

UNIVERZITET U NOVOM SADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET SUBOTICA



mr Ognjen Gabrić

**EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE
PROCESA NA SLIVU: PADAVINE,
OTICAJ I EROZIJA TLA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Subotica, 2014.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET SUBOTICA
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 | mr Ognjen Gabrić, dipl. građ. inž. |
| Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): MN | dr Jasna Plavšić, docent, dr Miodrag Spasojević, redovni profesor |
| Naslov rada: NR | Eksperimentalno istraživanje procesa na slivu: padavine, oticaj i erozija tla |
| Jezik publikacije: JP | Srpski |
| Jezik izvoda: JI | srp. / eng. |
| Zemlja publikovanja: ZP | Republika Srbija |
| Uže geografsko područje: UGP | Vojvodina |
| Godina: GO | 2014. |
| Izdavač: IZ | autorski reprint |
| Mesto i adresa: MA | 24000 Subotica, Kozaračka 2a |
| Fizički opis rada, FO: (broj poglavlja / stranica / slika / tabela / referenci / priloga) | 8/224/83/15/51/47 |
| Naučna oblast: NO | Tehničke nauke |
| Naučna disciplina: ND | Hidrologija |
| Predmetna odrednica, ključne reči: PO | laboratorijska istraživanja, padavine, oticaj, erozija |
| UDK | 551.311.21:001.891.5 |
| Čuva se: ČU | Biblioteka Građevinskog fakulteta u Subotici, Kozaračka 2a, 24000 Subotica |
| Važna napomena: VN | |
| Izvod: IZ | Kao produkt erozionih procesa u slivu javlja se erozioni nanos koji sa padine dospeva u rečnu mrežu. Erozijom se odnosi površinski pokrivač bogat hranljivim sastojcima i smanjuje poljoprivredna proizvodnja, smanjuju se propusne moći kanala, zapremine akumulacija i pogoršava se kvalitet vode. Predmet istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji je eksperimentalno izučavanje erozije tla na slivu, prouzrokovane padavinama i površinskim oticajem sa peskovitog zemljišta pod nagibom. Variranjem parametara koji utiču na proces erozije, a koji su istraženi u ovom radu (nagib terena, dužina slivne površine i intenzitet kiše) dobijeni su hidrogrami oticaja i psamogrami na osnovu kojih su urađene regresione analize. Za ispitivanje veze između padavina, oticaja i erozije napisan je matematički model oticaja, baziran na jednačinama kinematskog talasa, koji predstavlja osnovu za dalja istraživanja. |
| Datum prihvatanja teme od strane NN veća: DP | 10.11.2008. |
| Datum odbrane: DO | |
| Članovi komisije: (ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status) KO | predsednik: dr Marko Ivetić, redovni profesor, Građevinski fakultet Beograd član: dr Zoran Radić, docent, Građevinski fakultet Beograd član: dr Jovan Despotović, vanredni profesor, Građevinski fakultet Beograd član: dr Jasna Plavšić, docent, Građevinski fakultet Beograd član: dr Miodrag Spasojević, redovni profesor, Građevinski fakultet Subotica |

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
KEY WORD DOCUMENTATION**

| | |
|-------------------------------------|--|
| Accession number: ANO | |
| Identification number: INO | |
| Document type: DT | Monograph documentation |
| Type of record: TR | Textual printed material |
| Contents code: CC | |
| Author: AU | mr Ognjen Gabrić |
| Mentor: MN | dr Jasna Plavšić, dr Miodrag Spasojević |
| Title: TI | Experimental Research of Catchment Processes: Rainfall, Runoff and Soil Erosion |
| Language of text: LT | Serbian |
| Language of abstract: LA | eng. / srp. |
| Country of publication: CP | Republic of Serbia |
| Locality of publication: LP | Vojvodina |
| Publication year: PY | 2014. |
| Publisher: PU | Author's reprint |
| Publication place: PP | 24000 Subotica, Kozaracka 2a |
| Physical description: PD | 8/224/83/15/51/47 |
| Scientific field SF | Technical Sciences |
| Scientific discipline SD | Hydrology |
| Subject, Key words SKW | laboratory research, rainfall, runoff, erosion |
| UC | 551.311.21:001.891.5 |
| Holding data: HD | Library of the Faculty of Civil Engineering, Kozaracka 2a, 24000 Subotica |
| Note: N | |
| Abstract: AB | Erosion processes in the catchment produces sediments that reaches the river network. Erosion leads to reduced agricultural production, reduction in the channel and accumulation storage capacity and deteriorating water quality. The research presented in this doctoral thesis is an experimental study of soil erosion caused by rainfall and surface runoff from sandy soil on inclined surface. By varying the parameters that influence the process of erosion (slope, length of the plot and the intensity of rainfall), hydrographs and graphs of the sediment concentrations are obtained and the regression analysis is performed. To investigate the relationship between rainfall, runoff and erosion, mathematical model of runoff, based on the kinematic wave equations, is written. This model forms the basis for further research. |
| Accepted on Scientific Board on: AS | 10.11.2008. |
| Defended: DE | |
| Thesis Defend Board: DB | president: Marko Ivetić, Ph.D., full professor, Faculty of Civil Engineering Belgrade member: Zoran Radić, Ph.D., assistant professor, Faculty of Civil Engineering Belgrade member: Jovan Despotović, Ph.D., associate professor, Faculty of Civil Engineering Belgrade member: Jasna Plavšić, Ph.D., assistant professor, Faculty of Civil Engineering Belgrade member: Miodrag Spasojević, Ph.D., full professor, Faculty of Civil Engineering Subotica |

Zahvalnica

Predajom ove doktorske disertacije zaokružujem period od nepunih 19 godina tokom kojih sam od studenta osnovnih studija Građevinskog fakulteta u Subotici došao do praga najvišeg akademskog zvanja – doktora nauka. Koristim ovu priliku da se zahvalim svima koji su me podržavali i davali mi snage da ne odustanem.

Kao prvo želim da se zahvalim svojim mentorima, profesorici Jasni Plavšić na savetima i pomoći oko obrade rezultata merenja kao i profesoru Miodragu Spasojeviću na pomoći oko izrade matematičkog modela oticaja i erozije.

Takođe, želim da se zahvalim i kolegama sa Građevinskog fakulteta u Subotici: dekanu, profesoru Miroslavu Beševiću, prodekanu Danijelu Kukarasu, kolegi Hovanj Lajošu i zaposlenima na pomoći oko procedure prijave i predaje doktorske teze. Zahvalnost dugujem i profesoru Dušanu Prodanoviću sa Građevinskog fakulteta u Beogradu na pomoći i idejama za objavljivanje radova kao i na ukazanom poverenju na projektu „Sistemi za odvođenje kišnih voda kao deo urbane i saobraćajne infrastrukture“.

Konačno, želim da se zahvalim prijateljima i svojoj porodici, roditeljima, bratu, supruzi Svetlani a naročito deci, Stevanu i Vidaku, na podršci, strpljenju i razumevanju za vreme koje sam potrošio na izradu ove teze.

Ovaj rad je delom finansiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, projekat TR37010 „Sistemi za odvođenje kišnih voda kao deo urbane i saobraćajne infrastrukture“

Sadržaj

| | |
|---|-----|
| Sadržaj..... | ix |
| Spisak slika..... | xi |
| Spisak tabela..... | xv |
| Spisak priloga..... | xvi |
| Spisak oznaka | xix |
| 1. Uvod..... | 2 |
| 1.1. Predmet i cilj istraživanja | 3 |
| 1.2. Struktura teze | 4 |
| 2. Pregled literature | 8 |
| 2.1. Osnovni elementi procesa | 8 |
| 2.1.1. Oticaaj..... | 8 |
| 2.1.2. Tipovi erozije..... | 11 |
| 2.2. Eksperimentalna istraživanja | 17 |
| 2.2.1. Simulatori kiše | 17 |
| 2.2.2. Eksperimentalne instalacije i slivovi..... | 26 |
| 2.2.3. Rezultati eksperimentalnih istraživanja..... | 28 |
| 2.3. Modeli erozije zasnovani na empirijskoj korelaciji | 41 |
| 2.3.1. Stariji modeli..... | 41 |
| 2.3.2. Model USLE (Universal Soil Loss Equation) i njegove modifikacije | 42 |
| 2.3.3. Ostali modeli za proračun erozije..... | 47 |
| 2.4. Modeli oticaja i erozije zasnovani na fizičkim procesima | 49 |
| 2.4.1. KINEROS2 (The KINEmatic Runoff EROSION Model)..... | 53 |
| 2.4.1.1. Padavine..... | 54 |
| 2.4.1.2. Intercepcija | 54 |
| 2.4.1.3. Infiltracija | 55 |
| 2.4.1.4. Površinski oticaaj vode | 56 |
| 2.4.1.5. Oticaaj kroz kanale..... | 61 |
| 2.4.1.6. Eroziija i sedimentacija | 62 |
| 2.4.2. Primeri primene modela KINEROS2 | 65 |
| 3. Eksperimentalna instalacija, kalibracija i postupci merenja..... | 70 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 3.1. | Opis instalacije..... | 70 |
| 3.2. | Kalibracija simulatora | 73 |
| 3.3. | Merne veličine i parametri..... | 80 |
| 3.3.1. | Padavine | 80 |
| 3.3.2. | Zemljište | 80 |
| 3.3.3. | Zbijenost i vlažnost zemljišta | 82 |
| 3.3.4. | Nagib zemljišta..... | 83 |
| 3.4. | Postupak merenja | 83 |
| 4. | Rezultati merenja | 88 |
| 4.1. | Set podataka za statistički pristup..... | 88 |
| 4.2. | Set podataka za modeliranje procesa oticaja i erozije | 94 |
| 4.3. | Merna nesigurnost..... | 96 |
| 5. | Obrada i analiza rezultata na osnovu statističkog pristupa | 104 |
| 5.1. | Regresiona analiza..... | 104 |
| 5.1.1. | Intenzitet kiše..... | 105 |
| 5.1.2. | Nagib slivne površine..... | 106 |
| 5.1.3. | Dužina slivne površine | 107 |
| 5.2. | Test homogenosti podataka sa različitih dužina slivova | 107 |
| 5.3. | Višestruka regresiona analiza..... | 113 |
| 6. | Direktna primena modela KINEROS2 na set podataka za statističku analizu | 116 |
| 7. | Analiza i prikaz rezultata na osnovu modelisanja fizičkih procesa..... | 122 |
| 7.1. | Oticaj | 122 |
| 7.1.1. | Teorijske osnove | 122 |
| 7.1.2. | Numeričko rešavanje jednačina kinematskog talasa | 129 |
| 7.1.3. | Rezultati modela oticaja..... | 131 |
| 7.2. | Erozija | 135 |
| 7.2.1. | Teorijske osnove | 135 |
| 7.2.2. | Numeričko rešavanje jednačine transporta nanosa | 139 |
| 7.2.3. | Rezultati modela erozije | 140 |
| 8. | Diskusija i zaključci | 144 |
| | Literatura..... | 153 |
| | Prilozi | 159 |

