predikcione greške je 0,16, a koren standardizovane srednje kvadratne greške 1,10.

Variogramski modeli otpora vuče i klizanja pogonskog točka zbog velike gustine prostornih podataka imaju veoma dobre pokazatelje pogreške modela. Što se tiče modela otpora vuče, vrednost srednje predikcione greške je 0,008, a koren standardizovane srednje kvadratne greške 1,029. Parametri modela klizanja pogonskog točka su još stabilniji. Vrednost srednje predikcione greške je 0,00001, a koren standardizovane srednje kvadratne greške 0,71. Kvalitetnija predikcija parametra klizanja točka je posledica manje varijabilnosti sirovih podataka u odnosu na podatke otpora vuče koji su imali značajne oscilacije u kratkim vremenskim intervalima. Pojava velikih lokalnih varijabilnosti kao u slučaju otpora vuče, sa aspekta geostatistike je poznata je kao efekat "šuma" (*Kerry et al., 2010*). Ovo ukazuje da je podatke otpora vuče možda trebalo u postupku obrade u većoj meri uprosečiti, kako bi se dobila njihova veća stabilnost, odnosno manja varijabilnost. Sa druge strane, po tom pitanju uvek postoji opasnost da se uprosečivanjem podataka izgubi njihova preciznost, stoga se ne može sa sigurnošću tvrditi koliki fond prostornih podataka otpora vuče bi dao najbolji rezultat.



## 8.7. Tematske karte-mape

Daleko ozbiljnija i naprednija tehnika grafičkog prikazivanja prostornih podataka jesu tematske karte koje su izrađene na osnovu predviđenih vrednosti u postupku semivariogramskog modelovanja i kriging interpolacije. Kada se priča o preciznoj poljoprivredi na otvorenom polju, obično se misli na veliki broj poljskih informacija koje su predstavljene u obliku 2D karte, koje daju uvid u stanje pojedinih delova parcele i istovremeno mogućnost da se na osnovu informacije koje mape-karte nose u sebi, sprovede adekvatna popravna operacija, optimalno na svim delovima parcele (Neményi et al., 2006; Sirjacobs et al., 2001; Mouazen et al., 2007).

Izrađena tematska karta zapreminske mase zemljišta pokazuje zone sličnih vrednosti koje su nepravilno grupisane na parceli, bez ikakve orijentacije prema nekom od primenjenih tretmana. Isto se može konstatovati za kartografski prikaz parametara sadržaja praha+glina i peska u zemljištu, s tom razlikom što su u ovom slučaju zone grupisane sa određenom pravilnosti. Karta praha+glina pokazuje da su veće vrednosti koncentrisane na krajevima parcele (bliže uvratini), a manje na sredini posmatrano po dužini. Karta sadržaja peska u zemljištu predstavlja suprotan slučaj gde su veće vrednosti koncentrisane na sredini parcele, a manje bliže uvratinama. Tematske karte vlažnosti zemljišta, sabijenosti zemljišta, otpora vuče i klizanja pogonskog točka pokazale su da su oblasti koje simbolizuju slične vrednosti raspoređene manje ili više kao i tretmani na parceli.

Sa karte vlažnosti zemljišta mogu se praktično uočiti dva karakteristična područja. Sredina parcele sa nižim bilansom stanja vlažnosti u zemljištu, što se poklapa sa tretmanom oranje i ostali delovi sa višom vlažnošću zemljišta na kojima su primenjeni tretmani razrivanje i tanjiranje.

Na karti sabijenosti zemljišta jasno se može zaključiti da je zona najveće sabijenosti u svom najvećem delu zahvata područje parcele na kojem je tretman bio oranje. Na tretmanu razrivanje, vidno su manje raspoređene zone povećane sabijenosti, dok je na delu koji je tanjiran najmanje zahvaćen istim.

Mapa otpora vuče takođe pokazuje orijentaciju oblasti sa različitim nivoima vrednosti. Primetno je da su otpori vuče najveći u zoni gde je obavljena prethodna obrada oranje. Isto tako, manje vrednosti su pozicionirane na delu koji je razrivan i tanjiran. Nešto veća zastupljenost viših vrednosti otpora vuče primetna je na delu koji je razrivan u odnosu na tanjiran deo.



Može se reći da karta klizanja pogonskog točka, na najbolji način razgraničava tretmane. Jasno se uočava zona većeg klizanja, a to je sredina parcele gde je tretman bio oranje, a manje vrednosti na delu gde je obavljeno tanjiranje i razrivanje.

Rezultati variogramске analize, a pre svega izrađene karte merenih parametara su pokazali da su geostatistički alati veoma korisni i da imaju veću upotrebnu vrednost od standardnih statističkih alata. Takođe, može se konstatovati da su rezultati geostatističke analize podataka i njihovi grafički prikazi u potpunosti usaglašeni sa rezultatima dobijenim primenom standardnih metoda statističke obrade. Oba pristupa su pokazala da su tretmani imali uticaj na fizičko stanje zemljišta pre svega sabijenost i vlažnost, kao i otpore vuče i klizanje pogonskog točka. Rezultati su pokazali da mehanički sastav i zapreminska masa su se menjali nezavisno od postavljenih tretmana.

Ovi rezultati nedvosmisleno **potvrđuju četvrtu hipotezu** disertacije kojom se pretpostavlja da će na podacima prikupljenim pomoću mernog sistema moći da se primene geostatističke tehnike analize podataka i kartografskog prikazivanja. Rezultati merenja otpora vuče su upotrebljivi prilikom ocenjivanja stanja zemljišta u pogledu fizičko-mehaničkih svojstava. Takođe, dokazano je da je oprema iz koje se sastoji merni sistem pouzdana, metodologija merenja odgovarajuća, a tehnika obrade i prikazivanja podataka napredna.

## 8.8. Merenje otpora vuče u funkciji radne brzine

Merenje otpora vuče raonog pluga obavljeno je na tri različite parcele na kojima se proizvodnja obavljala nezavisno. Na parcelama su predusevi bili soja (parcela A), pšenica (parcela B) i kukuruz (parcela C). U takvim zemljišnim uslovima merene su promene otpora vuče sa promenom radne brzine u granicama eksploatacionih brzina.

Rezultati preliminarnog pregleda stanja fizičkih osobina zemljišta na parcelama na kojima je obavljeno merenje, pokazuju da su se pogledu sabijenosti parcele statistički značajno razlikovale, što je očekivano, obzirom na različite preduseve i primenjene tehnologije proizvodnje. Na parceli "C" je bila najmanja prosečna sabijenost (1,40 MPa), najverovatnije jer je predusev bila pšenica koja u tehnologiji proizvodnje zahteva mali broj operacija u toku vegetacije, odnosno zemljište se minimalno sabija prolazima mehanizacije. Na parceli "A" zabeležena je nešto veća sabijenost (1,48 MPa), a najveća na je bila na parceli "B" (1,59 MPa). Objašnjenje povećane sabijenosti na parceli "B" se odnosi na način ubiranja. Naime, kukuruz je ubiran u klip sa vučenim dvorednim beračem u trenutku kada je vlažnost



zemljišta bila povećana. Inače, tokom operacije berbe kukuruza u klip u vučenim beračima, pokrivenost parcele tragovima točkova je preko 80% gde se neki tragovi višestruko gaze. U pogledu vlažnosti, parcele su bile sličnije. Najmanja vlažnost utvrđena je na parceli "A" (19,10%), na parceli "B" nešto veća (19,42%) i najveća na parceli "C" (19,79%). Po zapreminskoj masi, parcela gde je prethodno uzgajana soja (parcela A) odnosno kukuruz (parcela B) su bile istog ranga ( $1,51 \text{ g/cm}^3$  i  $1,48 \text{ g/cm}^3$ ) dok je zapreminska masa parcele gde je usev bila pšenica (parcela C) imala statistički manju vrednost od prethodne dve ( $1,39 \text{ g/cm}^3$ ). Ovakvo stanje parametra zemljišta išlo je u prilog kvalitetu testa, jer parcele na neki način predstavljaju tretmane odnosno varijante merenja. S obzirom da se radilo o makro parcelama površine 4,8 ha, 4 ha i 3,8 ha, napravljen je velik broj ponavljanja svake brzine, što isključuje mogućnost slučajnog ishoda merenja.

Rezultati su pokazali da otpor vuče na svim parcelama, u rasponu radnih brzina, ima pozitivan linearni trend promene što se poklapa sa većinom rezultata stranih autora (*Serrano i Peča 2008; Al-Janobi i Al-Suhaibani 1998; Owende i Ward 1999; Naderloo et al., 2009*). Odabrani linearni modeli sa velikom pouzdanošću opisuju zavisnost otpora vuče od radne brzine. Pokazalo se da model koji najbolje opisuje zavisnost brzine i otpora se odnosi na parcelu "C" ( $R^2=0,98$ ). Slabije, ali i dalje veoma pouzdan je model parcele "A" ( $R^2=0,97$ ), a najlošiji je model parcele "B" ( $R^2=0,87$ ). Model koji je predstavljen kao prosečna zavisnost otpora vuče i radne brzine za sve tri parcele, takođe je dao veoma pouzdanu vezu između posmatranih parametara ( $R^2=0,9$ ). Koeficijenti nagiba  $n$  iz modela govore da je najveći otpor vuče za jedinično povećanje radne brzine bio na parceli "B" ( $B=1,47$ ). Tome ide u prilog podatak o sabijenosti koja je takođe bila najveća na parceli "B". Sa druge strane, najmanji porast otpora bio je na parceli "A" ( $B=0,74$ ), i on je blizak porastu otpora na parceli "C" ( $B=0,96$ ). U slučaju uprosečenog modela, koeficijent nagiba ima vrednost 0,85, što daje porast specifičnog otpora vuče od  $4,64 \text{ kN/m}^2$  za svaki  $1 \text{ m/s}$  porasta radne brzine. Ovaj rezultat potpuno korespondira sa rezultatima koji su dobijeni u ranijim istraživanjima stranih autora (*Reaves i Schafer, 1975; Summers et al., 1986*). Prema njihovim navodima, otpor vuče ima porast od  $5 \text{ kN/m}^2$  sa porastom radne brzina za  $1 \text{ m/s}$ , što je blisko dobijenoj vrednosti za uslove testa iz ove disertacije. Isti podatak korišćen je u radu *van Bergeijk et al. (2001)* kod svođenja otpora na istu radnu brzinu. Time je praktično još jednom potvrđena hipoteza o visokoj pouzdanosti razvijenog mernog sistema, kao i njegove upotrebljivosti za potrebe određivanja vučnih otpora mašina za obradu.



## 8.9. Spektralna analiza otpora vuče

Analiza frekventnog spektra signala otpora vuče i signala sa akcelerometra postavljenog na nosaču plužnog tela imala je za cilj da se bolje sagledaju njihove periodičnosti kao posledica fizičko-mehaničkih osobina i radnog režima, tj. brzine. Više ili manje, sva dosadašnja ispitivanja na temu otpora vuče, potvrđuju da je opterećenje na priključnim mašinama periodičnog karaktera. Jedan od izvora veće frekvencije opterećenja potiče od interakcije zemljišta i mašine, a rezultat je načina obrade. Prema *Stafford (1984)*, krto drobljenje dovodi do formiranja uzastopnih smičućih ravni koje izazivaju stvaranje zemljišnih blokova tokom prolaza radnog tela kroz zemljište. Periodičnost formiranja smičućih ravni izaziva periodična opterećenja na alatima za obradu. Razmaci između ravni drobljenja zavise od tipa zemljišta, vlažnosti zemljišta, zapreminske mase zemljišta i brzine radnog tela (*Owen et al., 1990*). Manja frekvencija periodičnosti opterećenja na radnim telima pod pretpostavkom da je radna dubina relativno konstantna, najčešće je odraz lokalne prostorne varijabilnosti u fizičkim osobinama zemljišta kao što su vlažnost zemljišta, tekstura zemljišta i sabijenost, odnosno zapreminska masa (*Lapen et al., 2001a*). Sabijenost zemljišta jedan je od izvora ciklične varijacije u čvrstoći zemljišta što se može identifikovati spektralnom analizom signala dobijenom merenjem vučnog otpora (*Nielsen et al., 1983*).

Rezultati spektralne analize signala otpora vuče pokazali su određenu stabilnost u pogledu rasporeda frekventnih gustina gledano u odnosu na parcele. Zapažena je i pravilnost rasporeda frekventnih gustina u odnosu na brzine. Spektralne gustine signala se pomeraju prema višim frekvencijama srazmerno povećanju radne brzine. To je praktično utvrđeno na svim tretmanima-parcelama. Ova zakonitost ukazuje da se karakteristične pojave koje izazivaju periodičnost signala javljaju jednim delom nezavisno od fizičkog stanja na parcelama i da je to verovatno delom posledica interakcije zemljišta i mehaničke konstrukcije. Takođe je potvrđena činjenica da spektralne gustine signala otpora vuče rapidno opadaju sa porastom frekvencije (*Hayhoe et al., 2002*). U zoni frekvencija od 0 do 5 Hz se nedvosmisleno nalaze gotovo svi signali sa najvećim amplitudama koji suštinski predstavljaju otpor vuče. Karakteristiku da se glavne varijacije sile na oruđima za obradu dešavaju pri frekvenciji manjoj od 3 Hz zapažio je *Owen et al. (1990)*. Signali u oblasti manjih frekvencija pokazali su da postoji određena veza sa fizičkim osobinama. Naime, primećena je veća nestabilnost signala na parceli gde je predusev bio kukuruz (parcela A) i gde je ustanovljena najveća sabijenost i zapreminska masa. Amplitude signala na frekvencijama od 5 do 12 Hz su





najverovatnije posledica formiranja pukotina odnosno smičućih ravni unutar odsečene plastice (Hayhoe et al., 2002), mada neki autrori tu pojavu pripisuju lokalnim varijacijama fizičkih osobina zemljišta kao što su vlažnost zemljišta, tekstura, čvrstoći itd. (Lapen et al., 2001a; Lapen et al., 2001d). Više frekvencije signala imale su slične amplitude. Njihove varijabilnosti u odnosu na parcele potencijalna su posledica specifične strukture zemljišta, interakcije radnog tela i zemljišta ili žetvenih ostataka (Owen et al., 1990).

Sagledavanje spektralne karakteristike signala otpora vuče između ostalog dalo je dobar uvid u lokalnu varijabilnost osobina zemljišta (Lapen et al., 2001b) i kako bi se došlo do optimalnog metoda filtriranja i obrade podataka. Filtracija signala je veoma bitna u postupku obrade signala jer može pomoći u minimiziranju lažnih varijacija u signalu izazvanih pojavom šuma i drugih anomalija. Ovo istraživanje je pokazalo da signali čije su frekvencije veće od 10 Hz nemaju značaja sa aspekta merenja otpora vuče.

### **8.10. Spektralna analiza oscilacija radnog tela**

Spektralna karakteristika signala akcelerometra pokazala je da se na oruđu javljaju opterećenja koja izazivaju značajne visokofrekventne oscilacije radnog tela u rasponu od 50 do 250 Hz. Nevidljivost visokih frekvencija u spektralnoj karakteristici otpora vuče posledica je neosetljivost ovih mernih elemenata na visoke frekvencije. U frekventnom spektru oscilacija nije toliko uočljivo pomeranje frekventnih gustina prema višim frekvencijama sa povećanjem brzine kao što je bio slučaj kod spektralne karakteristike otpora vuče. Razog tome je što su frekvencije prikazane u većem frekventnom rasponu (0-300 Hz) pa prema tome, "mala" promena brzine nije mogla izazvati uočljiva pomeranja. Sa stanovišta amplitude signala, tu postoji razlika kako sa aspekta parcele (preduseva) tako i sa aspekta radnih brzina. Ove varijacije svakako se mogu pripisati fizičkim karakteristikama zemljišta i uticaju promene režima kretanja zemljišta koje je u interakciji sa radnim delovima pluga. Maksimumi amplituda se pojavljuju različito u pogledu radnih brzina i u pogledu preduseva. Parcela gde je soja bila predusev (parcela A) u zoni frekvencija do 50 Hz ima skoro identičnu karakteristiku, izuzev signala najmanje brzine koja vidno ima manju amplitudu. U oblasti frekvencija iznad 50 Hz, frekventne gustine signala imaju amplitudne maksimume u različitim frekventnim zonama. U zoni od 50 do 150 Hz dominiraju signali većih brzina, dok iznad 150 Hz frekventne gustine imaju sličnu karakteristiku. Na predusevu kukuruz (parcela B) u zoni frekvencija do 50 Hz primećena je velika sličnost u signalima uz



vertikalnu pomenost amplituda srazmerno radnim brzinama. U zoni od 50 do 250 Hz dominiraju frekvencije većih radnih brzina. Iznenađujuća pojava je karakteristika signala najniže radne brzine koja ima daleko najveću amplitudu u poređenju sa signalima viših radnih brzina u zoni frekvencija od 200 do 300 Hz, što je svakako neočekivano. Ova pojava dokazuje da se spektralne karakteristike signala sa akcelometra menjaju sa promenom radnog režima. Na parceli gde je predusev pšenica (parcela C), karakteristika signala različitih brzina do 50 Hz, slično kao i na predusevu kukuruz (parcela B) ima pravilnu vertikalnu raspodelu, što znači da su signali većih brzina pomereni prema većim vrednostima u odnosu na signale manjih brzina. Od 50 do 150 Hz najveće amplitude su od signala većih radnih brzina, dok u zoni od 200 do 250 Hz najveća je amplituda najmanje brzine kao u slučaju parcele gde je predusev bio kukuruz.

Spektralna analiza signala akcelometra pokazala se kao kvalitetna dopuna spektralnoj karakteristici signala otpora vuče za potrebe procene fizičkog stanja zemljišta. Činjenica da postoje značajne spektralne gustine u opsegu od 50 do 250 Hz na neki način prevazilazi tvrdnje da se najveći deo signala otpora vuče javlja pri niskim frekvencijama. To ukazuje na potrebu da se prilikom tumačenja fizičkog stanja zemljišta spektralnim karakteristikama signala sa dinamometra, obavezno uključi merač vibracija (akcelometar) koje su u direktnoj vezi sa promenom opterećenja na radnom telu.



## 9. Zaključak

**R**azvoj sistema za merenje otpora vuče obuhvatio je sve aktivnosti vezane za projektovanje, realizaciju, proveru funkcionalnosti, validaciju i njegovu primenu u realnim uslovima poljskog istraživanja. Sistem je osmišljen kao celina sačinjena od mehaničke ramske konstrukcije i merno-akvizicione opreme kao i odgovarajuće metodologije po kojoj će sistem biti upotrebljivan za potrebe pozicionog merenja otpora vuče na priključnim mašinama za obradu zemljišta II i III kategorije prema standardu (ISO 730-1:1994) (R2007).

Softversko projektovanje ramske konstrukcije i statička simulacija pokazali su se kao veoma korisna tehnika koja omogućava maksimalno skraćenje vremena potrebno za dolaženje do idejnog rešenja. Svaka greška u projektovanju vidljiva je već u početnim fazama i lako se obavljaju korekcije na samom modelu bez potrebe za izradom nulte serije. Sam postupak ne zahteva angažovanje dodatnih resursa, niti ljudskih niti materijalnih izuzev minimalne kompjuterske infrastrukture, što ga čini sa ekonomskog stanovišta veoma efikasnim.

Realizovano rešenje ramske konstrukcije se pokazalo kao veoma pouzdano i funkcionalno u radu sa priključnim mašinama i traktorima II i III kategorije. Tokom testiranja u eksploatacionim uslovim, nije bilo nikakvih zastoja, otkaza niti remećenja kvaliteta rada i učinka priključne mašine. Kroz testiranja se pokazalo da procedura rukovanja i podešavanja radne mašine u potpunosti zadržava prvobitnu funkciju. Takođe, kao veoma bitna stavka se pokazala i mobilnost koja omogućava lako i brzo prenošenje uređaja na mesto obavljanja eksperimenta. Priključivanje traktora za ram, i mašine za ram, obavlja se po standardnim procedurama, bez neophodnih mera dodatnog ukrućivanja za potrebe sigurnosti u transportu ili zaštite mernih davača. Dodatna prednost ove koncepcije jeste i mogućnost ekscentričnog priključivanja mašina za ram u širokom dijapazonu.



Upotreba mernih ćelija fabričke izrade doprinela je većoj tačnosti samog sistema, mada je sa druge strane zahtevalo više prostora na osnovnom ramu što je konstrukciju učinilo robusnijom.

Kalibracija mernog rama pokazala je da se stvarne vrednosti otpora vuče u potpunosti registruju i mere sa velikom tačnosti (99%) kako u domenu malih tako i velikih opterećenja, što potvrđuje kalibraciona kriva koja prolazi kroz koordinatni početak i zaklapa ugao od  $45^{\circ}$  u donosu na apscisu.

Nedostatak koji je primećen na ramu je njegova dužina. Pomeranje radne mašine u nazad za 692 mm koliko je dužina rama, može u nekim situacijama kada se radi sa težim mašinama da dovede do remećenja stabilnosti agregata, pre svega zbog rasterećenja prednjih upravljačkih točkova traktora. Drugi nedostatak je nemogućnost prenosa pogona sa PVT na radnu mašinu, zbog rasporeda elemenata rama koji to fizički onemogućavaju. To ukazuje na činjenicu da je razvoj mernog sistema neprekidan proces i da ga treba nastaviti i u budućnosti.

Rezultati preliminarnog testiranja novog sistema u postupku merenja otpora vuče raonog pluga II kategorije su potvrdili visoku tačnost i širok spektar mogućnosti obrade dobijenih podataka. Otpori vuče tokom merenja su bili veći na neobrađenoj parceli (kompaktnijem zemljištu), u odnosu na parcelu koja je prethodno plitko potanjirana (rastresitije zemljište). Komparacijom srednje vrednosti ukupnog otpora vuče za ceo test, utvrđena je velika sličnost sa vrednošću predviđenog otpora vuče saglasno standardu ASAE D497.6.

Raspodela izmerenih vrednosti sile otpora vuče u funkciji brzine odgovara zakonitostima normalne raspodele, što znači da one nisu proizvod slučajnosti, tj. nisu nasumične već postoji određena tendencija.

*Joint-time-frequency* analiza je obavljena posmatranjem spektra signala u vremenu i uočeno je da je su signali na najvećim amplitudama imali frekvenciju ispod 10 Hz.

Statističko poređenje podataka dobijenih pri redukovanoj (simuliranoj) frekvenciji merenja sa sirovim podacima otpora vuče koji su prikupljeni pri frekvenciji od 50 Hz, pokazalo je da nema značajnih razlika, i da je nepotrebno obavljati merenje na visokim frekvencijama (preko 10 Hz), jer se time komplikuje pristup obradi i filtracije signala.