Spisak slika

| | |
|---|----|
| Slika 2.1. Tipovi erozije..... | 11 |
| Slika 2.2. Transformacija vertikalne sile pritiska u bočne napone [10]..... | 14 |
| Slika 2.3. Udar kišne kapi o tlo (http://irrinet.net/?attachment_id=110)..... | 15 |
| Slika 2.4 Transport nanosa pod uticajem kišne kapi [8]..... | 15 |
| Slika 2.5. Simulator sa cevčicama [14]..... | 19 |
| Slika 2.6. a) upotreba baštenske kantice b) upotreba baštenske prskalice [14]..... | 20 |
| Slika 2.7. Simulatori sa mlaznicama pod pritiskom [14]..... | 22 |
| Slika 2.8. Brzine prirodne i simulirane kiše [17]..... | 23 |
| Slika 2.9. Cev sa prskalicama [17]..... | 24 |
| Slika 2.10. Kutija i oluk [17]..... | 24 |
| Slika 2.11. Norton-ov simulator (rad na terenu) [17]..... | 25 |
| Slika 2.12. Norton-ov simulator (rad u laboratoriji) [17]..... | 25 |
| Slika 2.13. Uticaj nagiba i intenziteta kiše na eroziju peskovito-ilovastog zemljišta [22]..... | 31 |
| Slika 2.14. Erozijska funkcija nagiba slivne površine [23]..... | 32 |
| Slika 2.15. Erozijska funkcija nagiba i površinskog oticaja [25]..... | 34 |
| Slika 2.16. Erozijska funkcija nagiba [29]..... | 36 |
| Slika 2.17. Vrednosti erozije (E) po analiziranoj literaturi..... | 39 |
| Slika 2.18. Nagibi slivne površine (I) po analiziranoj literaturi..... | 39 |
| Slika 2.19. Intenzitet kiše (i) po analiziranoj literaturi..... | 40 |
| Slika 2.20. Dužine slivova (L) po analiziranoj literaturi..... | 40 |
| Slika 2.21. Zemljište korišćeno za izučavanje erozije..... | 41 |
| Slika 2.22. Šematski prikaz kreiranja elemenata KINEROS2 modela[42]..... | 54 |
| Slika 2.23. Preporučene vrednosti intercepcije [41]..... | 55 |
| Slika 2.24. Preporučene vrednosti koeficijenta filtracije [41]..... | 56 |
| Slika 2.25. Šema nastanka površinskog oticaja [41]..... | 57 |
| Slika 2.26. Preporučene vrednosti koeficijenta hrapavosti [41]..... | 59 |
| Slika 2.27. Diskretizaciona šema [41]..... | 60 |
| Slika 2.28. Određivanje faktora K_{USLE} [41]..... | 64 |

| | |
|--|----|
| Slika 2.29. Uporedni prikaz merenih i simuliranih rezultata oticaja i erozije [43] . | 67 |
| Slika 3.1. Slivna površina – šematski prikaz..... | 70 |
| Slika 3.2. Slivna površina - dimenzije | 71 |
| Slika 3.3. Simulator kiše | 72 |
| Slika 3.4. Kutija za redukovanje intenziteta kiše..... | 72 |
| Slika 3.5. a) krajnji položaj mlaznice, b) radni položaj mlaznice..... | 73 |
| Slika 3.6. Raspodela vode u čašicama za mlaznicu broj 1 (% od maksimalne vrednosti) | 74 |
| Slika 3.7. Raspodela vode u čašicama za mlaznicu broj 2 (% od maksimalne vrednosti) | 75 |
| Slika 3.8. Raspodela vode u čašicama za mlaznicu broj 3 (% od maksimalne vrednosti) | 75 |
| Slika 3.9. Raspodela vode u čašicama za mlaznicu broj 4 (% od maksimalne vrednosti) | 76 |
| Slika 3.10. Raspodela vode u čašicama za mlaznicu broj 5 (% od maksimalne vrednosti) | 76 |
| Slika 3.11. Raspodela vode u čašicama za mlaznicu broj 6 (% od maksimalne vrednosti) | 77 |
| Slika 3.12. Prosečna raspodela vode (% od maksimalne vrednosti)..... | 77 |
| Slika 3.13. Christiansen-ov koeficijent za stacionarnu i oscilirajuću mlaznicu..... | 78 |
| Slika 3.14. Raspodela vode na slivnoj površini | 78 |
| Slika 3.15. Kalibracija simulatora kiše | 79 |
| Slika 3.16. Računske padavine MS Palić [46] | 80 |
| Slika 3.17. Granulometrijske krive ugrađivanog peska | 81 |
| Slika 3.18. Trougaoni USDA dijagram | 82 |
| Slika 3.19. Zbijanje zemljišta | 84 |
| Slika 3.20. Izravnavano i zbijeno zemljište | 84 |
| Slika 4.1. Erozijska površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m..... | 89 |
| Slika 4.2. Erozijska površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m..... | 90 |
| Slika 4.3. Erozijska površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m..... | 91 |
| Slika 4.4. Erozijska površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m..... | 92 |
| Slika 4.5. Erozijska površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m..... | 93 |

| | |
|--|-----|
| Slika 4.6. Kalibracioni set za oticaj..... | 94 |
| Slika 4.7. Verifikacioni set za oticaj | 94 |
| Slika 4.8. Kalibracioni set za eroziju | 95 |
| Slika 4.9. Verifikacioni set za eroziju | 95 |
| Slika 5.1. Ukupna erozija sa slivnih površina dužine 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m pod nagibom 4, 6 i 10% usled kiše intenziteta 3.1, 2.8, 2.4, 2.2 i 2.0 mm/min | 105 |
| Slika 5.2. Ukupna erozija usled kiše intenziteta 3.1, 2.8, 2.4, 2.2 i 2.0 mm/min | 106 |
| Slika 5.3. Ukupna erozija usled kiše intenziteta 3.1, 2.8, 2.4, 2.2 i 2.0 mm/min, pri nagibima 10%, 7% i 4% sa tabli dužine 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 metara..... | 107 |
| Slika 5.4. Ukupna erozija usled kiše intenziteta 3.1, 2.8, 2.4, 2.2 i 2.0 mm/min | 111 |
| Slika 5.5. Ukupna erozija sa slivnih površina pod nagibom 4, 6 i 10%..... | 112 |
| Slika 5.6. Šematski prikaz modela..... | 116 |
| Slika 5.7. Kalibracioni set za reprodukciju kompletnih hidrograma oticaja | 118 |
| Slika 5.8. Kalibracioni set za reprodukciju psamograma..... | 118 |
| Slika 5.9. Funkcija promene faktora erodibilnosti zemljišta..... | 119 |
| Slika 6.1. Uporedni prikaz merenih i protoka dobijenih modelom – kalibracioni set | 132 |
| Slika 6.2. Dubine dobijene modelom – kalibracioni set..... | 132 |
| Slika 6.3. Brzine dobijene modelom – kalibracioni set | 133 |
| Slika 6.4. Uporedni prikaz merenih i protoka dobijenih modelom – verifikacioni set | 133 |
| Slika 6.5. Dubine dobijene modelom – verifikacioni set | 134 |
| Slika 6.6. Brzine dobijene modelom – verifikacioni | 134 |
| Slika 6.7. Uporedni prikaz merenog i pronosa nanosa dobijenog modelima – kalibracioni set..... | 140 |
| Slika 6.8. Uporedni prikaz merenog i pronosa nanosa dobijenog modelima – verifikacioni set..... | 140 |
| Slika 6.9. Proračun erozije na osnovu jednačina (6.57) i (6.58) za laminarno tečenje – kalibracioni set | 141 |
| Slika 6.10. Proračun erozije na osnovu jednačina (6.57) i (6.58) za laminarno tečenje – verifikacioni set..... | 141 |
| Slika 7.1. Izučavana zemljišta..... | 144 |

| | |
|--|-----|
| Slika 7.2 Dijapazoni rezultata erozije za sve vrste izučavanih zemljišta | 145 |
| Slika 7.3. Maksimalne vrednosti erozije u zavisnosti od tipa zemljišta..... | 145 |
| Slika 7.4. Izučavane dužine slivnih površina..... | 146 |
| Slika 7.5. Izučavani nagibi | 147 |
| Slika 7.6. Izučavani intenziteti kiša | 148 |

Spisak tabela

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1. Zavisnost intenziteta kiše i veličine kišne kapi [8] | 12 |
| Tabela 2.2. Brzina padanja kišne kapi [9]..... | 12 |
| Tabela 2.3. Poređenje nekoliko fizički baziranih programskih paketa [38]..... | 51 |
| Tabela 2.4. Jednačine za opisivanje erozije i transportnih nanosa na slivu [38] | 52 |
| Tabela 3.1. Prosečne zapremine vode na slivnim površinama nakon 15 minuta.... | 79 |
| Tabela 4.1. Merna nesigurnost zapremine..... | 99 |
| Tabela 4.2 Merna nesigurnost vremena uzorkovanja..... | 99 |
| Tabela 4.3. Merna nesigurnost intenziteta kiše | 100 |
| Tabela 4.4. Merna nesigurnost erozije za nagib od 10% | 100 |
| Tabela 4.5. Merna nesigurnost erozije za nagib od 7% | 100 |
| Tabela 4.6. Merna nesigurnost erozije za nagib od 4% | 100 |
| Tabela 5.1 Merene vrednosti erozije | 109 |
| Tabela 5.2. Rangovi podataka, R..... | 110 |
| Tabela 5.3. Rezultat Kruskal-Wallis testa | 111 |
| Tabela 5.4. Parametri simulacije | 117 |

Spisak priloga

| | |
|---|-----|
| Prilog 1. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 3.1 mm/min sa terena u nagibu od 10%..... | 159 |
| Prilog 2. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.8 mm/min sa terena u nagibu od 10%..... | 160 |
| Prilog 3. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.4 mm/min sa terena u nagibu od 10%..... | 161 |
| Prilog 4. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.2 mm/min sa terena u nagibu od 10%..... | 162 |
| Prilog 5. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.0 mm/min sa terena u nagibu od 10%..... | 163 |
| Prilog 6. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 3.1 mm/min sa terena u nagibu od 7% | 164 |
| Prilog 7. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.8 mm/min sa terena u nagibu od 7% | 165 |
| Prilog 8. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.4 mm/min sa terena u nagibu od 7% | 166 |
| Prilog 9. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.2 mm/min sa terena u nagibu od 7% | 167 |
| Prilog 10. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.0 mm/min sa terena u nagibu od 7% | 168 |
| Prilog 11. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 3.1 mm/min sa terena u nagibu od 4% | 169 |
| Prilog 12. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.8 mm/min sa terena u nagibu od 4% | 170 |
| Prilog 13. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.4 mm/min sa terena u nagibu od 4% | 171 |
| Prilog 14. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.2 mm/min sa terena u nagibu od 4% | 172 |
| Prilog 15. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.0 mm/min sa terena u nagibu od 4% | 173 |

| | |
|--|-----|
| Prilog 16. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 3.1 mm/min sa terena u nagibu od 10%..... | 174 |
| Prilog 17. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.8 mm/min sa terena u nagibu od 10%..... | 175 |
| Prilog 18. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.4 mm/min sa terena u nagibu od 10%..... | 176 |
| Prilog 19. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.2 mm/min sa terena u nagibu od 10%..... | 177 |
| Prilog 20. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.0 mm/min sa terena u nagibu od 10%..... | 178 |
| Prilog 21. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 3.1 mm/min sa terena u nagibu od 7% | 179 |
| Prilog 22. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.8 mm/min sa terena u nagibu od 7% | 180 |
| Prilog 23. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.4 mm/min sa terena u nagibu od 7% | 181 |
| Prilog 24. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.2 mm/min sa terena u nagibu od 7% | 182 |
| Prilog 25. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.0 mm/min sa terena u nagibu od 7% | 183 |
| Prilog 26. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 3.1 mm/min sa terena u nagibu od 4% | 184 |
| Prilog 27. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.8 mm/min sa terena u nagibu od 4% | 185 |
| Prilog 28. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.4 mm/min sa terena u nagibu od 4% | 186 |
| Prilog 29. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.2 mm/min sa terena u nagibu od 4% | 187 |
| Prilog 30. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.0 mm/min sa terena u nagibu od 4% | 188 |
| Prilog 31. Oticaaj sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled..... | 189 |
| Prilog 32. Oticaaj sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m | 190 |

| | |
|---|-----|
| Prilog 33. Oticaaj sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m | 191 |
| Prilog 34. Oticaaj sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m | 192 |
| Prilog 35. Oticaaj sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m | 193 |
| Prilog 36. Eroziija sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m..... | 194 |
| Prilog 37. Eroziija sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m..... | 195 |
| Prilog 38. Eroziija sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m..... | 196 |
| Prilog 39Eroziija sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m..... | 197 |
| Prilog 40. Eroziija sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m..... | 198 |
| Prilog 41. Eksperimentalna instalacija | 199 |
| Prilog 42. Posude za zasićivanje zemljišta | 200 |
| Prilog 43. Izliv i slavine za ispuust vode nakon zasićenja zemljišta | 200 |
| Prilog 44. Pumpa i rezervoar za vodu | 201 |
| Prilog 45. Upravljački mehanizam..... | 201 |
| Prilog 46. Mlaznica VeeJet 80100..... | 202 |
| Prilog 47. Kutija za ograničavanje dometa mlaza i oluci za povrat viška vode iz kutije u rezervoar..... | 202 |