Merenje otpora vuče na plugovima sa rešetkastom i punom plužnom daskom pokazalo je da sistem funkcioniše bez problema u najtežima zemljišnim uslovima (ritska crnica). Ustanovljene razlike u opterećenju leve i desne strane u slučaju oba pluga dokazale su da je tokom merenja postojala ekscentrična vuča što je bilo evidentno tokom samog merenja po nestabilnosti agregata u brazdi.



Razlika u vučnim otporima pluga sa punom i rešetkastom plužnom daskom na neobrađenom i podrivanom zemljištu potvrđuje hipotezu da otpori vuče, pored fizičkog stanja zemljišta i radnih parametara, zavise i od konstrukcije radnih delova oruđa.

Rezultati DOE analize pokazali su da je plužno telo imalo značajan uticaj na promenu ukupnog otpora vuče za oba tretmana iako je najveći uticaj ipak imao tretman zemljišta.

Merenje otpora vuče uz georeferenciranje prikupljenih podataka omogućilo je mnogo pouzdanije sagledavanje veze pojedinih pokazatelja fizičkog stanja zemljišta i otpora vuče raonog pluga. Ovim testiranjem utvrđena je snažna interakcija između sabijenosti zemljišta i otpora vuče ( $R^2=0,85$ ) i slabija negativna veza otpora vuče i vlage u zemljištu ( $R^2=-0,45$ ) što se podudara sa rezultatima drugih autora.

Semivariogramskom analizom istražene su prostorne relacije među podacima koji su geografski određeni. Ona je neizostavna u postupku kartiranja određene karakteristike jer se modeli prostorne zavisnosti podataka koriste kod predikcije (kriginga) vrednosti na neuzorkovanim lokacijama na parceli. Takođe, variogramskim modelovanjem se dobija uvid u kvalitet uzorkovanja (merjenja) sa aspekta prostorne predikcije.

Vizualizacija prostornih podataka u vidu tematskih karti dala je bolji prikaz rezultata merjenja u realnom prostoru. Generisane tematske karte otpora vuče, proklizavanja pogonskog točka i fizičkih parametara zemljišta, pokazale su da postoji određeno prestrojavanje vrednosti u odnosu na primenjene tretmane. Najviše su bile orjentisane karte otpora, proklizavanja, sabijenosti i vlažnosti zemljišta, dok karte zapreminske mase i udela pojedinih frakcija u zemljištu nisu bile determinisane prema tretmanima.

Zavisnost otpora vuče raonog pluga od radne brzine kada se brzina varira u eksploatacionim granicama (5-9 km/h) predstavlja linearnu funkciju koji se za različite zemljišne uslove (parcele) pokazala kao kvalitetna aproksimacija izmerenih vrednosti (prosečna objašnjenost modela preko 85%). Dobijeni prosečni porast specifičnog otpora vuče za svaki 1 m/s porasta radne brzine je 4,64 kN/m<sup>2</sup>. Ovaj podatak je veoma važan i sigurno će biti korišćen u budućim istraživanjima kod svođenja otpora na jedinstvenu brzinu u postupku analize podataka.

Ispitivanje spektralnih karakteristika signala otpora vuče potvrdilo je dosadašnje navode autora da se signali otpora vuče dominantno pojavljuju na niskim frekvencijama (do 10 Hz). Takođe, spektralna karakteristika signala viših frekvencija ima značaja sa aspekta odabira odgovarajućeg niskopropusnog filtera kojim se eliminišu komponente koje nisu posledica promene otpora vuče, nego nekih drugih izvora (šuma). Spektralna analiza je pokazala da



preko 100 Hz ne postoje skoro nikakve spektralne komponente, a da preko 20 Hz frekventne komponente nemaju značajan uticaj na ukupan izmereni otpor.

Spektralna analiza signala akcelerometra pokazala se kao kvalitetna dopuna spektralnoj analizi signala otpora vuče za potrebe procene fizičkog stanja zemljšta.



## 10. Literatura

- [1] Abbaspour-Gilandeh Y. 2009. On-the-go soil mechanical strength measurement at different soil depths. *J. Food. Agric. Environ.* 7(3-4):696-699.
- [2] Adamchuk V. I, Christenson P. T, 2005. An integrated system for mapping soil physical properties on-the-go: the mechanical sensing component. *In: Stafford, J.V. (Ed.), Precision Agriculture '05, str. 449–456.*
- [3] Adamchuk V. I, Hummel J. W, Morgan M. T, Upadhyaya S. K. 2004a. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 44, 71–91.
- [4] Adamchuk V. I, Morgan M. T, Sumali H. 2001a. Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go. *T. ASAE* 44(6):1377–1383.
- [5] Adamchuk V. I, Morgan M. T, Sumali H. 2001b. Mapping of spatial and vertical variation of soil mechanical resistance using a linear pressure model. *ASAE Paper No. 011019. ASAE, St. Joseph, MI.F.*
- [6] Adamchuk V. I, Skotnikov A. V, Speichinger J. D, Kocher M. F. 2004b. Development of an instrumented deep-tillage implement for sensing of soil mechanical resistance. *T. ASAE* 47(6):1913–1919.
- [7] Adamchuk V. I, Sudduth K. A, Ingram T. J, Chung S. O. 2006. Comparison of two alternative methods to map soil mechanical resistance on-the-go. *ASABE Paper No. 061057. ASABE, St. Joseph, MI.*
- [8] Agüera J, Carballido J, Gil J, Gliever C. J, Perez-Ruiz M. 2013. Design of a Soil Cutting Resistance Sensor for Application in Site-Specific Tillage. *Sensors*, 13:5945-5957.
- [9] Ahmad D. 1990. An investigation into wetland soil-implement mechanics. PhD thesis, Silsoe College, Cranfield Institute of echnology, Silsoe, Bedford.



- [10] Alihamsyah T, Humphries E. G, Bowers C. G. Jr. 1990. A technique for horizontal measurement of soil mechanical impedance. *T. ASAE* 33(1):73–77.
- [11] Alihamsyah T, Humphries E. G. 1991. On-the-go soil mechanical impedance measurements. *In: Proceedings of the 1991 Symposium: Automated Agriculture for the 21<sup>st</sup> Century, ASAE, Joseph St., MI, str. 300–306.*
- [12] Alimardani R, Fazel Z, Akram A, Mahmoudi A, Varnamkhasti M. G. 2008. Design and development of a three-point hitch dynamometer. *Journal of Agricultural Technology*, 4: 37–52.
- [13] Al-Jalil H. F, Khdair A, Mukahal W. 2001. Design and performance of an adjustable three-point hitch dynamometer. *Soil Till. Res.* 62:153-156.
- [14] Al-Janobi A. A, Al-Suhaibani S. A. 1998. Draft of primary tillage implements in sandy loam soil. *T. ASAE*, 14(4):343-348.
- [15] Al-Suhaibani S. A, Ghaly A. E. 2010. Effect of plowing depth of tillage and forward speed on the performance of a medium size chisel plow operating in a sandy soil. *AJABS*, 5(3):247-255.
- [16] Anderson M. J, Whitcomb P. J. DoE Simplified: Practical Tools for Effective Experimentation. 2nd ed., *Productivity Press, New York, 2007.*
- [17] Andrade P, Rosa U, Upadhyaya S. K, Jenkins B. M, Aguera J, Josiah M. 2001. Soil profile measurements using an instrumented tine. *ASAE Paper No. 011060. ASAE, St. Joseph, MI.*
- [18] Andrade P, Upadhyaya S. K, Jenkins B. M, Plouffe C, Poutre B. 2004. Field evaluation of the improved version of the UC Davis compaction profile sensor (UCD-CPS). *ASAE/CSAE Paper No. 041037. ASAE, St. Joseph, MI.*
- [19] Andrade-Sánchez P, Upadhyaya S. K, Jenkins B. M. 2007. Development, construction, and field evaluation of a soil compaction profile sensor. *T. ASABE* 50 (3):719–725.
- [20] Andrade-Sánchez P, Upadhyaya S. K, Sakai K. 2003. Variability in draft data observed during tillage. *ASAE Paper No. 031121. ASAE, St. Joseph, MI.*
- [21] Arshad M. A, Franzluebbbers A. J, Azooz R. H. 1999. Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada. *Soil Till. Res.*, 53(1):41-47.
- [22] ASAE Standards, 2004. S313.3. Soil Cone Penetrometer. 50th ed., *ASAE, St. Joseph, MI.*





- [23] Askari M, Komarizade M. H, Nikbakht A. M, Nobakht N, Teimourlou R. F. 2011. A novel three-point hitch dynamometer to measure the draft requirement of mounted implements, *Res. Agr. Eng.* 57(4):128–136.
- [24] Bajla J, Bođo T, Hrubý D. 2012. Design of new generation portable penetrometer. *Traktori i pogonske mašine*, 17(1):7-11.
- [25] Baxter S. J, Margareth A. Oliver. 2005. The spatial prediction of soil mineral N and potentially available N using elevation. *Geoderma*, 128: 325–339.
- [26] Bentaher H, Hamza H, Kantchev G, Maalej A, Arnold W. 2008. Three-point hitch-mechanism instrumentation for tillage power optimization. *Biosys. Eng.* 100(2008):24 – 30.
- [27] Bhatti A. U, Mulla D. J, Frazier, B. E. 1991. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. *Remote Sensing of the Environment*, 37:181–191.
- [28] Bishop T. F. A, McBratney A. B. (2001). A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. *Geoderma*, 103:149–160.
- [29] Bogunović I, Kisić I, Aleksandra Jurišić. Soil Compaction under Different Tillage System on Stagnic Luvisols. *Agric. Conspec. Sci.* 79(1):57-63.
- [30] Bölenius E, Rogstrand G, Arvidsson J, Thylén L, Stenberg B. 2006. On-the-go measurements of soil penetration resistance on a Swedish Eutric Cambisol. NJF-Seminar 378. Tillage system for the benefit of agriculture and the environment. *Nordiska jordbruksforskarens förening (NJF), Engelska.*
- [31] Boon N. E, Yahya A, Kheiralla A. F, Wee B. S, Gew S. K. 2005. A tractor-mounted, automated soil penetrometer–shearometer unit for mapping soil mechanical properties. *Biosyst. Eng.* 90(4):381–396.
- [32] Buchter B, Aina P. O, Azari A. S, Nielsen D. R. 1991. Soil spatial variability along transects. *Soil Technol.* 4:297-314.
- [33] Burgess T M, Webster R. 1980b. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II. Block kriging. *Journal of Soil Science*, 31:333–341.
- [34] Burgess T. M, Webster R, McBratney A. B. 1981. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. IV. Sampling strategy. *Journal of Soil Science*, 32: 643–654.
- [35] Burgess T. M, Webster R. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties, 1, the semivariogram and punctual kriging. *J. Soil Sci.* 31:315-331.