Spisak oznaka

- a – erozioni faktor koji obuhvata tip zemljišta i stanje površine,
A – gubitak zemljišta po jedinici površine ($ML^{-2}T^{-1}$),
A – površina poprečnog preseka (L^2),
A – prosečan gubitak tla sa jedinične površine u nagibu (MT^{-2}),
A – veličina slivne površine (L^2),
b – eksponencijalni koeficijent,
C – Chezy-jev koeficijent ($L^{-1/2}T^{-1}$),
C – faktor biljnog pokrivača,
 C_d – koeficijent sile otpora,
 $c_f=422 \cdot K_{USLE}(\Phi_f)$ – erodibilnost zemljišta - konstanta vezana za zemljište i osobine površine,
 c_g – koeficijent intenziteta pronosa (T^{-1}),
 c_h – faktor umirenja erozije slojem vode na površini terena,
 C_m – ravnotežna koncentracija nanosa,
 C_s – koncentracija sedimenata (-),
 $C_s(x,t)$ – trenutna, lokalna koncentracija nanosa,
d – prečnik zrna (L),
 D_i – intenzitet erozije ($M L^2T^{-1}$),
e – intenzitet erozije (L^2T^{-1}),
E – intenzitet erozije ($ML^{-2} T^{-1}$),
E – kinetička energija ($ML^{-1} T^{-2}$),
E – ukupna erozija nakon kiše trajanja 15 minuta [M],
E – ukupna erozija usled kiše trajanja 15 minuta [ML^{-2}],
 e_h – hidraulička erozija (L^2T^{-1}),
 e_s – erozija usled kiše (L^2T^{-1}),
f – intenzitet infiltracije (L^2T^{-1}),
f – koeficijent trenja,
g – gravitaciono ubrzanje (LT^{-2}),
h – dubina vode (L),
I – intenzitet kiše (LT^{-1}),

i, j - indeksi za označavanje prostornog i vremenskog koraka,
 i_0 - pad dna,
 I_{30} - maksimalni 30-minutni intenzitet kiše (LT^{-1}),
 i_e - efektivna kiša (LT^{-1}),
 $k(h) = \exp(-c_h h)$ - redukcionni faktor erozije kišom,
 K - faktor erodibilnosti zemljišta (ML^{-2}),
 K - statistika testa,
 K_i - erozioni koeficijent (MTL^{-4}),
 K_{USLE} - vrednost faktora K iz USLE modela,
 L - dužina elementa (L),
 L - dužina slivne površine (L),
 L - faktor dužine padine,
 L - horizontalna dužina tla u nagibu (L),
 m - parametar zavisian od načina obračuna otpora trenja,
 n - broj merenja,
 n - Manningov koeficijent hrapavosti ($L^{-1/3}T$),
 N - ukupan broj podataka u svim grupama,
 O_{avg} - prosečna merena vrednost erozije (M),
 O_i - merena vrednost erozije (M),
 P - faktor protiverozionih mera,
 P_i - erozija dobijena modelom (M),
 q - jedinični protok (L^2T^{-1}),
 q - lateralni dotok po jedinici dužine kanala ($L^2T^{-1} L^{-1}$),
 q - lateralni dotok po jedinici širine ($L^2T^{-1} L^{-1}$),
 Q - oticaj po jedinici širine (L^2T^{-1}),
 q - površinski oticaj (L^2T^{-1}),
 Q - protok (L^3T^{-1}),
 Q - zapremina oticaja (L^2L^{-1}),
 q_c - lateralni dotok po jedinici dužine kanala ($L^2T^{-1} L^{-1}$),
 q_p - vršni oticaj (L^3T^{-1}),
 q_s - intenzitet lateralnog dotoka sedimenata u kanale ($L^2T^{-1} L^{-1}$),

R – faktor erozije snage ($M L L^{-2} L^{-1} T^{-1}$),
 R – hidraulički radijus (L),
 R_j – rang podatka u grupi,
 S – faktor nagiba,
 S – gubitak zemljišta (M),
 S – nagib (%),
 S – nagib,
 s – ugao nagiba padine,
 S_e – erozija od suspenzije sa dna,
 S_d – erozija od suspenzije na dno,
 S_r – erozija kišom,
 S_0 – nagib dna,
 S_f – faktor nagiba,
 S_f – nagib linije energije,
 t – vreme (T),
 u – brzina vode (LT^{-1}),
 u – indeks koji označava uzvodni elemenat sliva,
 U – proširena merna nesigurnost (LT^{-1}),
 u_A – standardna nesigurnost rezultata merenja,
 u_{Axs} – standardna nesigurnost srednje vrednosti rezultata merenja,
 V – merena zapremina (L^3),
 W – širina elementa (L),
 w_f – brzina tonjenja čestice nanosa (LT^{-1}),
 x – rastojanje duž toka (L),
 x – rastojanje u pravcu nagiba (L),
 x_i – rezultat merenja,
 x_i – težina vode koja se sakupi u kontrolnoj posudi na slivnoj površini,
 x_s – srednja vrednost rezultata merenja,
 \bar{x} – srednja vrednost težina vode koje se sakupe u kontrolnim posudama,
 Y – dubina vode (L),
 α – parametar zavisano od načina obračuna otpora trenja,

γ_s - specifična težina čestica u suspenziji (FL^{-3}),
 Δ - relativna gustina nanosa (-)
 Δt - vremenski priraštaj (T),
 Δx - prostorni priraštaj (L),
 θ - ugao koji slivna površina zauzima u odnosu na horizontalu,
 θ_w - težinski parametar,
 ψ - težinski parametar,
 λ - dužina slivne površine (L),
 λ - koeficijent trenja (-)
 Φ_f - faktor ublaženja erozije biljnim pokrivačem,
 Ω - jedinična snaga toka (LT^{-1}),
 Ω_c - granična jedinična snaga toka za male dubine tečenja (LT^{-1}).

Poglavlje 1

1. Uvod

Razvojem industrije javljaju se negativni efekti od hemijskih, bioloških, fizičkih i drugih zagađivača životne sredine odnosno njenih osnovnih činilaca: zemljišta, vode i vazduha [1]. Najveća opasnost preti teško obnovljivim resursima kao što je zemljište. Nastajanje zemljinog pokrivača odvija se u periodu koji traje milionima godina. Za formiranje sloja zemljišta debljine 1 cm potrebno je između 100 i 400 godina, tj. za stvaranje zemljišta debljine 30 cm, pogodnog za poljoprivrednu proizvodnju, potrebno je između 3000 i 12000 godina. Kada se uništi, ono je praktično neobnovljivo.

Prema podacima Organizacije ujedinjenih nacija, površina obradivog zemljišta u svetu iznosi oko 93.2 miliona hektara i mogla bi da se poveća na 140 miliona hektara. Zemlje kao što su Rusija, Kanada, Argentina i Brazil imaju velike mogućnosti povećanja obradivih površina, za razliku od Indije, Japana, Nemačke i Holandije koje takve mogućnosti nemaju.

Paralelno sa nastajanjem zemljišta odvijaju se i složeni dinamički procesi kojima se zemljište odvaja od svoje osnovne mase, transportuje i taloži na nizvodnim delovima padina (erozija) ili u rekama (sedimentacija). Problem erozije najčešće se vezuje za poljoprivrednu proizvodnju u tropskim i poluaridnim delovima sveta, odnosno za dugoročne posledice koje za sobom ostavlja. Ona međutim ima veći značaj jer se javlja i na zemljištima pokrivenim šumama kao i na zemljištima namenjenim za transport i rekreaciju.

Kao produkt erozionih procesa u slivu javlja se erozioni nanos koji sa padine dospeva u rečnu mrežu i bistre vodotoke pretvara u mutne tokove pune blata, kamenja i peska. Erozijom se odnosi površinski pokrivač bogat hranljivim sastojcima i smanjuje poljoprivredna proizvodnja na tim površinama. Sa stanovišta navodnjavanja i odvodnjavanja, erozija i sedimentacija utiču na smanjenje propusne moći kanala, smanjenje zapremine akumulacija i pogoršanje kvaliteta vode za navodnjavanje usled zamućenosti. Bez obzira da li se radi o procesima vodne ili eolske erozije, oni, udruženi sa poplavama uništavaju ne samo zemljišni fond, već izazivaju i velike poremećaje u raspoloživim zalihama vode neophodnih

za život čoveka i njegovu privredu. Istovremeno drastično smanjivanje zemljišnog fonda i zaliha korisnih voda ugrožava i ljudsku budućnost na zemlji.

Nasuprot tome, postojanje erozije na uzvodnim delovima sliva može dovesti do razvoja poljoprivredne proizvodnje na nizvodnim delovima sliva usled taloženja hranljivih sastojaka. Primer za ovo su sistemi za navodnjavanje u slivu reke Nil u Egiptu kao i sistemi za navodnjavanje u oblastima Juba i Shabelle u Somaliji.

U Srbiji, obradive površine zauzimaju 45% ukupne površine što je malo u odnosu na druge zemlje kod kojih je učešće veće (Bugarska 43%, Rumunija 50%, Poljska 63%, Mađarska 70%). I pored toga svake godine se smanjuju površine koje se obrađuju. Osnovni razlog za to je:

- intenzivni razvoj erozije na obradivim površinama u brdsko-planinskim predelima zemlje,
- izdvajanje obradivih površina za potrebe stambene i industrijske gradnje,
- zagađenje obradivih površina plavljenjem industrijskim otpadnim vodama,
- migracija stanovništva iz sela u gradove.

Od svih uzroka, najveći problem predstavlja vodna erozija zemljišta. Sva zemljišta sa nagibom iznad 1° su izložena eroziji različitog intenziteta [1].

1.1. Predmet i cilj istraživanja

Proces erozije tla na slivu počinje u trenutku kada kišne kapi svojom udarnom energijom razdvoje čestice tla stvarajući na površini terena male kratere koji se ruše pod dejstvom površinskog oticaja. Erođovani materijal se dalje transportuje do otvorenog toka ili se taloži na slivu. Pored padavina, erozija tla sa sliva, kao i sam površinski oticaj, zavise od kompleksne veze između topografije terena, geološkog/pedološkog sastava tla, klime, vegetacije, načina upotrebe zemljišta (pašnjaci, šume, oranice...) i ljudskih aktivnosti na slivu.

Predmet istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji je eksperimentalno izučavanje erozije tla na slivu (produkcije nanosa sa sliva), prouzrokovane padavinama i površinskim oticajem sa peskovitog zemljišta pod nagibom. Veličine koje utiču na proces erozije, a koji su istražene u ovom radu su: tip zemljišta, nagib terena, dužina slivne površine i intenzitet kiše.

Cilj istraživanja je da se variranjem pojedinih faktora koji utiču na eroziju unaprede postojeći modeli, kako empirijski tako i numerički, za proračun količina erodovanog materijala. Osim toga, jedan deo istraživanja daje odgovore na pitanja vezana za simulaciju prirodne kiše. Korelacionom analizom je ustanovljena zavisnost između količine erozije i činilaca koji utiču na njeno stvaranje. S obzirom da se u radu variraju tri veličine (nagib slivne površine, intenzitet padavina i dužina slivne površine), korelacionom analizom utvrđene su veze između ovih parametara. Osim korelacije u radu su analizirani i matematički modeli oticaja zasnovani na fizičkim procesima kojima se opisuju veze između padavina, oticaja i erozije. Pomoću merenih rezultata je izvršena kalibracija i verifikacija postojećeg modela oticaja i erozije (KINEROS2). Po uzoru na isti model, napisan je novi koji obuhvata samo veličine koje su varirane prilikom laboratorijskih opita i u kome su naknadno izvršene korekcije u proračunu određenih veličina.