- [36] Burgess T. M, Webster R. 1980a. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science*, 31: 315–331.
- [37] Campbell D. J, O’Sullivan M. F. 1991. The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction and tillage. In: *Soil Analysis: Physical Methods*. (Smith K A; Mullins C E, eds). New York: Marcel Dekker Inc.
- [38] Canarache A. 1993. A preliminary model estimating soil specific resistance to ploughing. *Soil and Tillage Research* 27: 355–363.
- [39] Chaskalovic J. 2008. *Finite Elements Methods for Engineering Sciences*, Springer Verlag.
- [40] Christenson P.T, Adamchuk V. I, Kocher M. F. 2004. Instrumented blade for mapping soil mechanical resistance. *ASAE/CSAE Paper No. 041038*. ASABE, St. Joseph, MI.
- [41] Chukwu E, Bowers Jr. C. G. 2005. Instantaneous multiple-depth soil mechanical impedance sensing from a moving vehicle. *T. ASAE* 48(3):885–894.
- [42] Chung S O, Sudduth K A, Hummel J. W. 2003. On-the-go soil strength profile sensor using a load cell array. *ASAE Paper No. 031071*. ASAE, St. Joseph, MI.
- [43] Chung S. O, Sudduth K. A. 2006. Soil failure models for vertically operating and horizontally operating strength sensors. *T. ASABE*, 49(4): 851–863.
- [44] Chung S. O, Sudduth K. A, Hummel J. W. 2006. Design and validation of an on-the-go soil strength profile sensor. *Transactions of ASBE*, 49(1):5-14.
- [45] Chung S. O, Sudduth K. A, Motavalli P. P, Kitchen N. R. 2004a. Relating on-the-go soil strength data to cone index. *ASAE Paper No. MC04205*. ASAE, St. Joseph, MI.
- [46] Chung S. O, Sudduth K. A, Plouffe C, Kitchen N. R. 2004b. Evaluation of an on-the-go soil strength profile sensor using soil bin and field data. *ASAE Paper No. 041039*. ASABE, St. Joseph, MI.
- [47] Chung S. O, Sudduth K. A, Plouffe C, Kitchen N. R. 2008. Soil bin and field tests of an on-the-go soil strength profile sensor. *T. ASABE*, 51(1):5-18.
- [48] Chung S. O, Sudduth K. A, Tan J. 2005. Variability structure of on-the-go soil strength sensor data. *ASAE Paper No. 051039*. ASABE, St. Joseph, MI.
- [49] Chung S. O, Sudduth K. A. 2006. Soil failure models for vertically operating and horizontally operating strength sensors. *T. ASABE* 49(4):851–863.



- [50] Clark R. L. 1999. Soil strength variability within fields. In: Precision Agriculture '99: Papers Presented at the 2nd European Conference on Precision Agriculture, *edited by J. V. Stafford (Sheffield Academic Press, Sheffield, UK), str. 201–210.*
- [51] Cochrane, W. W. 1993. *The development of American agriculture. A historical analysis.* Minneapolis MN, USA: University of Minnesota Press.
- [52] Cressie, N. A. C. (1993). *Statistics for spatial data.* New York: Wiley.
- [53] Dawidovski J. B, Worona M, Hencel, A. 1988. The determination of plough draught from soil penetration resistance. In: *Proceedings of the 11th International Soil and Tillage Research Organization Conference: Tillage and Crop Production* (Edinburgh, Scotland), str: 457–462.
- [54] Desbiolles J. M. A, Godwin R. J, Kilgour J, Blackmore B. S. 1999. Prediction of tillage implement draught using cone penetrometer data. *J. Agr. Eng. Res.* 73:65–76.
- [55] D'Haene K, Vermang J, Cornelis M. W, Leroy B. L. M, Schiettecatte W, De Neve S, Gabriels D, Hofman G. 2008. Reduced tillage effects on physical properties of silt loam soils growing root crops. *Soil Till. Res.* 99(2008):279-290.
- [56] Dobermann A, Ping J. L. 2004. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. *Agronomy Journal*, 96:285–297.
- [57] Domsch H, Ehlert D. Giebel A. Witzke K. Boess J. 2006. Evaluation of the soil penetration resistance along a transect to determine the loosening depth. *Precision Agric.* 7:309–326.
- [58] Ehlert D, Voelker U, Martinov M, Konstantinović M. 2004. Precizna poljoprivredna proizvodnja. Klatno za merenje prinosa biljne mase. *Cotemp. Agric. Eng.* 30(1-2): 9-20.
- [59] Farrell D. A, Greacen E. L. 1965. Resistance to penetration on fine probes in compressible soil. In: *Division of Soils. CSIRO, Adelaide, Australia.*
- [60] Filipović D, Husnjak S, Košutić, S., Gospodarić Z. 2006. Effects of tillage systems on compaction and crop yield of Albic Luvisol in Croatia. *J. Terramech.* 43:177–189.
- [61] Fisher R. A. 1925. *Statistical methods for research workers.* Edinburgh: Oliver and Boyd.
- [62] Fisher R. A. The Design of Experiments[1935], 9th ed., Macmillan, London, 1971.
- [63] Fordham S. J. 1985. *Soils of Crowmarsh Battle Farms.* Vol. private, Soil Survey of England and Wales.
- [64] Formato A, Faugno S, Paolillo G. 2005. Numerical simulation of soil-plough mouldboard interaction. *Biosyst. Eng.* 92(3):309–316.



- [65] Fountas S, Paraforos D, Cavalaris C, Karamoutis C, Gemtos T. A, Abu-Khalaf N, Tagarakis A. 2013. A five-point penetrometer with GPS for measuring soil compaction variability. *Comput. Electron. Agr.* 96(2013):109–116.
- [66] Garciano L. O, Upadhyaya S. K, Jones R. A, Jersey S. R. 2005. Determination of the soil failure zone around a cone penetrometer. *ASAE Paper No. 051158. ASAE, St. Joseph, MI.*
- [67] Gaskin G. C, Miller J. D. 1996. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique. *J. Agric. Eng. Res.* 63, 153–160.
- [68] Gaston L. A, Locke M. A, Zablutowicz R. M, Reddy K. N. 2001. Spatial variability of soil properties and weed populations in the Mississippi delta. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (65):449–459.
- [69] Gaultney L. D. 1989. Prescription farming based on soil property sensors. *ASAE Paper No. 89-1036. ASAE, St. Joseph, MI.*
- [70] Ge Y, Thomasson J. A, Morgan C L, Searcy S. W. 2007. VNIR diffuse reflectance spectroscopy for agricultural soil property determination based on regression-kriging. *Transactions of the ASABE*, 50:1081–1092.
- [71] Gee Clough D, McAllister M, Pearson G, Evernden D. W. 1977. The empirical prediction of tractor-implement field performance. *J. Terramechanics*, 15:81–94.
- [72] Gill W. R, Reaves C, Bailey A. , 1978. Effect of geometric parameters on disk forces. *American Society of Agricultural Engineers, Paper 78-1535, ASAE, St. Joseph, MI, USA.*
- [73] Gill W. R, Reaves C, Bailey AC. 1979. The influence of velocity and disk angle on the kinematic parameter k of disks. *American Society of Agricultural Engineers, Paper No. 79-1522, ASAE, St. Joseph, MI, USA.*
- [74] Gill W. R, Reaves C, Bailey AC. 1981. Harrow disk curvature – influence on soil penetration. *American Society of Agricultural Engineers, Paper No. 81-1532, ASAE, St. Joseph, MI, USA.*
- [75] Gill W. R, Vanden Berg G. E. 1968. Soil dynamics in tillage and traction. *Agriculture Handbook No. 316, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, Washington, DC.*
- [76] Ginski J, Lipiec J. Soil physical conditions and plant roots. *Boca Raton, FL: CRC Press; 1990.*
- [77] Girma G. 1992. Dynamic effect of speed, depth and soil strength upon forces on plough components. *J. agric. Engng. Res.* 51: 47-66.



- [78] Glancey J. L, Upadhyaya S. K, Chancellor W. J, Rumsey, J. W. 1989. An instrumented chisel for the study of soil-tillage dynamics. *Soil Till. Res.* 14:1–24.
- [79] Godwin R. J, Miller P. C. H. 2003. A review of the technologies for mapping within-field variability. *Biosystems Engineering*, 84:393–340.
- [80] Godwin R. J, O’Dogherty M. J, Saunders C, Balafoutis A. T. 2007. A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed. *Biosys. eng.* 97:117–129.
- [81] Godwin R. J, O’Dogherty M. J. 2007. Integrated soil tillage force prediction models. *J. Terramechanics*, 44 (2007):3–14.
- [82] Godwin R. J, Seig D. A, Allott M. 1987. The development and evaluation of a force prediction model for agricultural discs. *Soil Use Manage*, 3(3):106–14.
- [83] Godwin R. J, Spoor G, Soomro M. S. 1984. The effect of tine arrangement on soil forces and disturbance. *J. Agric. Engng. Res.* 30:47–56.
- [84] Godwin R. J, Spoor G. 1977. Soil failure with narrow tines. *J. Agric. Eng. Res.* 22(3):213–228.
- [85] Goovaerts P, Kerry R. 2010. Using Ancillary Data to Improve Prediction of Soil and Crop Attributes in Precision Agriculture, In: *Geostatistical Applications for precision agriculture*, str:167-169.
- [86] Goovaerts P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. New York: Oxford University Press.
- [87] Goovaerts P. 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89:1–45.
- [88] Goovaerts P. 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228:113–129.
- [89] Goryachkin V. P. 1968. Collected works: Vol 1. (Ed. Luchinskii, N.D.) Moskova. (Israeli Programme for Scientific Translations). *US Department of Agriculture and National Science Foundation, Washington, DC, USA*.
- [90] Grisso R. D, Yasin M, Kocher M. F. 1994. Tillage Implement Forces Operating in Silty Clay Loam. ASAE paper br.94-1532, St.Joseph, Mich., USA.
- [91] Gyachev L. V. 1985. Theory of surfaces of plow bottoms. *Amerind Pub. Co. Pvt. Ltd., New York*.
- [92] Hadžić V, Belić M, Nešić Ljiljana. 2004. Praktikum iz pedologije. Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, Departman za ratarstvo i povrtarstvo, 79.



- [93] Hall H. E, Raper R. L. 2005. Development and conceptual evaluation of an on-the-go soil strength measurement system. *T. ASAE* 48(2):469–477.
- [94] Hanquet B, Sirjacobs D, Destain M. F. 2004. Analysis of Soil Variability measured with a Soil Strength Sensor. *Precis. Agric.* 5, 227–246.
- [95] Hanquet H, Sirjacobs D, Destain M. F, Frnkinet M, Verbrugge J. C. 2004. Analysis of soil variability measured with a soil strength sensor. *Precis. Agric.* 5(3):227–246.
- [96] Harrigan T. M, Rotz C. A. 1995. Draft relationships for tillage and seeding equipment. *Applied Engineering in Agriculture*, 11(6):773-783.
- [97] Hayhoe H. N, Lapen D. R, McLaughlin N. B. 2002. Measurements of Mouldboard Plow Draft: I.Spectrum Analysis and Filtering. *Precis. Agric.* 3:225–236.
- [98] Heming S. 1997. *Soil survey and soil data base of part of Westridge Farm and Mapletons Farm for Yattendon Estates*. Winchester, UK: Soil Services Limited (private report).
- [99] Hemmat A, Adamchuk V. I, Jasa P. 2008. Use of an instrumented disc coulter for mapping soil mechanical resistance. *Soil Till. Res.* 98 (2):150–163.
- [100] Hemmat A. R. Binandeh J. Ghaisari A. Khorsandi. 2013. Development and field testing of an integrated sensor for on-the-go measurement of soil mechanical resistance. *Sensor Actuator*, 198:(2013)61–68.
- [101] Hettiaratchi D. R. P, Alam M. M. 1998. Calculation, validation and simulation of soil reactions on concave agricultural discs. *J. Agric. Engng. Res.* 68:63–75.
- [102] Hettiaratchi D. R. P, Reece A. R. 1974. The calculation of passive soil resistance. *Geotechnique*, 24(3): 289–310.
- [103] Hettiaratchi D. R. P, Reece AR. 1967. Symmetrical three-dimensional soil failure. *J. Terramech* 4(3):45–67.
- [104] Hettiaratchi D. R. P, Witney B. D, Reece A. R. 1966. The calculation of passive pressure in two-dimensional soil failure. *J. Agric. Eng. Res.* 11(2):89–107.
- [105] Hettiaratchi DRP. 1969. The calculation of passive earth pressure. PhD thesis, University of Newcastle-upon-Tyne.
- [106] Hohn M. E. 1988. *Geostatistics and Petroleum Geology*. Van Nostrand Reinhold, str: 400, New York.
- [107] Hu G. C. Y. 1965. Bearing capacity of foundations with overburden shear. *Sols Soils* 13: 11-18.



- [108] Isaaks E, Srivastava R. 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press Inc., str: 580, New York.
- [109] ISO 376 Calibration Standard
- [110] ISO 7256/1.
- [111] Jabro J. D, Sainju M, Stevens B, Lenssen W, Evans G. 2008. Long-term tillage frequency effects on dryland soil physical and hydraulic properties. In International Soil Conservation Organization Conference Proceedings, *Inter. Soil Conserv.Org. Conf. Proc. may 15-23, 2008, Budapest, Hungary. pp 1-4.*
- [112] JDPZ 1997. Metode istraživanja i određivanja fizičkih svojstava zemljišta, Komisija za fiziku zemljišta, Novi Sad, 70.
- [113] Journel A. G, Huijbregts C. J. 1978. Mining geostatistics. *Academic Press. New York.*
- [114] Kazuhiko O. 2008. Application of GIS for investigating soil compaction. *Járművek és Mobilgépek, 1(2008):26-34.*
- [115] Kepner R. A, Bainer R, Barger E. L. 1982. Principles of Farm Machinery, 3rd Edn. AVI Publishing Co., Inc.
- [116] Kepner R. A, Bainer R. and Barger E. L. 1978. Principles of Farm Machinery. AVI Publication Company.
- [117] Kerry R, Margareth Oliver, Frogbrook Z. L. 2010. Sampling in Precision agriculture. In. *Geostatistical Applications in Precision Agriculture, str. 295.*
- [118] Kerry R. 2004. *Determining the effect of parent material and topography on the spatial structure of variation in soil properties for precision agriculture.* Unpublished PhD. Thesis, University of Reading, Reading, England.
- [119] Khalilian A, Han Y. J, Dodd R. B, Sullivan M. J, Gorucu S, Keskin M. 2002. A control system for variable depth tillage. *ASAE Paper No. 021209. ASAE, St. Joseph, MI.*
- [120] Kheiralla A. F, Yahya A, Zohadie M, Ishak W. 2003. Design and development of a three-point auto hitch dynamometer for an agricultural tractor. *AJSTD, 20( 3-4):271-288.*
- [121] Kirk R. E. Experimental design: Procedures for the behavioral sciences, Brooks/Cole, Belmont, California, 1968.
- [122] Kolmogorov A. N. 1941. The local structure of turbulence in an incompressible fluid at very large Reynolds numbers. *Doklady Akademii Nauk SSSR, 30, 301–305.*
- [123] Kostić M, Malinović N, Meši M, Belić M. 2012. Primena gps i gis tehnologije u postupku merenja mehaničkog otpora zemljišta. *Cotemporary agricultural engineering, 38(3):219-229.*



- [124] Kostritsyn A. K. 1956. Cutting of a cohesive soil mechanism with knives and cones. *Translation 58, NIAE, Silsoe, Bedford.*
- [125] Kozar B, Lawrence R, Long D. S. 2002. Soil phosphorus and potassium mapping using a spatial correlation model incorporating terrain slope gradient. *Precision Agriculture, 3:407–417.*
- [126] Krastin E. N. 1973. The use of methods of theory of dimensional analysis for the evaluation of the draft characteristics of the plow during operations in different conditions. *Trans. No. 333, National Tillage Laboratory, Auburn, AL, USA.*
- [127] Kravchenko A. N, Robertson G. P. 2007. Can Topographical and yield data substantially improve total soil carbon mapping by regression kriging. *Agronomy Journal, 99:12–17.*
- [128] Krige D. G. 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemistry, Metallurgical and Mining Society of South Africa, 52, 119–139.*
- [129] Kuczewski J. 1981. Soil parameters for predicting the draught of model plough bodies. *J. Agric. Engng. Res. 26: 193–201.*
- [130] Lapen D. R, Hayhoe H. N, Topp G. C, McLaughlin N. B, Gregorich E. G, Curnoe W. E. 2002. Measurement of mouldboard draft. II. Draft-soil-crop and yield-draft associations. *Precis. Agric. 3:237–257.*
- [131] Lapen D. R, Topp G. C, Gregorich E. G, Hayhoe, H. N, Curnoe W. E. 2001b. Divisive fieldscale associations between corn yields, management, and soil information. *Soil and Tillage Research 58:193–206.*
- [132] Lapen D. R, Topp G. C, Hayhoe H. N, Gregorich E. G, Curnoe W. E. 2001a. Stochastic simulation of soil strength/compaction and assessment of corn yield risk using threshold probability patterns. *Geoderma 104:325–343.*
- [133] Larsen L. W, Lovely W. G, Bockup C. W. 1968. Predicting draught forces using model mouldboard ploughs in agricultural soils. *T. ASAE, 11:665–668.*
- [134] Lazic Z. R. *Design of Experiments in Chemical Engineering*, Wiley VCH, Weinheim, 2004.
- [135] Lesch S. M, Corwin D. L. 2008. Prediction of spatial soil property information from ancillary sensor data using ordinary linear regression: model derivations, residual assumptions and model validation tests. *Geoderma, 148:130–140.*
- [136] Linsley C. M, Bauer F. C. 1929. Illinois agriculture experiment station. *Circular 346.*





- [137] Logsdon S. D, Kaspar T. C, Cambardella, C. A. 1999. Depthincremental soil properties under no-till or chisel management. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 63(1): 197-200.
- [138] Luellan W. R. 1985. Fine-tuned fertility. Tomorrow's technology here today. *Crops and Soils Magazine*, 38: 18–22.
- [139] Macmillan R. H. 2002. The Mechanic of Tractor and Tillage Implement Performance. Theory and worked examples. University of Melbourne. Printed from: <http://www.eprints.unimelb.edu.au>.
- [140] Malinović N, Kostić M, Meši M. 2013. Razvoj, proizvodnja i preliminarna testiranja uređaja za merenje otpora obrade zemljišta. *The sixth scientific-technical meeting "InterRegioSci 2013", Book of abstracts*.
- [141] Malinović N, Kostić M, Meši M. 2014. Razvoj i primena mernog sistema za utvrđivanje otpora zemljišta po principima precizne poljoprivrede. *The seventh scientific-technical meeting "InterRegioSci 2014", Book of abstracts*.
- [142] Manor G, Clark R. L. 2001. Development of an instrumented subsoiler to map soil hard-pans and real-time control of subsoiler depth. *ASAE Paper No. 011022. ASAE, St. Joseph, MI*.
- [143] Margareth A Oliver. 2010. An Overview of Geostatistics and Precision Agriculture. In: *Geostatistical Applications for precision agriculture*, str:1-32.
- [144] Margareth A. Oliver, Carroll Z. L. 2004. *Description of spatial variation in soil to optimize cereal management*. Project Report No. 330. HGCA, London.
- [145] Margareth A. Oliver, Loveland P. J, Frogbrook Z. L, Webste R, McGrath S. P. 2002. *Statistical and geostatistical analysis of the national soil inventory of England and Wales* (MAFF project SPO124, available on CD ROM from National Soil Resources Institute, Cranfield University, UK).
- [146] Margareth A. Oliver, Webster R, Slocum K. 2000. Filtering SPOT imagery by kriging analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 735–752.
- [147] Marković D, Veljić M, Mitrović Z. 1995. Energetska analiza tehničkih sistema u obradi zemljišta. *Cotemp. agric. eng.* 21(3):121-128.
- [148] Martinov M, Marković D, Đević M, Tešić M. 1998. Ispitivanje poljoprivrednih mašina i traktora, standardi. *Cotemp. agric. eng.* 24(4):111-125.
- [149] Matheron G. 1963. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58:1246–1266.
- [150] Matheron G. 1965. *Les variables régionalisées et leur estimation, une application de la théorie de fonctions aléatoires aux sciences de la nature*. Paris: Masson et Cie.



- [151] Matheron, G. 1963. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58, 1246–1266.
- [152] McBratney A. B, Webster R. 1981. Spatial dependence and classification of soil along a transect in northeast Scotland. *Geoderma*, 26:63-82.
- [153] McCreeny W. F, Nichols M. L. 1959. The geometry of disks and soil relationships. *Agric. Engng.* 37(12):808–12. 820.
- [154] McCreeny W. F. 1959. Effect of design factors on soil reactions. *American Society of Agricultural Engineers, Paper No. 59-622, ASAE, St. Joseph, MI, USA.*
- [155] McKenzie N. J, Grundy M. J, Webster R, Ringrose-Voase A. J. 2008. Guidelines for surveying soil and land resources (2nd ed.). *Collingwood, Australia: CSIRO Publishing.*
- [156] McKyes E. 1985. Soil cutting and tillage. *Amsterdam: Elsevier.*
- [157] McKyes E. 1985. Soil Cutting and Tillage. *Developments in Agricultural Engineering.* Elsevier Science Publishers, B.V.,Amsterdam.
- [158] Mercer W. B, Hall A. D. 1911. The experimental error of field trials. *Journal of Agricultural Science*, 4:107–132.
- [159] Meyerhof G. C. 1951. The ultimate bearing capacity of foundations. *Geotechnique* 2(4):310–32.
- [160] Meyerhof G. G. 1961. The ultimate bearing capacity of wedge-shaped foundations. In: *Proceedings of the fifth international conference on soil mechanics and foundation engineering, vol. II, Division 3B, DUNOD, Paris.*
- [161] Michalowski R. L. 2005. Coefficient of earth pressure at rest. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 131(11):1429–1433.
- [162] Miesch A. T. 1975. Variograms and variance components in geochemistry and ore evaluation. *Geological Society of America Memoir*, 142: 333–340.
- [163] Miller M. P, Singer M. J, Nielsen D. R. 1988. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. *Soil Science Society of America Journal*, 52: 1133–1141.
- [164] Montgomery D. C, Runger G. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 5th ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 2011.
- [165] Morrison J. E Jr, Bartek L. A. 1987. Design and field evaluation of a hand-pushed digital soil penetrometer with two cone materials. *T. ASAE* 30(3):646–651.
- [166] Mouazen A. M, Anthonis J, Roman H, 2005a. An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction. Part 4. Improvement of compaction maps by using a proportional integrative derivative depth controller. *Biosyst. Eng.* 90(4):409–418.



- [167] Mouazen A. M, Roman H. 2006. Development of on-line measurement system of bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture. *Soil Till. Res.* 86:218–229.
- [168] Mouazen A. M, Dumount K, Maertens K, Ramon H. 2003a. Two-dimensional prediction of spatial variation in topsoil compaction of a sandy loam field-based on measured horizontal force of compaction sensor, cutting depth and moisture content. *Soil Till. Res.* 74:91–102.
- [169] Mouazen A. M, Maleki M. R, De Baerdemaeker J, Ramon H. 2007. On-line measurement of some selected soil properties using a VIS–NIR sensor. *Soil Till. Res.*, 93:13–27.
- [170] Mouazen A. M, Roman H, De Baerdemaeker J. 2003b. Modelling compaction from on-line measurement of soil properties and sensor draught. *Precis. Agric.* 4:203–212.
- [171] Mulla D. J, Hammond M. W. 1988. Mapping soil test results from large irrigation circles. In J. S. Jacobsen (Ed.), *Proceedings of the 39th Annual Far West Regional Fertilizer Conference* (pp. 169–171). Pasco, WA: Agricultural Experimental Station Technical Paper No. 8597.
- [172] Mulla D. J, Hammond M. W. 1988. Mapping soil test results from large irrigation circles. In J. S. Jacobsen (Ed.), *Proceedings of the 39th Annual Far West Regional Fertilizer Conference* (pp. 169–171). Pasco, WA: Agricultural Experimental Station Technical Paper No. 8597.
- [173] Mulla D. J. 1989. Using geostatistics to manage spatial variability in soil fertility. In C. M. Renard, R. J. Van den Beldt, & J. F. Parr (Eds.), *Soil, crop and water management in the Sudano-Sahelian zone* (pp. 241–254). Pantcheru, India: ICRISAT.
- [174] Mulla D. J. 1993. Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield. In P. C. Robert, W. E. Larson and R. H. Rust (Eds.), *Proceedings of Site Specific Crop Management: A Workshop on Research and Development Issues* (pp. 15–26). Madison, WI: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America.
- [175] Mulla, D. J. (1991). Using geostatistics and GIS to manage spatial patterns in soil fertility. In G. Kranzler (Ed.), *Proceedings of symposium on automated agriculture for the 21st century* (pp. 336–345). St Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers.