Očigledno je da problem erozije tla sa sliva usled padavina i površinskog oticaja obuhvata veoma široku lepezu aspekata koji se ne mogu obuhvatiti jednim radom. Iz tog razloga rad je fokusiran samo na pojedine aspekte ovog problema. Konkretno, uz pomoć fizičkog modela sliva, ispitana je veza padavina, oticaja i erozije sa sliva na zasićenom zemljištu bez vegetacije sa promenljivim nagibom terena.

1.2. Struktura teze

U poglavlju 2, izvršen je pregled dosadašnjih znanja i dostignuća iz oblasti vodne erozije. Prikazani su mehanizmi nastanka osnovnih tipova erozije, laboratorijske instalacije i simulatori kiše korišćeni za sprovođenje istraživanja. Analizirana je literatura sa radovima iz oblasti erozije, a rezultati tih ispitivanja na različitim tipovima zemljišta, različitim dužinama instalacija, različitim nagibima instalacije i pri različitim intenzitetima kiše su međusobno upoređeni. Hronološki je prikazan razvoj jednačina za procenu erozije sa sliva.

U poglavlju 3 opisana je eksperimentalna instalacija i postupci sprovedeni tokom izvođenja opita. Prikazana je konstrukcija i kalibracija simulatora kiše, odabir

intenziteta kiše, dužine slivnih površina i tipa zemljišta za izvođenje opita. Takođe, data je metodologija analize dobijenih rezultata.

U poglavlju 4 prikazani su dobijeni rezultati na osnovu izvršenih 75 opita seta za statističku obradu podataka i rezultati 10 opita za kalibraciju i verifikaciju modela oticaja. Grafički su predstavljene maksimalne i minimalne vrednosti erozije za svaku kombinaciju intenziteta kiše, nagiba i dužine slivne površine. Pored ovih, na istim grafikonima, prikazane su i vrednosti medijane, percentila od 25% i 75%. Na osnovu ovih rezultata prikazana je i analiza merne nesigurnosti postupka merenja. Rezultati setova za kalibraciju i verifikaciju modela oticaja dati su u vidu hidrograma i psamograma.

U poglavlju 5, analizirani su rezultati seta za statističku obradu podataka. Regresionom analizom utvrđene su veze između intenziteta kiše, nagiba, dužine slivne površine i erozije. Uticaj dužine slivne površine na eroziju analiziran je i primenom Kruskal-Wallis-ovog testa. Rezultati ovog seta merenja, u poglavlju 6, su reprodukovani matematičkim modelom KINEROS2.

U poglavlju 7, izvršena je analiza jednačina koje opisuju jednodimenzionalno tečenje vode sa naglaskom na način obračuna otpora trenja. Izvršena je kalibracija i verifikacija modela napisanog po ugledu na KINEROS2. U poglavlju su analizirani i izrazi kojima se opisuje pokretanje i pronos nanosa čija je upotreba takođe analizirana novonapisanim modelom.

Upoređenje dobijenih rezultata merenja u ovom radu sa do sada objavljenim radovima iz ove oblasti su diskutovana u poglavlju 8. U istom poglavlju prikazani su zaključci dobijeni na osnovu istraživanja i date preporuke za dalja istraživanja.

Poglavlje 2

2. Pregled literature

2.1. Osnovni elementi procesa

2.1.1. Oticaj

Proces transformacije padavine u oticaj predstavlja deo ciklusa kruženja vode u prirodi i jedan od glavnih predmeta izučavanja u Hidrologiji [2]. Istraživanja na laboratorijskim slivovima sa jedne strane i razvoj primenjene matematike i računarske tehnike sa druge, uticali su na razvoj metoda matematskog modeliranja. Zbog velikog broja činilaca koji utiču na proces oticaja, njihove međuzavisnosti i promenljivosti po prostoru i vremenu, još uvek nije razvijen model koji bi zadovoljio u svim uslovima i svim potrebama.

U ovom radu, podaci o oticajima su dobijeni sa laboratorijske instalacije. Prednosti podataka koji se dobijaju sa ovakvih instalacija su mogućnost ponavljanja opita pod jednakim uslovima, brzo prikupljanje podataka za širi opseg karakteristika sliva kao i mogućnost izučavanja svakog od činioaca procesa oticaja zasebno. Sa druge strane, postoje ograničenja u pogledu mogućnosti produkcije kišnih epizoda sličnih prirodnoj kiši, komplikovano obezbeđenje jednakih uslova na slivovima sa propusnom površinom kao i nemogućnost uspostavljanja uslova sličnosti laboratorijskih sa prirodnim slivovima [2]

Iako se hidrogram oticaja sa prirodnih slivova sastoji iz dve komponente, baznog i direktnog hidrograma, najveći broj autora se, u laboratorijskim uslovima, bavio problemima površinskog tečenja. Razlog za to leži u činjenici da je u laboratorijskim uslovima teško modelirati oticaj sa propusnih površina a da se pri tome ostvari potpuna prednost ovih modela, reproduktivnost [2]. Takođe, glavni deo hidrograma oticaja koji nastaje kao posledica padavina čini direktan oticaj, pa je sa hidrološke tačke gledanja najvažnije što tačnije modelirati ovu komponentu oticaja.

Pregledom dostupne literature iz oblasti eksperimentalnog izučavanja oticaja ustanovljeno je da osim karakteristika kiše, na formu hidrograma oticaja sa laboratorijskih instalacija najviše utiču veličina sliva, oblik sliva, nagib sliva, vrsta podloge i stanje vlažnosti zemljišta pre početka kiše.

Analizom uticaja intenziteta kiše na hidrogram oticaja sa laboratorijskih instalacija doveli su, između ostalih, do sledećih zaključaka [3]:

- oblik grane porasta hidrograma zavisi od intenziteta kiše,
- oblici opadajućih grana, neposredno nakon prestanka kiše, zavise od prethodno primenjenog intenziteta kiše, odnosno od vrednosti maksimalno dostignutog protoka,
- iste količine pale kiše mogu dati drastične razlike u formi hidrograma oticaja.

Uticaj veličine sliva na formu i glavne karakteristike hidrograma direktno zavise od površine sliva. Poređenje uticaja veličine sliva sa ostalim faktorima koje utiču na oticaj (nagib, hrapavost, vlažnost) pokazalo je da površina sliva predstavlja dominantni faktor sa gledišta količine oticaja [3].

Izučavanja uticaja nagiba na eksperimentalnim slivovima su dovela do sledećih zaključaka:

- eksperimentalni sistemi su u stanju da reprodukuju uticaj nagiba na hidrogram oticaja,
- vremena potrebna za dostizanje maksimalnog protoka su u funkciji nagiba slivne površine,
- vreme dostizanja stacionarnog stanja oticaja za blaže nagibe povećava se u odnosu na vremena za veće nagibe,
- za isti intenzitet i trajanje kiše, manji nagibi daju manje maksimalne protoke,
- za blaži nagib, duže je vreme ocedivanja sliva i blaže su opadajuće grane hidrograma.

Uticaj hrapavosti i prethodne vlažnosti podloge na hidrogram oticaja pokazuju razlike po pitanju vremenskih karakteristika hidrograma.

Oticaj vode od kiše se javlja kao neravnomerno i neustaljeno tečenje koje se matematički može opisati sa dve parcijalne diferencijalne jednačine hiperboličkog tipa, poznatije kao Saint-Venant-ove jednačine [4]. Ove jednačine se mogu izraziti u različitim oblicima, pri čemu se, u zavisnosti od problema koji se rešava, zanemaruju ili uprošćavaju određeni članovi. Za rešavanje problema površinskog

Pregled literature

tečenja najpopularnija simplifikacija koja odgovara uslovima na laboratorijskim instalacijama je metoda kinematskog talasa.

Za problem površinskog tečenja, jednačina kontinuiteta se može napisati:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i - f = i_e \quad (2.1)$$

gde je:

Y – dubina vode (m),

t – vreme (s),

q – jedinični protok (m²/s),

x – rastojanje duž toka (m),

i – intenzitet bruto kiše (m/s),

f – intenzitet infiltracije (m/s),

i_e – efektivna kiša (m/s).

Protok po jedinici širine, q, je:

$$q = aY^m \quad (2.2)$$

gde je:

m=5/3, a= $\sqrt{i_0}/n$ – za formulu Manninga,

m=3/2, a= $(\frac{8gi_0}{f})^{0.5}$ – za formulu Darcy-Weisbach-a i

m=3/2, a= $C\sqrt{i_0}$ – za formulu Chezy-ja

i₀ – pad dna (-),

n – Manningov koeficijent hrapavosti (m^{-1/3}s)

f – koeficijent trenja (-) i

C – Chezy-jev koeficijent (m^{-1/2}/s)

Gore navedeni koeficijenti važe za čistu vodu. Na bazi laboratorijskih ispitivanja, Holy, Vaška i Vrana [4] su ustanovili da m zavisi samo od tipa zemljišta, dok su parametar a doveli u vezu sa tipom zemljišta i njegovim padom i₀:

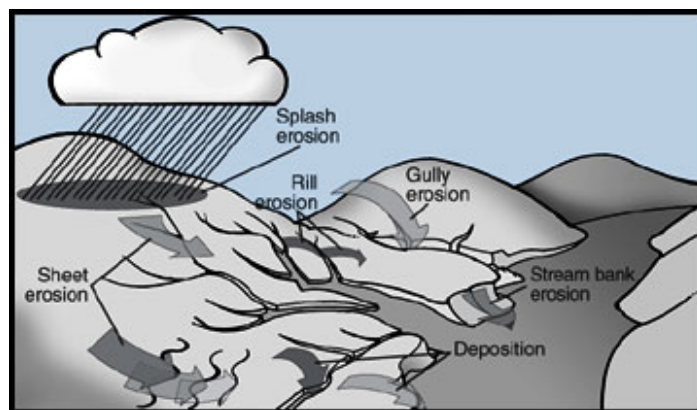
- glina: m=1.59, a= $47.5i_0^{0.561}$,
- ilovača: m=1.74, a= $29.5i_0^{0.552}$
- pesak: m=1.86, a= $25.4i_0^{0.491}$

2.1.2. Tipovi erozije

Izučavanjem procesa erozije počeli su da se bave inženjeri agrotehnike početkom XX veka u SAD [5]. Ispitivanja na prirodnim i manjim eksperimentalnim slivovima počela su oko 1930. godine, a analiza tih rezultata 1940. godine. Prva formula koja je našla primenu u praksi je USLE (Universal Soil Loss Equation), koja je razvijena između 1950. i 1960. godine a koja se i danas, uz izvesne modifikacije, koristi u čitavom svetu a naročito u SAD.

Erozija predstavlja dvofazan proces koji se sastoji od odvajanja čestica zemlje iz osnovne mase i njihovog transporta energijom vode ili vetra [6]. Najznačajniju ulogu u procesu erozije imaju kišne kapi koje svojim udarom o površinu tla razbacuju čestice zemlje na rastojanja i od po nekoliko desetina centimetara. Dalje, tečenjem vode po terenu ove čestice se transportuju nizvodno. Gubitkom transportne moći površinskog toka dolazi do pojave i treće faze – deponovanja.

Na osnovu do sada sprovedenih istraživanja, po načinu pojave, erozija se deli na: eroziju kišom (raindrop splash), površinsku eroziju (sheet, interrill, overland flow erosion) i brazdastu eroziju (rill i gully erosion) [7]. Pojava i veličina svakog od ovih procesa zavisi od klimatskih, topografskih, hidroloških i vegetacionih karakteristika kao i od samog tipa zemljišta.



Slika 2.1. Tipovi erozije

Erozija kišom - Kiša predstavlja glavnu pokretačku snagu procesa koji izaziva eroziju. Prosečna veličina kišne kapi se kreće od 1-3 mm i ima tendenciju povećanja srazmerno intenzitetu kiše [8]. U tabeli 2.1. je data zavisnost između

intenziteta kiše i prosečne veličine kišne kapi. Brzine padanja su prikazane u tabeli 2.2. i kreću se od veoma malih do preko 9 m/s u zavisnosti od veličine kišne kapi.