- [176] Mzuku M, Khosla R, Reich R, Inman D, Smith F, MacDonald L. 2005. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (69):1572-1579.
- [177] Naderi-Boldaji M, Alimardani R, Hemmat A, Sharifi A, Keyhani A, Dolatsha N, Keller T. 2012. Improvement and field testing of a combined horizontal penetrometer for on-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance. *Soil Till. Res.* 123(2012)1-10.
- [178] Naderi-Boldaji M, Sharifi A, Jamshidi B, Younesi-Alamouti M, Minaee S. 2011. A dielectric-based combined horizontal sensor for on-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance. *Sensor. Actuator.* 171(2011):131-137.
- [179] Naderloo L, Alimadani R, Akram A, Javadikia P, Khanghah H. Z. 2009. Tillage depth and forward speed effects on draft of three primary tillage implements in clay loam soil. *J. Food Agric. Environ.* 7: 382-385.
- [180] National Research Council, 1997. Precision Agriculture in the 21st Century. Washington, D.C.: National Academy Press.
- [181] National Research Council. (1997). *Precision agriculture in the 21st century.* Washington DC, USA: National Academy Press.
- [182] Nielsen D. R, Tillotson P. M, Vieira S. R. 1983. Analyzing field-measured soil-water properties. *Agric. Water Manage.* 6:93-109.
- [183] Neményi M, Mesterházi P. A, Miles G. 2006. An application of tillage force mapping as a cropping management tool. *Biosyst. Eng.* 94(3):351-357.
- [184] Neményi M, Mesterházi P. Á, Milics G. 2006. An Application of Tillage Force Mapping as a Cropping Management Tool. *Biosys. Eng.*, 94(3):351-357.
- [185] Nielsen D. R, Mohammad H. A. 1989. Statistical opportunities for analyzing spatial and temporal heterogeneity of field soils. *Plant and Soil*, 115:285-296.
- [186] O'Callaghan J. R, Farrelly K. M. 1964. Cleavage of soil by tined implements. *J. Agric. Engng. Res.* 9(3):259-70.
- [187] O'Callaghan J. R, McCoy J. G. 1965. The handling of soil by mouldboard ploughs. *J. Agr. Eng. Res.* 10:23-25.
- [188] O'Callaghan J. R, McCullen P. J. 1965. Cleavage of soil by inclined and wedge-shaped tines. *J. Agric. Engng. Res.* 10(3):248-54.
- [189] O'Dogherty M. J, Godwin R. J, Hann M. J, Al-Ghazal A. A. 1996. A geometrical analysis of inclined and tilted spherical plough discs. *J. Agric. Engng. Res.* 63:205-17.



- [190] O'Dogherty M. J, Godwin R. J. 2003. Unpublished work. National Soil Resources Institute, Engineering Group, Cranfield University at Silsoe.
- [191] Onwualu A.P, Watts K.C. 1998. Draught and vertical forces obtained from dynamic soil cutting by plane tillage tools. *Soil Till. Res.* 48(4):239-253.
- [192] Oskoui K. E, Rackham D. H, Witney B. D. 1982. The determination of plough draught—Part II: The measurement and prediction of plough draught for two mouldboard shapes in three soil series. *J. Terramechanics* 19: 153–164.
- [193] Oskoui K. E, Rackham D. H, Witney B. D. 1982. The determination of plough draught: part 2, the measurement and prediction of plough draught for two mouldboard shapes in three soil series. *J. Terramechanics*, 19, 153–154.
- [194] Oskoui K. E, Witney B. D. 1982. The determination of plough draught, part 1: prediction from soil and meteorological data with cone index as the soil strength parameter. *J. Terramechanics*, 19, 97–106.
- [195] Osman M. S. 1964. The mechanics of soil cutting blades. *J. Agric.Eng. Res.* 9(4): 313-328.
- [196] Owen G. T, McRae K. B, McRae S. M, Misener G. C. 1990. Spectral analysis of subsoiling forces with a rigid tillage tool. *Can. Agric. Eng.* 32:57–62.
- [197] Owen G. T. 1988. Soil disturbance associated with deep subsoiling in compacted soils. *Can. Agric. Eng.* 30:33–37.
- [198] Owende P. M. O, Ward S. M. 1999. Reaction forces of lightweight mouldboard ploughs at slow speeds of tillage in Nitosol, Vertisol and Ferralsol soils under two moisture conditions. *Soil & Tillage Research*, 49: 313-323.
- [199] Palmer A. L. 1992. Development of a three-point linkage dynamometer for tillage research. *J. Agr. Eng. Res.* 52:157-167.
- [200] Paltineanu I. C, Starr J. L. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61(5):1576–1585.
- [201] Papathanassiou I, Kavalariis Ch, Karamoutis Ch, Gemtos T. A. 2002. Design, Construction and Testing of an Instrumented Tractor to Measure Forces on Agricultural Implements and Energy Consumption During Field Work. *1st HAICTA conference, Athens, Greece, 6-7 June 2002, str. 144-153.*
- [202] Papritz A. 2008. Standardized vs. customary ordinary cokriging: some comments on the article“*The geostatistical analysis of experiments at the landscape-scale*” by T. F. A. Bishop and R. M. Lark. *Geoderma*, 146:391–396.



- [203] Payne P. C. J, Tanner D. W. 1959. The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements. *J. Agric. Eng. Res.*, 4: 312-325.
- [204] Payne P. C. J. 1956. The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements. *J. Agric. Engng. Res.* 1(1):23–50.
- [205] Perfect E, McLaughlin N. B, Kay B. D. 1997. Energy requirements for conventional tillage following different crop rotations. *T. ASAE*, 40, 45–49.
- [206] Pijuan J, Berga J, Comellas M, Potau X, Roca J. 2012. A three-point hitch dynamometer for load measurements between tillage implements and agricultural tractors during operation. *Cigr-AgEng, July 8-12, 2012. Valencia, Spain.*
- [207] Pitla S. K, Wells L. G. 2006. Development of an electro-mechanical system to identify & map adverse soil compaction using GIS&GPS. *ASABE Paper No. 061056. ASABE, St. Joseph, MI.*
- [208] Plasse R. G, Raghaven S. V, McKyes E. 1985. Simulation of narrow blade performance in different soils. *Trans. ASAE* 28(4):1007-1012.
- [209] Qiong G; Pitt R E; Ruina A (1986). A model to predict soil forces on the plough mouldboard. *J. Agr. Eng. Res.* 35:141–155.
- [210] Rahimi-Ajdadi F, Abbaspour-Gilandeh Y. 2011. Artificial Neural Network and stepwise multiple range regression methods for prediction of tractor fuel consumption. *Measurement*, 44(2011):2104–2111.
- [211] Raper R. L, Hall H. E. 2003. Soil strength measurement for site-specific agriculture. *U.S. Patent No. 6647799.*
- [212] Raper R. L, Schwab E. B, Dabney S. M. 2005. Measurement and variation of site-specific hardpans for silty upland soils in the Southeastern United States. *Soil Till. Res.* 84:7–17.
- [213] Raper R. L, Washington B. H, Jarrell J. D. 1999. A tractor-mounted multiple-probe soil cone penetrometer. *Appl. Eng. Agric.* 15(4):287-290.
- [214] Reaves C. A, Schafer R. L. 1975. Force versus width of cut for moldboard bottoms. *Transactions of the ASAE*, 852-859.
- [215] Robert P. C. 1999. Precision agriculture: Research needs and status in the USA. In J. V. Stafford (Ed.), *Precision Agriculture '99* (pp. 19–33). Sheffield, UK: Sheffield Academic Press.



- [216] Rockström J, Barron J, Brouwer J, Galle S, de Rouw A. 1999. On-farm spatial and temporal variability of soil and water in pearl millet cultivation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (63):1308–1319.
- [217] Rohani B, Baladi G. Y. 1981. Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil. In: *Proceedings of the International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, vol. 3, Calgary, Alberta, Canada, pp. 959–990.*
- [218] Sahu R K, Raheman H. 2006. Draught Prediction of Agricultural Implements using Reference Tillage Tools in Sandy Clay Loam Soil. *Biosys. Eng.* 94(2):275–284.
- [219] Saunders C, Godwin R. J, O'Dogherty M. J. 2000. Prediction of soil forces acting on mouldboard ploughs. *Fourth International Conference on Soil Dynamics, Adelaide, Australia.*
- [220] Saunders C. 2002. Optimising the performance of shallow, highspeed mouldboard ploughs. *Unpublished PhD Thesis, Cranfield University, Silsoe, UK.*
- [221] Savin L, Nikolić R, Simikić M, Furman T, Tomić M, Gligorić Radojka, Jarak Mirjana, Đurić Simonida, Sekulić P, Vasin J. 2008. Istraživanje uticaja sabijenosti zemljišta na prinos suncokreta i promene u zemljištu na uvratinama i unutrašnjem delu parcele. *Savremena poljoprivredna tehnika*, 34(1-2): 87-96.
- [222] Savin L, Nikolić R, Simikić M, Furman T, Tomić M, Gligorić Radojka, Jarak Mirjana, Đurić Simonida, Sekulić P, Vasin J. 2009a. Uticaj sabijenosti zemljišta na promene u zemljištu i prinos suncokreta. *Savremena poljoprivredna tehnika*, 35(1-2): 26-32.
- [223] Savin L, Nikolić R, Simikić M, Furman T, Tomić M, Gligorić Radojka, Jarak Mirjana, Đurić Simonida, Sekulić P, Vasin J. 2009b. Uticaj agrotehničkih mera na otpor konusa. *Traktori i pogonske mašine*, 34(1-2): 87-96.
- [224] Savin L, Simikic M, Tomić M, Gligorić Radojka, Simonida Đurić, Ponjičan O, Vasin J. 2011. Uticaj agrotehničkih mera u proizvodnji soje na otpor prodiranja konusa u zemljište. *Savremena poljoprivredna tehnika*, 37(1):1-10.
- [225] Savin L, Simikić M, Furman T, Tomić M, Gligorić Radojka, Jarak Mirjana, Đurić Simonida, Sekulić P, Vasin J. 2010. *Uticaj agrotehničkih mera na zapreminsku masu zemljišta*, 36(1):1-9.
- [226] Schafer R. L, Young S. C, Hendrick J. G, Johnson C. E. 1984. Control concepts for tillage systems. *Soil & Tillage Research*, 4: 313–320.



- [227] Schlegel J. E, Morlin R. W. 1969. Optimum travel speed for maximum ploughing acreage. *Transactions of ASAE*, 690-694.
- [228] Scholtz D. C. 1966. A three-point linkage dynamometer for restrained linkages. *J. Agr. Eng. Res.* 11:33–37.
- [229] Schreiber M, Kutzbah H. D. 2008. Influence of soil and tire parameters on traction. *Research in Agricultural Engineering*, 54:43-49.
- [230] Schueller J. K. 1997. Technology for precision agriculture. In J. V. Stafford (Ed.), *Precision Agriculture '97* (pp. 19–33). Oxford, UK: BIOS Scientific Publishers.
- [231] Schuring D. J, Emori R. I. 1964. Soil deforming processes and dimensional analysis. *SAE Paper No. 897C. New York, N.Y.: SAE.*
- [232] Seig D. A. 1982. An investigation into the forces acting on the plough share point. *MSc Thesis, National College of Agricultural Engineering, Cranfield Institute of Technology, Bedford, UK.*
- [233] Serrano J. M, Peça J. O. 2008. The forward speed effect on draught force required to pull trailed disc harrows. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 6(2):182-188.
- [234] Sharifi A, Godwin R. J, O'Dogherty M. J, Dresser M. L. 2007. Evaluating the performance of a soil compaction sensor. *Soil Use Manage.* 23:171–177.
- [235] Sharifi A, Mohsenimanesh A. 2011. Soil mechanical resistance measurement by a unique multi-cone tips horizontal sensor. *Int. Agrophys.* 26(61-64).
- [236] Shöne W, Möller R. 1962. The design of mouldboards with particular reference to high-speed ploughing. *Grundlagen der Landtechnik*, 15, 15-27 (NIAE Translation 146).
- [237] Shöne W. H. 1966. Characterization of tillage-tools. *Journal of Agricultural Rationalization Through Land Improvement*, 1:31-48.
- [238] Siefken R. J, Adamchuk V. I, Eisenhauer D. E, Bashford L. L. 2005. Mapping soil mechanical resistance with a multiple blade system. *Appl. Eng. Agric.* 21(1):15–23.
- [239] Simikić M, Dedović N, Savin L, Tomić M, Silleli H. H, Ponjičan O. 2012. Influence of eccentric drawbar force on power delivery efficiency of a wheeled tractors. *Turkish journal of Agriculture and Forestry*, 36 (4):486-500.
- [240] Simikić M, Savin L, Nikolić R, Tomić M, Furman T. 2010. Uticaj ekscentrične vuče na vučne karakteristike traktora točkaša. *Contemp. Agric. Eng.* 36(1):10-20.
- [241] Singh N, Singh G, Salokhe V. M. 1991. Cyclic variation in moldboard plow draft and its effect on implement control systems. *Soil & Tillage Research*, 21: 273-286.





- [242] Sirjacobs D, Hanquet H, Lebeau F, Destain M. F. 2002. On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture. *Soil Till. Res.* 64:231–242.
- [243] Smith B. E, Schafer R. L, Johnson C. E. 1994. Using coulter to quantify the soil physical condition. *ASAE Paper No. 941040*. ASAE, St. Joseph, MI.
- [244] Smith D. L. O, Godwin R. J, Spoor G. 1989. Modelling soil disturbance due to tillage and traffic. In: Larson, W.E., Blake, G.R., Allmaras, R.R., Voorhees, W.B., Gupta, S.C. (Eds.), *Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, str.121–136.
- [245] Spoor G, Godwin R. J. 1978. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *J. Agric. Eng. Res.* 23(3):243–258.
- [246] Spoor G, Fry R. K. 1983. Soil disturbance generated by deep-working low rake angle narrow tines. *J. Agric. Eng. Res.*28:217–234.
- [247] Stafford J. V, Hendrick J. G. 1988. Dynamic sensing of soil pans. T. ASAE, 31(1):9–13.
- [248] Stafford J. V. 1981. An application of critical state soil mechanics: the performance of rigid tine. *J. Agric. Eng. Res.* 26 (5):387–401.
- [249] Sümer S. K, Sabanaci A. 2005. Effects of Different Tire Configurations on Tractor Performance. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 29:461-468.
- [250] Summers J. D, Khalilian A, Batchelder D. G. 1986. Draft relationships for primary tillage in oklahoma soils. *Transactions of the ASAE*, 29(1): 37-39.
- [251] Tarr A. B, Moore K. J, Burras C. L, Bullock D. G, Dixon P. M. 2005. Improving map accuracy of soil variables using soil electrical conductivity as a covariate. *Precision Agriculture*,6:255–270.
- [252] Tebrügge F, Düring R. A. 1999. Reducing tillage intensity—a review of results from a long-term study in Germany. *Soil Till. Res.* 53, 15–28.
- [253] Tekeste M. Z, Raper R. L, Tollner E. W, Seymour L, 2006. Optimal spatial sampling schemes for mapping soil strength on a Southeastern US soils. *ASABE Paper No. 061149*. ASABE, St. Joseph, MI.
- [254] Tekeste M. Z, Raper R. L, Tollner E. W, Way T. R. 2007. Finite element analysis of cone penetration in soil for prediction of hardpan location. T. ASABE 50(1):23–31.
- [255] Tekin Y, Kul B, Okursoy R. 2008. Sensing and 3D mapping of soil compaction. *Sensors*, 8:3447-3459.



- [256] Terzaghi K. 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley, New York, NY.
- [257] Thomas A. M. 1966. In situ measurement of moisture in soil and similar substances by “fringe” capacitance. *J. Sci. Instrum.* (43):21–27.
- [258] Topakci M, Unal I, Canakci M, Kursat Celik H, Karayel D. 2010. Design of a Horizontal Penetrometer for Measuring On-the-Go Soil Resistance. *Sensors* 2010, 10: 9337-9348.
- [259] Topakci M, Unal I, Canakci M, Celik H K, Karayel D. 2010. Design of a horizontal penetrometer for measuring on-the-go soil resistance. *Sensors*, 10:9337-9348.
- [260] Triantafilis J, Odeh I. O. A, McBratney A. B. 2001. Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton. *Soil Science Society of America Journal*, 65:869–878.
- [261] van Bergeijk J, Goense D, Speelman L. 2001. Soil tillage resistance as a tool to map soil type differences. *J. Agric. Eng. Res.* 79(4):371–387.
- [262] van Bergeijk J, Goense D. 1996. Soil tillage as tool to map soil type differences. In: *Proceeding of Precision Agriculture*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, pp. 605–616.
- [263] Verschoore R, Pieters J. G, Seps T, Spriet Y, Vangeyte J. 2003. Development of a sensor for continuous soil resistance measurement. In: *Stafford, J., Werner, A. (Eds.), Precision Agriculture*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, str. 689–695.
- [264] Viscarra-Rossel R. A, McBratney A. B. 1998. Soil chemical analytical accuracy and costs: Implications from precision agriculture. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38:765–775.
- [265] Vitharana U. W. A, Van Meirvenne M, Cockx L, Bourgeois J. 2006. Identifying potential management zones in a layered soil using several sources of ancillary information. *Soil Use and Management*, 22:4005–413.
- [266] Voorhees K. E, Walker P. N. 1977. Tractionability as a function of soil moisture. *T, ASAE*, 20:97–106.
- [267] Warrick A. W, Myers D. E, Nielsen D. R. 1986. Geostatistical methods applied to soil science. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1, physical and mineralogical methods, agronomy monograph no. 9* (2nd ed.). (pp. 53–82). Madison, WI: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
- [268] Webster R, Butler B. E. 1976. Soil survey and classification studies at Ginninderra. *Australian Journal of Soil Research*, 14:1–26.



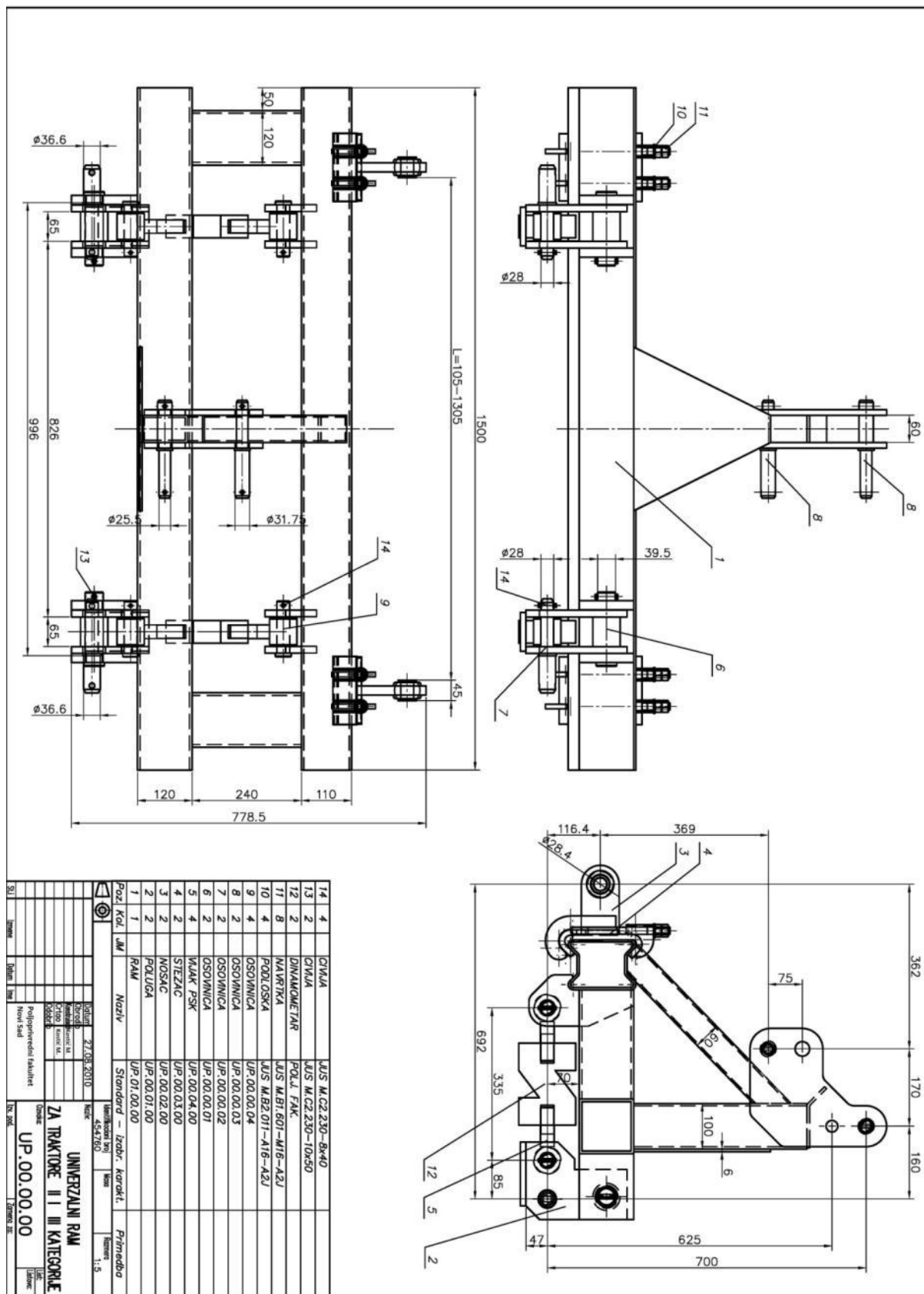
- [269] Webster R, Margareth A. Oliver. 2007. *Geostatistics for environmental scientists*. Chichester, UK: Wiley.
- [270] Webster R, Margareth A. Oliver. 1989. Disjunctive kriging in agriculture. In M. Armstrong (Ed.), *Geostatistics* (Vol. 1, pp. 421–432). Dordrecht: Kluwer.
- [271] Wheeler P. N, Godwin R. J. 1996. Soil dynamics of single and multiple tines at speeds up to 20 km/h. *J. Agr. Eng. Res.* 63:243–250.
- [272] Wismer R. D, Luth H. J. 1972. Performance of plane soil cutting blades in clay. *T. ASAE* 15(2): 211-216.
- [273] Youden W. J, Mehlich, A. 1937. Selection of efficient methods for soil sampling. *Contributions of the Boyce Thompson Institute for Plant Research*, 9: 59–70.
- [274] Yu H. S, Mitchel J. K. 1998. Analysis of cone resistance: review of methods. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 124, 140–149, ASCE.
- [275] Yurui S, Lammers P. S, Daokuna M, Jianhuic L, Qingmeng Z. 2008. Determining soil physical properties by multi-sensor technique. *Sensor Actuator.* 147(2008) 352–357.
- [276] Yurui S, Ma D, Lammers S. P, Schmittmann O, Rose M. 2006. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. *Soil Till. Res.* 86:209–217.
- [277] Zelenin A. N. 1950. Basic physics of the theory of soil cutting, Akademia Nauk USSR, Moscow-Leningrad (NIAE Translation).