Tabela 2.1. Zavisnost intenziteta kiše i veličine kišne kapi [8]

| | Intenzitet kiše (mm/h) | Srednji prečnik kapi (mm) | Težina kapi (g) |
|----|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| 1 | 2.50 | 1.47 | 1.66 |
| 2 | 12.7 | 2.12 | 4.99 |
| 3 | 25.4 | 2.50 | 8.18 |
| 4 | 50.8 | 2.92 | 13.04 |
| 5 | 76.2 | 3.22 | 17.48 |
| 6 | 101.6 | 3.47 | 21.88 |
| 7 | 127.0 | 3.62 | 24.84 |
| 8 | 154.2 | 3.80 | 28.73 |
| 9 | 177.8 | 3.92 | 31.54 |
| 10 | 203.2 | 4.07 | 35.30 |
| 11 | 228.5 | 4.15 | 37.42 |
| 12 | 254.0 | 4.25 | 40.19 |

Tabela 2.2. Brzina padanja kišne kapi [9]

| | Prečnik kapi (mm) | Visina padanja kapi (m) | Brzina padanja (m/s) |
|---|------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 1 | 2.2 | 4.03 |
| 2 | 2 | 5.0 | 6.49 |
| 3 | 3 | 7.2 | 8.06 |
| 4 | 4 | 7.8 | 8.83 |
| 5 | 5 | 7.6 | 9.09 |
| 6 | 6 | 7.2 | 9.18 |

Raspoloživa energija za eroziju javlja se u vidu potencijalne i kinetičke energije. Potencijalna energija potiče od visinske razlike između zemljišta i kišne kapi. Ona je produkt mase, visinske razlike i gravitacionog ubrzanja .

$$PE = mhg \quad (2.3)$$

gde je:

PE – potencijalna energija (Nm)

m – masa kišne kapi (kg),

h – visina padanja kišne kapi (m) i

g – gravitaciono ubrzanje (m/s^2).

Potencijalna energija za eroziju se konvertuje u kinetičku energiju, energiju usled kretanja. Kinetička energija kiše je u funkciji dve fundamentalne karakteristike kiše: veličine kapi (mase) i brzine padanja (terminal velocity). Brzine kišnih kapi kreću se u granicama od 4 m/s do 9 m/s za veličinu kapi od 1 mm do 9 mm. Brzine kretanja vode nakon udara o tlo u lateralnom pravcu su skoro duplo veće [6]. Kinetička energija kiše se računa preko sledećeg obrasca:

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.4)$$

gde je:

KE – kinetička energija (Nm),

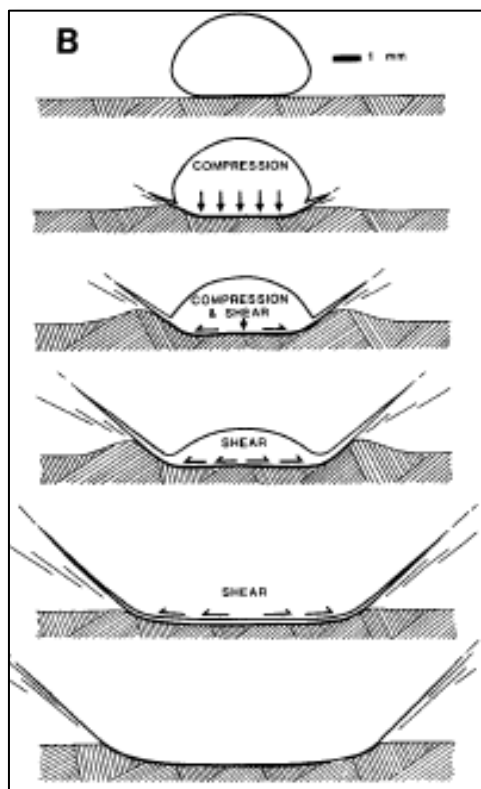
m – masa kišne kapi (kg) i

v – brzina padanja kišne kapi (m/s).

Najveći deo ove energije se potroši na trenje sa površinom po kojoj se voda kreće tako da se svega 3-4% energije tečenja vode i 0.2% energije udara kišnih kapi potroši na eroziju.

Koristeći se foto aparatom velike brzine, Al-Durah i Bradford su analizirali snimke udara kišne kapi veličine 4.6 mm na šest tipova zemljišta na osnovu kojih je definisan ovaj proces [10]. Rezultati pokazuju da je ugao pod kojim se kišna kap razbija u visokoj korelaciji sa tangencijalnim naponima zemljišta. Uglovi iznose od 11 stepeni za napone od 20 kPa do 40 stepeni za napone od 1 kPa. Ustanovljeno je i da se brzina razbijanja kišne kapi povećava povećanjem tangencijalnog napona. U zemljištima sa visokim naponom krateri su veći po površini ali su male dubine i manje zapremine u odnosu na zemljišta sa manjim naponom. U trenutku udara, pritisak i raspored napona su simetrični u odnosu na centar udara. Proračunom je utvrđeno da se maksimalna sila javlja 6-10 μs nakon udara. Nakon udara, zemljište ne može da primi kišu u sebe velikom brzinom te dolazi do vertikalnog nabijanja zemljišta. Usled ovoga se oko centra udara stvara ispupčenje. Oblik i veličina

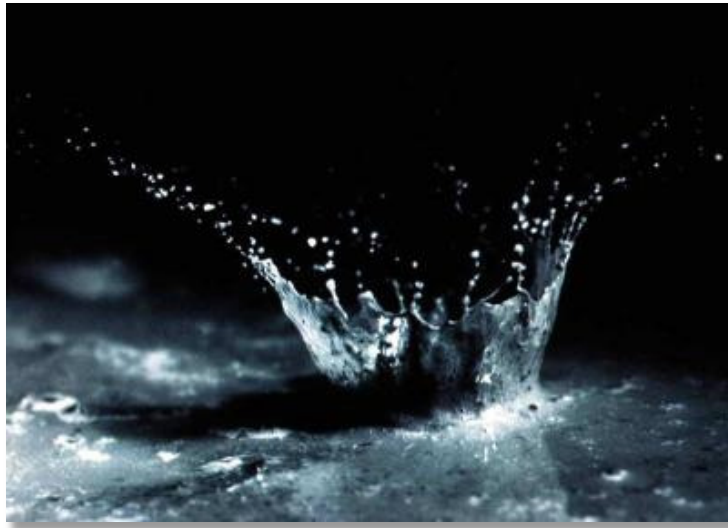
ispupčenja zavise od površinskog napona zemljišta. Vertikalni pritisak usled udara ima dvojaku ulogu. Prvo, on vrši sabijanje zemljišta; drugo, stvara razarajuću silu transformacijom u bočne napone usled lateralnog kretanja vode. Ova brzina je veća nego brzina kiše. U tom trenutku se javlja erozija usled lateralnog kretanja vode koje deluju po dnu ispupčenja.



Slika 2.2. Transformacija vertikalne sile pritiska u bočne napone [10]

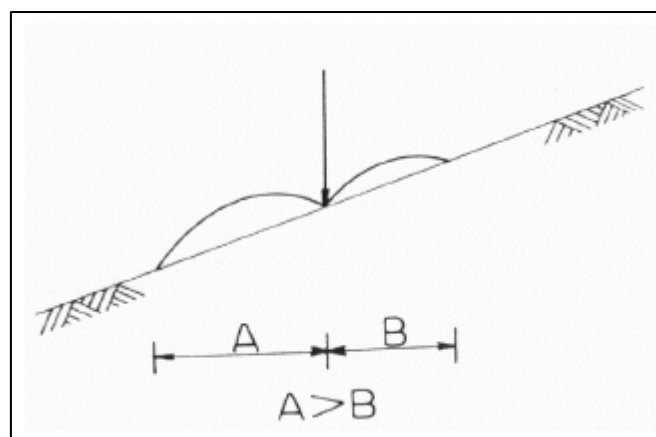
Čestice zemljišta, zajedno sa kapljicama vode, odskaču u vazduh u vidu krunaste strukture a zatim se talože na tlo popunjavajući praznine između krupnijeg agregata (Slika 2.3). One mogu da odskoče i do 60 cm u vis i 1.5 m u stranu. Na taj način se formira jedan slabo-propustan površinski sloj koji utiče na smanjenje infiltracije i povećanje površinskog oticaja.

Udar kišnih kapi značajno utiče na eroziju ukoliko su nagibi slivnih površina manji od 35-40% [11]. Pri nagibima većim od 40% uticaj udara kišnih kapi se gotovo i ne oseća jer ne postoji direktan udar kapi o tlo.



Slika 2.3. Udar kišne kapi o tlo (http://irrinet.net/?attachment_id=110)

Na horizontalnom terenu čestice zemljišta odvojene od osnovne mase, usled udara kišne kapi, se uniformno rasporede u svim pravcima oko tačke udara te transporta nanosa nema [9]. Sa druge strane, na kosim površinama, kišna kap udara u donju stranu kosine sa veće udaljenosti nego na gornju stranu kosine pa se na ovaj način čestice zemljišta pomeraju niz kosinu bez prisustva površinskog tečenja vode (slika 2.4). Čestice zemljišta odvojene od osnovne mase popunjavaju sitne pore zemljišta čime se umanjuje infiltracija i povećava površinski oticaj što može dovesti do povećanja erozije.



Slika 2.4 Transport nanosa pod uticajem kišne kapi [8]

Površinska erozija - Udar kišne kapi ima dominantnu ulogu u procesu narušavanja strukture čestica tla kada se erozija odvija tečenjem vode po površini sliva. Čestice tla odvojene od osnovne mase se razlete po površini vode koja teče po slivu i transportuju se niz padinu.

Površinski oticaj se javlja kao posledica duge kiše, kada dođe do saturacije površinskog sloja zemljišta ili u slučajevima kada je intenzitet kiše veći od intenziteta infiltracije [6]. Iako se iz naziva može zaključiti da se radi o sloju vode određene dubine koji teče po terenu, ovaj tip oticaja se u stvari javlja kao niz isprepletanih, veoma plitkih vodenih tokova bez jasno definisanih granica. Ovaj oticaj transportuje čestice zemljišta odvojene od osnovne mase udarom kišne kapi do privilegovanih tokova nizvodno niz padinu.

Izučavanjem odvajanja čestica koherentnih materijala pod uticajem plitkih turbulentnih tokova zaključeno je da su naponi u zemljištu oko 1000 puta veći od onih koji se javljaju na kontaktu vode i zemljišta [12]. Naponi potrebni za pokretanje čestica nekoherentnog materijala su daleko manji od napona potrebnog za odvajanje koherentnog materijala.

Generalno, da bi došlo do erozije vezanog materijala neophodno je zajedničko delovanje kiše i površinskog oticaja [8]. Ulaskom erodovanih čestica u površinski tok dolazi do njihovog transporta ili stvaranja nepropusnog površinskog sloja deponovanjem sitnijih čestica. Ove deponovane čestice mogu opet da se pokrenu istim postupkom.

Brazdasta erozija - Koncentracijom površinskog toka na deonicama pod nagibom većim od 20% i dužim od 5-10 metara dolazi do formiranja tzv. brazdi u kojima se oticaj kanališe [13]. Promena površinskog oticaja u oticaj u brazdama vrši se u četiri faze: nekoncentrisani površinski oticaj, površinski oticaj sa koncentrisanim putanjama, mikro kanali bez čeonih talasa i mikro kanali sa čeonim talasima [14]. Sveukupna promena uslova tečenja kroz sve četiri faze se odvija pri Froude-ovom broju od 0.8-1.2.

Na glatkim površinama, gde sav tangencijalni napon primaju čestice zemljišta, koncentracija nanosa u toku se povećava značajno kada brzine u brazdama variraju od 3.0-3.5 cm/s. Pri ovim brzinama dolazi do erozije svih frakcija

zemljišta, nezavisno od njihove dimenzije. Vrednost od 3.5 cm/s je usvojena za kritičnu brzinu tečenja za nevezana zemljišta.

2.2. Eksperimentalna istraživanja

2.2.1. Simulatori kiše

Simulatori kiše su uređaji kojima se voda, u formi sličnoj prirodnoj kiši, nanosi na zemljište. Osim za istraživanje erozije mogu se koristiti i za druge hidrološke opite. Veoma je važno da se karakteristike kiše pravilno simuliraju a dobijeni rezultati pažljivo analiziraju kako se ne bi izvukli pogrešni zaključci iz dobijenih rezultata.

Osnovne prednosti simulatora kiše su: brzina, efikasnost, kontrola i adaptacija prema predviđenim ispitivanjima. Do rezultata oticaja ili erozije sa gole ili površine pod nekom kulturom moguće je doći veoma brzo. Kiše je moguće ponavljati što u mnogome skraćuje vreme čekanja na dve iste prirodne kiše. Priprema površine za simulaciju kiše je mnogo jednostavnija nego održavanje površine za prirodnu kišu.

Sem navedenih prednosti simulatori kiše imaju i svoje nedostatke. Vreme i novac potrebni za izradu simulatora kiše sa pratećom opremom i ljudstvom koje ga opslužuje su najveća prepreka u korišćenju simulatora. Bez obzira na kvalitet simulatora oni nikada nisu u mogućnosti da simuliraju kišu koja je identična prirodnoj. Osim toga, nemoguće je vršiti simulaciju kiše nad velikim površinama. Uz sve ovo rezultati merenja pomoću simulatora kiše sa malih slivnih površina teško se ekstrapoluju na prirodni sliv, a izloženost simulatora vetru dovodi do nejednake raspodele veštačke kiše po slivnoj površini.

Od dobrog simulatora kiše se zahteva da u što većoj meri reprodukuje sve fizičke karakteristike prirodne kiše [14]. Određena odstupanja su dozvoljena u cilju postizanja jednostavnije konstrukcije simulatora i smanjenja cene istog.

Osnovne fizičke karakteristike kiše koje dobar simulator kiše mora da reprodukuje su:

- veličina kišne kapi približna prirodnoj kiši – može da varira od veoma malih do veličine od 7 mm što predstavlja gornji limit veličine kapi. Veće kapi, koje bi nastale stapanjem više kapi, su nestabilne i raspadaju se stvarajući mnoštvo sitnijih kapljica. Srednji prečnik kišne kapi varira između 1 – 3 mm u zavisnosti od intenziteta kiše.

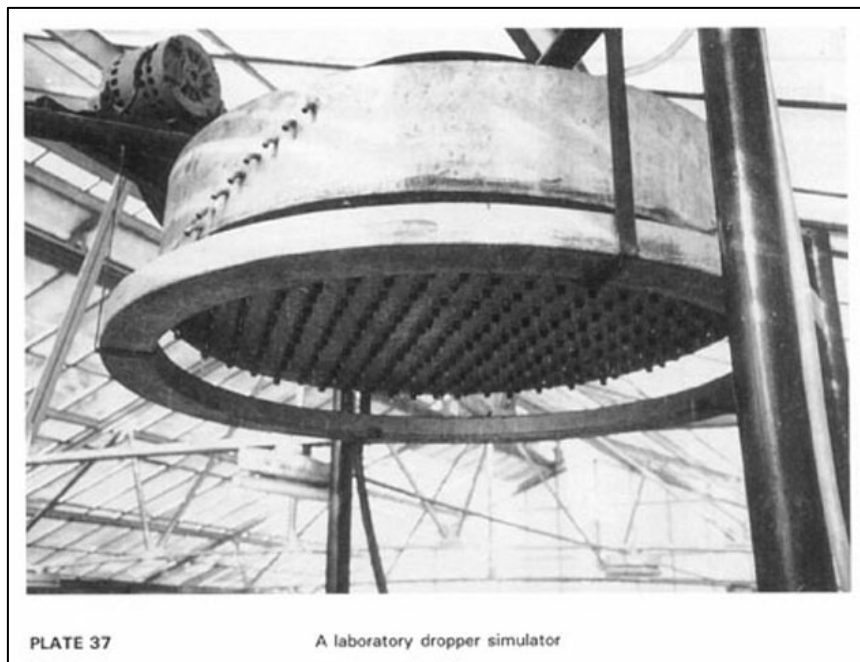
Pregled literature

- raspored veličine kapljica uniforman za jednu kišnu epizodu,
- raspored kiše po površini ravnomeran,
- brzina padanja kišne kapi približna prirodnoj kiši – dostiže maksimalnu vrednost u trenutku kada se sila gravitacionog ubrzanja izjednači sa otporom kapljice koja pada. Brzina zavisi od veličine kapi i dostiže maksimalnu vrednost od oko 9 m/s (tabela 2.2).
- variranje intenziteta kiše – može značajno da varira kod prirodne kiše, ali se prilikom simulacije uglavnom koristi kiša istog intenziteta tokom trajanja opita,
- ugao udara približno vertikaln za sve kapi.

U poslednjih 60 godina korišćene su različite tehnike i oprema za simulaciju kiše. Simulatori kiše, u zavisnosti od načina formiranja kapljica, dele se u dve grupe:

- sa slobodnim padom (non pressure droppers)
- mlaznice pod pritiskom (spray nozzles).

Mnogi jednostavni simulatori koriste princip formiranja kapljica kapanjem kroz cevčice priključene na dovod vode [14]. Kod ovakvih simulatora kap nema početnu brzinu a veličina kapljice je u funkciji veličine otvora cevčice. Kombinacijom različitih cevčica može da se dobije proizvoljna raspodela veličine kapljica po površini (slika 2.5).

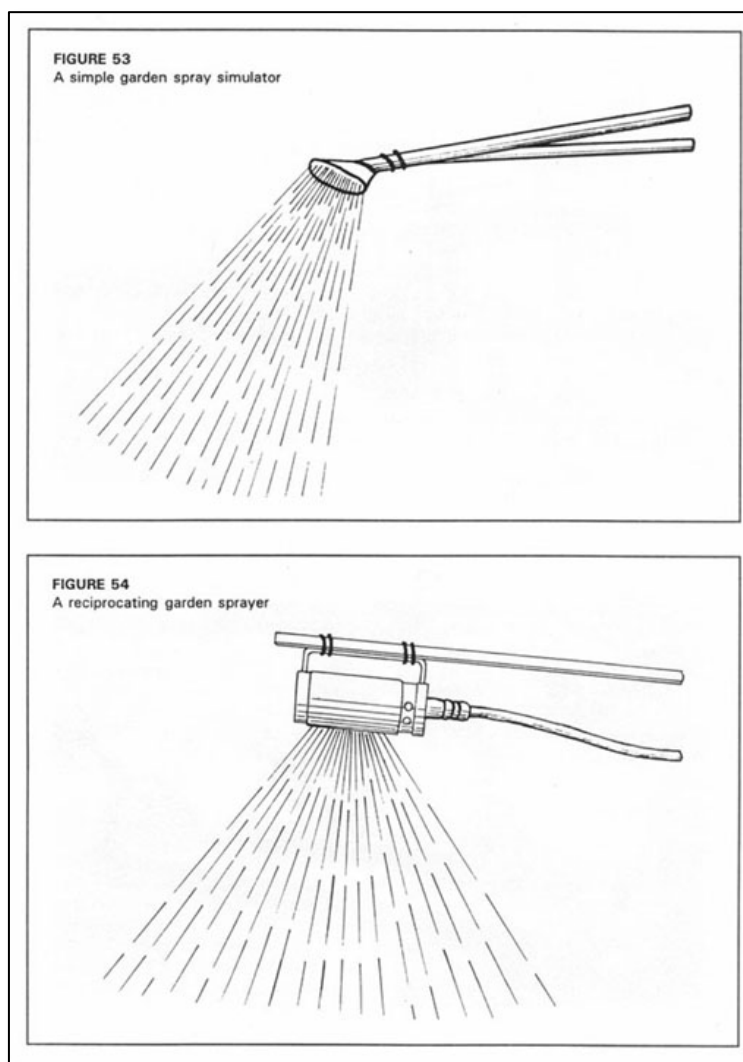


Slika 2.5. Simulator sa cevčicama [14]

Prednost ovog metoda jeste de su veličine kapljica i brzina padanja konstantne, a raspored kiše po površini ujednačen i postiže se sa veoma malim pritiskom vode.

Ukoliko se simulator ne postavi dovoljno visoko, kapljice će udarati o tlo brzinom manjom od brzine prirodne kiše a samim tim će i kinetička energija biti mala. Da bi se oformila kapljica veličine od 5 mm, potrebno je uređaj podići na visinu od 12 metara kako bi se dobila željena brzina padanja. Drugi nedostatak je što ovakav simulator može da pokrije veoma male površine.

Najjednostavniji način za dobijanje veštačke kiše koji se koristi za neke jednostavne opite je upotreba kantice za zalivanje (slika 2.6 a).



Slika 2.6. a) upotreba baštenske kantice b) upotreba baštenske prskalice [14]

Na ružama koje se koriste za kantice su fabrički izbušene rupe istog prečnika, ali se one mogu i prepraviti proširivanjem već postojećih otvora. Glavni problem kod ovih prskača je što, kao i prskači sa slobodnim formiranjem kapljica, traže postavljanje na veliku visinu kako bi se ostvarila udarna sila slična onoj od prirodne kiše.

Dovođenjem vode (do otvora na kom se formiraju kapljice) pod pritiskom gubi se potreba za postavljanjem simulatora na veliku visinu a dobija se udarna sila slična kao kod prirodne kiše.

Jedan jednostavan simulator koji koristi baštensku mlaznicu je dat na slici 2.6 b. Radi postizanja ujednačenog rasporeda kapljica potrebno je omogućiti oscilovanje

mlaznice koje se postiže uz pomoć male vodene turbine čije se rotaciono kretanje pretvara u lagano njihanje.

Navedeni simulatori se odlikuju svojom jednostavnošću ali njihova upotreba je vrlo ograničena zbog nedovoljno dobre simulacije kiše.

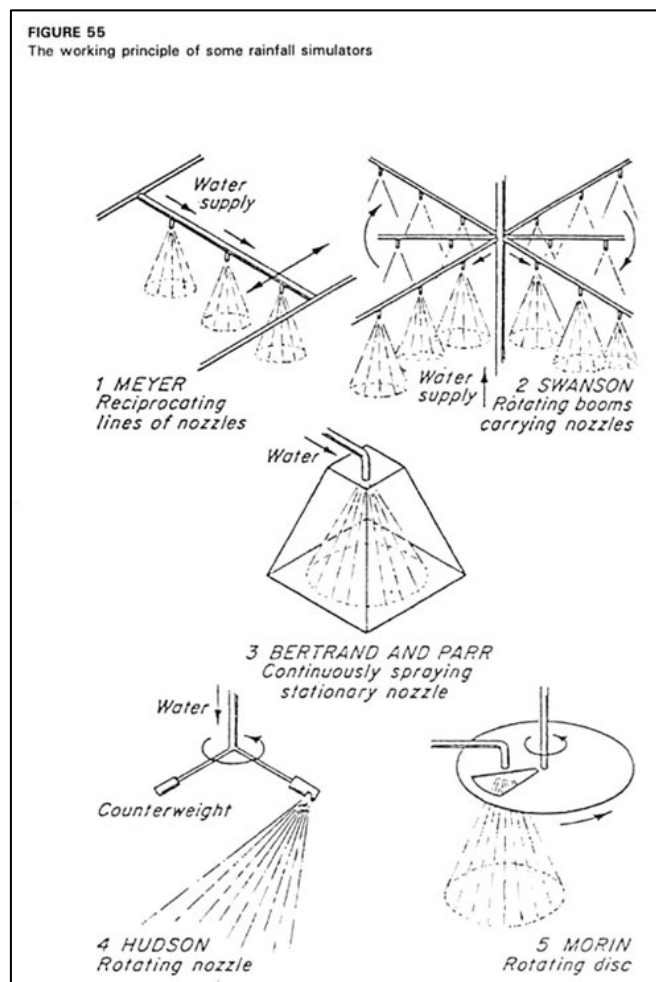
Na tržištu se može naći veliki broj različitih mlaznica. Ove mlaznice su uglavnom namenjene za upotrebu u poljoprivredi (navodnjavanje) ili industriji (farbanje, hlađenje, pranje...). Izbor mlaznice za simulator kiše predstavlja osnovni problem prilikom korišćenja simulatora. Ukoliko se želi postići veličina kapljice od 6 ili 7 mm, tada veličina otvora na mlaznici mora biti oko 3 mm u prečniku. Međutim takva mlaznica će i pri slabim pritiscima dati intenzitet kiše koji daleko premašuje intenzitet prirodne kiše [14]. Iz tog razloga je potrebno pronaći način na koji će se veštačka kiša prekidati kako bi se postigao intenzitet prirodne kiše.