## **11. Prilozi**

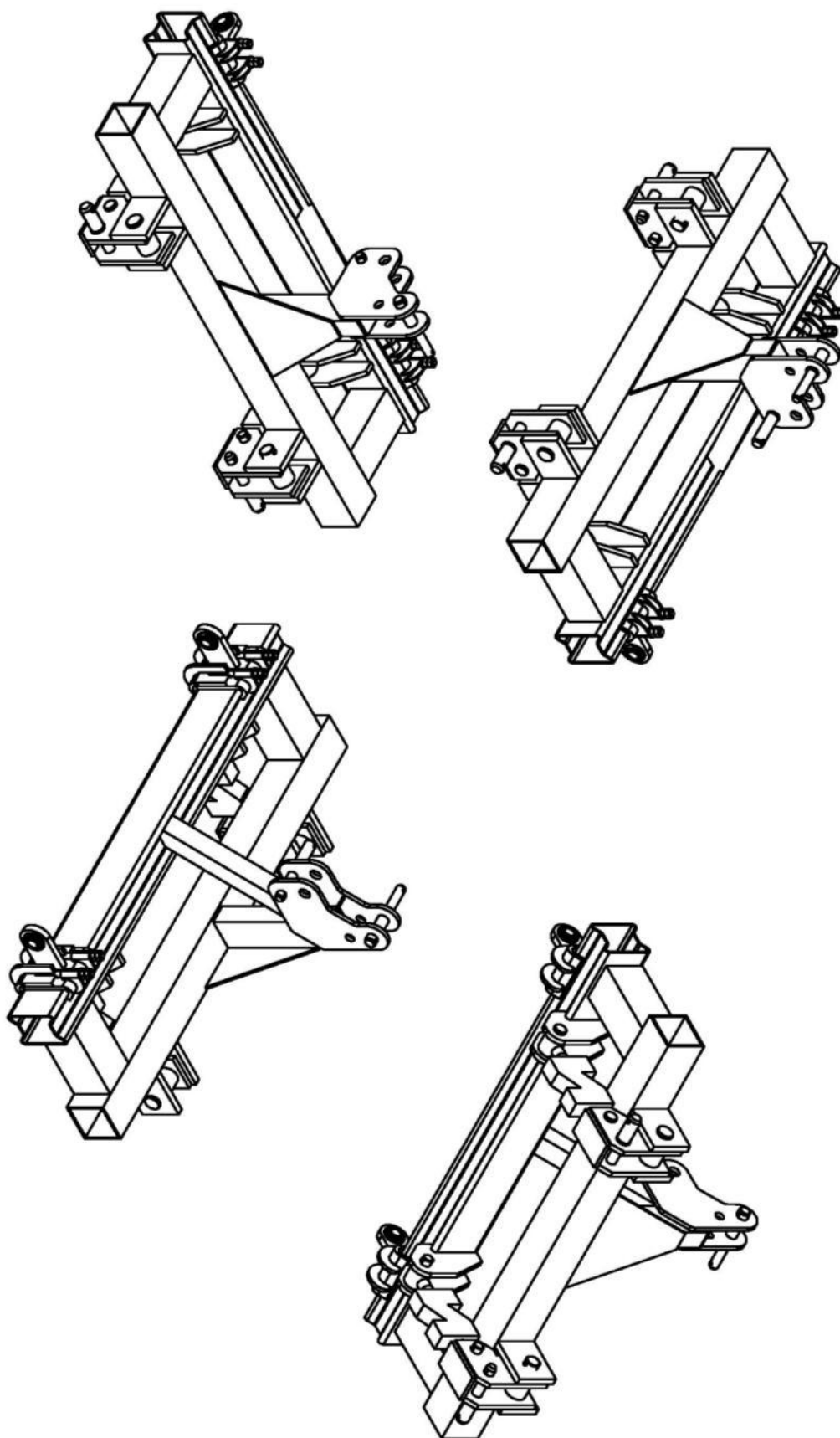


Sklopni crtež kompletnog rama





Aksonometrijski prikaz modela rama





## Rešenje o priznavanju patenta



РЕПУБЛИКА СРБИЈА  
ЗАВОД ЗА ИНТЕЛЕКТУАЛНУ СВОЈИНУ

990 број 2014/5370-МП-2014/0007

Датум: 22.7.2014. године

Београд, Книгиње Љубице 5

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ПОЉОПРИВРЕДНИ ФАКУЛТЕТ  
НОВИ САД  
ДЕКАНАТ

Примљено: 06.08.2014			
Орг. јед.	Број	Прилог	Вредност
Срп	1384	1/4	

2-1/7

Завод за интелектуалну својину је, на основу члана 31. Закона о министарствима („Службени гласник РС”, бр. 44/14), чл. 67, 69, 70. и 164. Закона о патентима („Службени гласник РС”, бр. 99/11), решења о преносу овлашћења број 4/452 од 17.4.2014. године, у управном поступку по пријави малог патента број МП-2014/0007, чији је подносилац ПОЉОПРИВРЕДНИ ФАКУЛТЕТ НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 8, 21000 Нови Сад, RS, ради признања малог патента, донео следеће

## РЕШЕЊЕ

**I ПРИЗНАЈЕ СЕ** мали патент по пријави број МП-2014/0007 од 7.12.2012. године, за проналазак под називом: „УНИВЕРЗАЛНИ РАМ ЗА МЕРЕЊЕ МЕХАНИЧКОГ ОТПОРА ОБРАДЕ ЗЕМЉИШТА НА ПРИКЉУЧНИМ ПОЉОПРИВРЕДНИМ МАШИНАМА”, према опису, патентним захтевима и цртежима из патентног списка.

**II УПИСУЈЕ СЕ** у Регистар малих патената Завода за интелектуалну својину признато право из тачке I диспозитива овог решења под бројем

1384

Носилац (оци) патента:

ПОЉОПРИВРЕДНИ ФАКУЛТЕТ НОВИ САД  
Трг Доситеја Обрадовића 8,  
21000 Нови Сад, RS

Проналазач(и):

КОСТИЋ Марко,  
ЈНА 58, 21471 Равно Село, RS;  
МАЛИНОВИЋ др Недељко,  
Мачванска 8, 21000 Нови Сад, RS

Признаје се право  
првенства по пријави:

**III** Податке о признатом праву и први патентни захтев објавити у „Гласнику интелектуалне својине” број 5/2014.



### Образложење

ПОЉОПРИВРЕДНИ ФАКУЛТЕТ НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 8, 21000 Нови Сад, RS, поднео је дана 7.12.2012. године пријаву малог патента број МП-2014/0007, за проналазак под називом „УНИВЕРЗАЛНИ РАМ ЗА МЕРЕЊЕ МЕХАНИЧКОГ ОТПОРА ОБРАДЕ ЗЕМЉИШТА НА ПРИКЉУЧНИМ ПОЉОПРИВРЕДНИМ МАШИНАМА”.

Закључком 990 број 2014/283-П-2012/0542 од 10.02.2014. године, Завод је предметну пријаву претворио у пријаву за признање малог патента МП-2014/0007, у складу са чланом 166. Закона, са признатим датумом подношења пријаве 07.12.2012. године.

У спроведеном поступку за признање малог патента, утврђено је да су испуњени услови из члана 163. ст. 2, 3, 4, 5. и 6, чл. 99. и 104. ст. 1. тач. 1), 2) и 4) Закона о патентима („Службени гласник РС”, бр. 99/11).

Имајући у виду наведено, Завод је, на основу чл. 164, 167, 109. и 111. Закона о патентима, одлучио као у диспозитиву овог решења.

#### Упутство о правном средству:

Против овог решења може се изјавити жалба Влади Републике Србије у року од 15 дана од дана пријема решења, а преко овог Завода. Уз жалбу треба доставити доказ о уплати административне таксе у износу од 420,00 динара.

#### Решење доставити:

- подносиоцу пријаве/заступнику
- ПОЉОПРИВРЕДНИ ФАКУЛТЕТ НОВИ САД  
Трг Доситеја Обрадовића 8  
21000 Нови Сад
- регистру
  - издаваштву преко информационог система
  - документацији
  - у спис



Самостални саветник  
Милан Миљевић





## **BIOGRAFIJA**

Marko Kostić rođen je 03. 05. 1983. u Novom Sadu. Osnovnu školu je završio u Petrovaradinu, a srednju elektrotehničku u Novom Sadu. Na Poljoprivredni fakultet u Novom Sadu, smer za Poljoprivrednu tehniku upisao se školske 2002/03 godine. Osnovne studije je završio u roku sa prosečnom ocenom 9,35. Diplomski pod nazivom "Analiza hidrauličnih uređaja na poljoprivrednim traktorima" odbranio je sa ocenom 10. Master studije smera za Poljoprivrednu tehniku upisuje na istom fakultetu 2007/08 godine, a studije završava 2009. godine sa prosečnom ocenom 10,00 uz odbranjeni master rad pod nazivom "Eksploataciona pouzdanost prototipnog rešenja elektronske kontrole setve "SCAN 2A". Doktorske studije upisuje 2010/11 na smeru za Agronomiju na Poljoprivrednom fakultetu u Novom Sadu. Prosečna ocena iz svih predmeta na doktorskim studijama je 10,00.

Od 2008. godine zaposlen je na Departmanu za poljoprivrednu tehniku Poljoprivrednog fakulteta u Novom Sadu kao istraživač na projektu i saradnik u nastavi na više predmeta. Učestvovao je u radu više domaćih i stranih savetovanja, konferencija i seminara. Samostalno ili kao koautor, objavio je 30 naučnih radova iz oblasti Poljoprivredna tehnika u domaćim i 1 rad u stranom naučnom časopisu. Ima priznanje patenta pod nazivom "Univerzalni ram za merenje otpora obrade zemljišta na priključnim poljoprivrednim mašinama" (br. 1384). Kao saradnik bio je uključen u realizaciju projekata koje je finansiralo Ministarstvo nauke, prosvete i tehnološkog razvoja, kao i Pokrajinskog sekretarijata za nauku i tehnološki razvoj. Boravio je na stručnom usavršavanju u Narodnoj Republici Kini 2010 u trajanju od 45 dana (Institut za biogas Ministarstva za poljoprivredu NRK-BIOMA, Chengdu, NR Kina).

Služi se engleskim jezikom.

Oženjen je i ima dvoje dece.