Postoje različiti načini na koji se ovo može postići što je prikazano i na slici 2.7. Meyer [15] je postavio mlaznice na kolica koja su se kretala napred – nazad a dotok vode je prekidan solenoid ventilima. Simulator je koristio mlaznice američkog proizvođača Spraying System Company sa oznakom VeeJet 80100. Mlaznice su postavljene na visinu od 8 ft (2.44 m) od zemljišta i usmerene vertikalno na dole. Radni pritisak na mlaznicama je iznosio 0.4 bara, tako da je brzina pri udaru bila veoma bliska stvarnoj kiši. Maksimalni intenzitet kiše koji je ostvarivao ovaj simulator iznosio je 127 mm/h. Takav simulator se pokazao kao veoma dobar, međutim, s obzirom da je namenjen za opite na velikim površinama, bio je izuzetno težak za rukovođenje i skup.

Swanson [16] je mlaznice postavio na nosače koji su paralelni sa tlom i koji se okreću oko vertikalne ose. Simulator je bio jeftiniji u odnosu na Meyerov, bio je jednostavniji za korišćenje, rastavljanje, sastavljanje i transport. Koristio je iste mlaznice kao i Meyer-ov simulator.

Rešenje sa rotirajućim diskom koje su predložili Morin, Goldberg i Seginer [14] je bilo veoma popularno i kasnije razvijano u mnogim zemljama. Fiksirana mlaznica konstantno pušta mlaz ali je tlo ispod nje povremeno zaštićeno metalnim diskom koji se rotira oko horizontalne ose. Na disku je izrađen otvor kroz koji prođe mlaz kada je otvor ispod mlaznice. Na ovaj način omogućena je upotreba mlaznica velikih kapaciteta koje daju dobru veličina kapljica ali velike intenzitete kiše.

U novije vreme koriste se simulatori koji rade na principu Norton-ovog simulatora. Norton-ov simulator koristi iste mlaznice kao i Meyer-ov simulator, ali su one postavljene na horizontalnoj cevi ispod koje se nalazi kutija sa otvorom. Rotiranjem cevi oko svoje ose, mlaznica prelazi preko otvora pa se određivanjem broja prelaza preko otvora definiše intenzitet kiše.

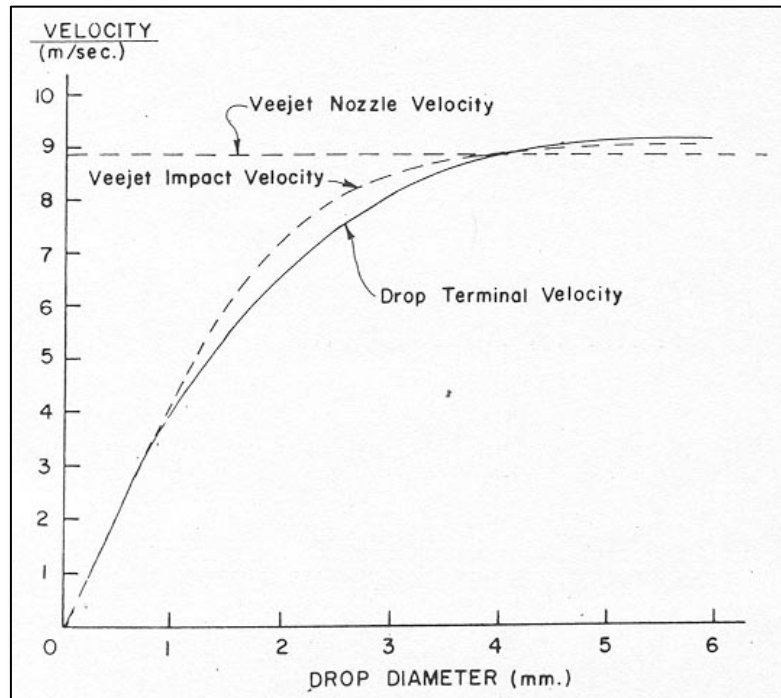


Slika 2.7. Simulatori sa mlaznicama pod pritiskom [14]

Prateći istorijski razvoj i probleme vezane za simulaciju kiše, L. Darrel Norton (USDA-ARS National Soil Research Laboratory) razvio je jedan moderan simulator kiše. Simulator je pogodan za upotrebu na otvorenom prostoru (pri brzinama vetra manjim od 8 km/h) kao i u laboratoriji. Izrađen je od lakih materijala, jednostavan je za sklapanje i transport.

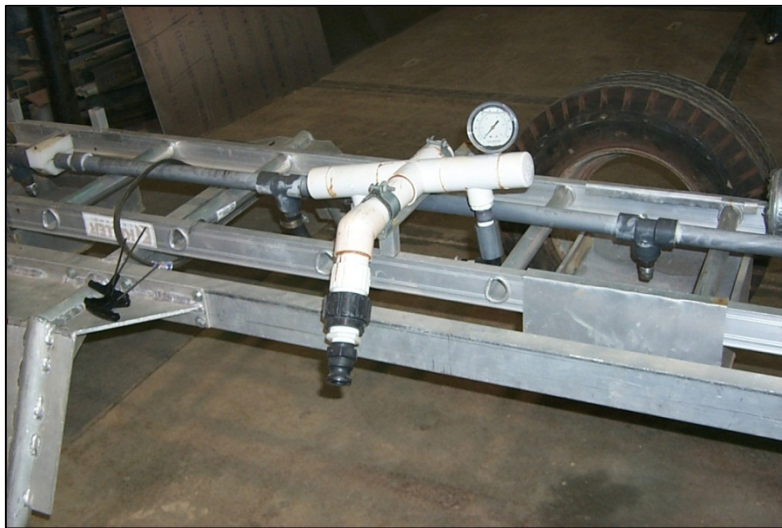
Ovaj simulator koristi mlaznice VeeJet 80100, iste koje su se koristile i na Meyer-ovom simulatoru. Mlaznice su postavljene na horizontalnu cev na međusobnom

rastojanju od 99 cm i na visinu od minimum 3 metra u odnosu na površinu terena. Naime, Meyer je dokazao da je rastojanje mlaznice od zemljišta od 3 metra, dovoljno da veće kapljice ubrzaju do konstante brzine odnosno da se manje kapljice uspore do konstantne brzine koja je bliska brzini prirodne kiše (slika 2.8). Pri pritisku na mlaznicama od 0.41 bar izlazna brzina iznosi 8.8 m/s.



Slika 2.8. Brzine prirodne i simulirane kiše [17]

Ispod svake mlaznice nalazi se kutija sa otvorom dimenzija 15 x 11 cm kako bi ograničavala domet mlaza tj. kako bi se mlazevi sa dve susedne mlaznice kontrolisano preklapali u cilju ravnomernog rasprostiranja kapi veštačke kiše. Cev na kojoj se nalaze mlaznice kontrolisanim obrtanjem oko svoje ose prelazi preko otvora i tako dolazi do natapanja zemljišta ispod simulatora. Cev može da se zadržava u krajnjim položajima i tada ne dolazi do natapanja zemljišta. U tom slučaju se sva voda zadržava u kutijama i pomoću oluka vraća do rezervoara.



Slika 2.9. Cev sa prskalicama [17]



Slika 2.10. Kutija i oluk [17]



Slika 2.11. Norton-ov simulator (rad na terenu) [17]



Slika 2.12. Norton-ov simulator (rad u laboratoriji) [17]

Za procenu uniformnosti simulirane kiše po površini Christiansen je uveo koeficijent u , koji se računa kao [18]:

$$u = 1 - \left(\frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{\sum x_i} \right) \quad (2.5)$$

gde je:

x_i – težina vode koja se sakupi u kontrolnoj posudi na slivnoj površini,

\bar{x} - srednja vrednost težina vode koje se sakupe u kontrolnim posudama.

Simulatori kiše sa vrednošću koeficijenta od 0.8 – 1.0, smatraju se pogodnim za izučavanje procesa erozije.

2.2.2. Eksperimentalne instalacije i slivovi

Analizom dostupne literature može se uočiti veliki broj različitih laboratorijskih i instalacija u prirodnom okruženju za proučavanje procesa erozije, međutim sve one se mogu svrstati u tri grupe: male eksperimentalne instalacije, instalacije za USLE model i prirodni slivovi.

Male instalacije, najčešće površine oko 1 m², služe za izučavanje erozije kišom kao i usled tečenja vode po terenu [19]. Ove instalacije se ne mogu upotrebiti za izučavanje tečenja vode u brazdama jer su dužine slivnih površina kratke za razvoj oticaja koji bi proizveo brazde. Instalacije su najčešće laboratorijske a eksperimenti se izvode pomoću simulatora kiše.

Osnovni cilj upotrebe malih instalacija jeste izučavanje osnovnih faza erozije, koje je teško uočiti na velikim slivovima, kao što su razbijanje površine zemljišta kišnom kapi, transport nanosa usled udara kišne kapi, stabilnost agregata...

Najveća prednost malih instalacija leži u njihovoj prilagodljivosti različitim opitima. Istraživač ima mogućnost kontrole svih parametara vezanih za proces erozije mnogo bolje nego li na velikim instalacijama. U najvećem broju slučajeva ovakvi eksperimenti služe za dobijanje osnovnog koncepta koji je neophodan za efikasan razvoj istraživanja.

Najveći nedostatak upotrebe malih instalacija je povezan sa nemogućnošću upotrebe dobijenih rezultata na prirodne slivove. Osim ovog nedostatka, u obzir se moraju uzeti i sledeće činjenice:

- površina sa koje se voda sliva ograničena je zidovima instalacije – posledica ovoga je usmeravanje oticaja ka izlaznom profilu instalacije što povećava koncentraciju oticaja uz zidove instalacije,
- male instalacije moraju imati dno za držanje zemljišta – kakvo dno će se upotrebiti zavisi od vrste istraživanja. Za istraživanja kojima je primarni cilj dobijanje količine nanosa tečenjem vode po tlu, perforirano dno sa nekom vrstom tkanine preko njega je najčešće rešenje. Na ovaj način se omogućava slobodno tečenje vode kroz uzorak zemljišta što se može okarakterisati kao slučaj dvoslojne porozne sredine gde je donji sloj znatno propusniji od gornjeg sloja,
- narušena struktura zemljišta u instalaciji – iako je zemljište na kom se izvode opiti uzeto sa prirodnog sliva, prilikom ugradnje zemljišta u instalaciju nemoguće je postići iste osobine koje je ono imalo na prirodnom slivu. Ovo se naročito odnosi na zbijenost zemljišta.

Konačno može se zaključiti da i pored svih svojih nedostataka male instalacije ipak mogu da daju kvalitetne informacije o odvajanju čestica zemljišta i ostalim faktorima koji se tiču površinske erozije. Vrlo teško je sprovesti bilo kakvu kritičku analizu o rezultatima koje daju male instalacije s obzirom da se one upotrebljavaju u različite svrhe. Kao što je već i rečeno, ovi rezultati služe za dobijanje osnovnog koncepta koji će poslužiti za dalji razvoj istraživanja.

Mali slivovi se najčešće koriste za razvoj sistema zaštite zemljišta ili za verifikaciju nekog koncepta modeliranja. Ovakvo istraživanje je opravdano činjenicom da postoji potreba za osnovnim podacima koji će istraživače uputiti u preciznost njihovih formulacija modela odnosno metoda zaštite zemljišta od erozije.

Sliv za kalibraciju USLE modela je dovoljno velik da posluži za istraživanje kako erozije usled tečenja vode po površini, tako i usled tečenja u brazdama [19]. Ove instalacije se koriste na prirodnim slivovima i poslužile su za razvoj empirijskog modela USLE o kome će biti reči u poglavlju 2.9.2. Ove instalacije su dovoljno široke da minimalizuju uticaj bočnih zidova i dovoljno dugačke za formiranje brazda. Naime, istraživanja su pokazala da je minimalna dužina potrebna za stvaranje brazda 5 metara dok je preporuka da se radi sa dužinama od 10 metara

[19]. Instalacije koje služe za kalibraciju USLE modela su dugačke 22.13 metara (72.6 ft).

Osnovni cilj USLE instalacija je bio razvoj modela za procenu erozije koja će poslužiti za planiranje zaštite zemljišta odnosno za upoređivanje količine erozije sa zaštićenih i nezaštićenih zemljišta.

Mali slivovi, dovoljno veliki da sadrže barem jedan prirodni izlazni profil predstavljaju treći tip površina za istraživanje erozije [19]. Ovi slivovi se sastoje od delova na kojima se javljaju svi tipovi erozije, različiti nagibi površina i različite obrade površina.

Najveća prednost prirodnih slivova je u tome što se na njemu javljaju svi erozioni procesi u jednom opitu. Međutim, na prirodnim odnosno velikim instalacijama je gotovo nemoguće izučavati pojedine procese erozije. Takođe, na prirodnim slivovima eksperimenti se teško ponavljaju pa ne postoji značajan uticaj na poboljšanje tačnosti rezultata opita.

2.2.3. Rezultati eksperimentalnih istraživanja

Analizirajući eroziju kombinacijom erozije kišom i površinskim oticajem Bryan [7] je izveo 154 eksperimenta koristeći 26 različitih tipova zemljišta iz regiona Alberta u Kanadi. Za simulaciju kiše korišćen je simulator sa mlaznicom postavljenom na 2.59 metara visine u odnosu na ispitivano zemljište i održavan je konstantan intenzitet kiše od 102 mm/h. Na suv uzorak zemljišta pod nagibom od 36% (20)^o je aplicirana kiša trajanja 30 minuta nakon čega je usledilo 60 minuta ocedivanja uzorka. Nakon toga je ponovo aplicirana kiša u trajanju od 30 minuta a nakon 15 minuta ocedivanja aplicirano je još 30 minuta kiše. Nakon svake kiše materijal koji je odnešen tečenjem po terenu ili usled erozije kišom je sakupljen, osušen i izmeren. Na osnovu ovih merenja dobijene su vrednosti ukupne erozije, koje se u zavisnosti od vrste tla kreću od 0.11-17.77 kg/m² sa prosečnom vrednošću od 3.09 kg/m². U zavisnosti od sadržaja čestica većih od 0.5 mm u uzorku zemljišta odnos između erozije kišom i erozije površinskim oticanjem iznosi 0.48-0.6.

Uticaj dva različita tipa simulatora (sa slobodnim formiranjem kapljica i pomoću mlaznice) na količinu erozije izučavan je na laboratorijskim instalacijama u

Torontu (Kanada) i Leuvenu (Belgija) [20]. Instalacija u Belgiji sastojala se od simulatora sa slobodnim formiranjem kapljica postavljenim na visinu od 7.2 m od zemljišta smeštenog u posudu veličine 20x100 cm. Na instalaciji u Kanadi zemljište je bilo smešteno u posudu veličine 30.5x30.5 cm i korišćen je simulator sa sprej mlaznicama postavljenim na visinu od 2.2 m od površine zemljišta. Na obe instalacije ispitano je po 7 tipova zemljišta karakterističnih za Belgiju i Kanadu pod nagibom od 17%(10°). Na osnovu rezultata dobijenih pod sličnim intenzitetima kiše na oba simulatora zaključeno je da simulator u Belgiji daje veću kinetičku energiju kiše, kao i veću vrednost erozije u odnosu na kanadski simulator. Erozijska varira od 0.03-4.4 g/(m²m') za simulator u Belgiji odnosno 0.03-0.59 g/(m²m') za simulator u Kanadi.

Laboratorijska istraživanja ukupne količine erozije na kraju kišne epizode sprovedena su u Kanadi na tri različita tipa zemljišta: praškasto-glinovita-ilovača (3% pesak, 65% prašina, 32% glina), peskovita ilovača (67% pesak, 33% prašina, 0% glina) i praškasta ilovača (32% pesak, 65% prašina i 3% glina) [21]. Merena je erozija usled tečenja vode po terenu kao i usled erozije kišom na nizvodnom kraju. Prosečan intenzitet kiše za sve opite je iznosio 63.5 mm/h a trajanje kiše je iznosilo 60 min. Zemljište je osušeno i postavljeno u posudu pod nagibom od 22% (12.5°) veličine 30.5x30.5 cm bez nabijanja u debljini od 4 cm. Pre početka svakog opita zemljište je nakvašeno sprejom vode sa visine od 60 cm. Uzorci su prikupljeni 5 min nakon početka kiše a zatim na svakih 10 minuta. Rezultati pokazuju da se najveća ukupna erozija tečenjem po terenu javlja na peskovitoj ilovači sa prosečnom vrednošću od 108 g, zatim na peskovito glinovitoj ilovači sa prosekom od 38.6 g, dok za praškastu ilovaču prosečna vrednost iznosi 12.7 g. Isti redosled količina važi i za ukupnu eroziju kišom i kreće se u intervalu 2.61-4.81 g. Ukupna erozija je najveća na peskovitoj ilovači sa 112.8 g dok je za praškastu ilovaču svega 15.3 g.

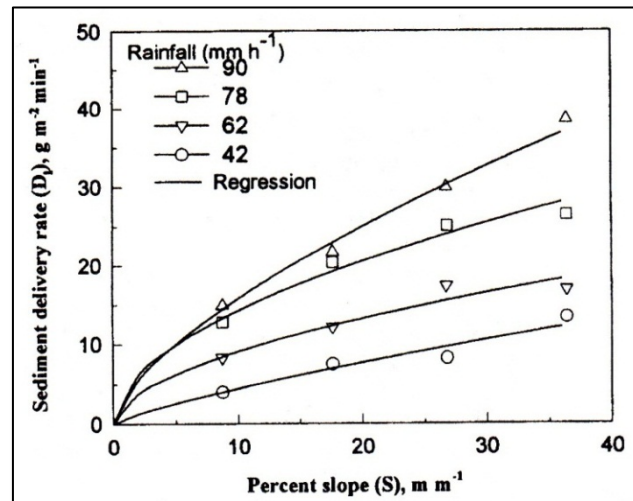
Na Imperial koledžu u Londonu (Imperial College London) izrađena je laboratorijska instalacija na kojoj je moguće kontrolisati hidrološke promenljive u procesu erozije [18]. Instalacija se sastoji od: radne površine veličine 11x7x1.52 m koja služi za smeštaj podloge sa koje se ispituje erozija, simulatora kiše, programatora kiše, merača oticaja i sistema za monitoring i beleženje podataka.

Simulator kiše se sastojao od 425 mlaznica postavljenih u pravilnu kvadratnu mrežu iznad radne površine, sa rastojanjima od 45.7 cm u svakom pravcu. Maksimalni intenzitet koji se može postići ovim simulatorom iznosi 320 mm/h. Mlaznice daju kružni otisak na površinu i postavljene su na visinu od 1.83 metara u odnosu na instalaciju. Za procenu uniformnosti kiše po površini korišćen je Christiansen-ov koeficijent. Za usvojeni razmak i visinu mlaznica, simulator je imao Christiansen-ov koeficijent veći od 0.8 što se smatra dobrom raspodelom kiše po površini.

Merenje erozije sa dva tipa zemljišta, glinovitog (55% glina, 35% prašina, 10% pesak) i praškasto-ilovastog (22% glina, 64% prašina, 14% pesak) usled tečenja vode po terenu, bez prisustva kiše, vršeno je na instalaciji dužine 9 m, širine 1 m i nagiba 0.5-2% [12]. Svi uzorci su bili prosejani i podeljeni po frakcijama veličina 0-1, 1-2 i 2-4 mm. Svaka od ovih frakcija je ugrađivana u instalaciju a eksperimenti su sprovedeni posebno za svaku od njih. Nakon blagog vlaženja zemljišta, sloj vode debljine 0.5, 1, 1.5 i 2 cm je puštan preko svakog uzorka u trajanju od 5 minuta. Rezultati su slični za obe vrste zemljišta i pokazuju da se prosečna erozija u zavisnosti od dubine vode, veličine frakcija i nagiba kreće u granicama od 0.5-100 g/(m² s). Prosečna erozija u zavisnosti od srednjeg prečnika zrna i veličine nagiba varira od 0.5-120 g/(m² s).

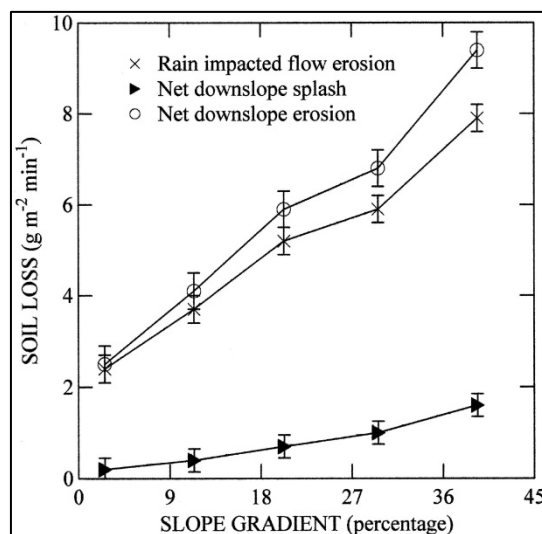
Za potrebe modeliranja procesa erozije usled kombinovanog uticaja kiše i površinskog oticaja, laboratorijskim putem, ispitana je erozija na dva tipa zemljišta: peskovita ilovača (69% pesak, 20% prašina, 11% glina) i glinovita ilovača (27% pesak, 33% prašina, 40% glina) [22]. Za simulaciju kiše korišćen je simulator sa oscilirajućom mlaznicom Veejet 80150 proizvođača Spraying System Co. Zemljište je ugrađivano u četiri posude dimenzija 0.4x0.2 m koje su se nalazile na rotirajućem stolu koji je omogućavao ravnomeran raspored kiše na svaku posudu. Zemljište u sloju od 2.5 cm je ravnomerno rasuto preko sloja krupnijeg i nabijenog peska debljine 7.5 cm a zatim poravnato kako bi se izbegao uticaj neravnina na eroziju. Uzorci u posudi su bili zasićeni preko drenažnih otvora na dnu posude tokom noći, a 30 min pre izvođenja svakog eksperimenta vršeno je dreniranje uzoraka. Opiti su se sprovodili pri nagibima od 8.7, 17.6, 26.8 i 36.4% i kišama trajanja 60 min a intenziteta 42, 62, 78 i 90 mm/h. Na osnovu rezultata

merenja predložen je model po kom erozija linearno zavisi od intenziteta kiše a eksponencijalno od nagiba slivne površine i površinskog oticaja.



Slika 2.13. Uticaj nagiba i intenziteta kiše na eroziju peskovito-ilovastog zemljišta [22]

Merenjem brzine tečenja površinskog oticaja u laboratorijskim uslovima analizirana je veza između erozije i nagiba slivne površine [23]. Za opite je korišćena peskovito glinovita ilovača (50% pesak, 22% prašina, 28% glina), prosušena do vlažnosti od oko 8%, koja je ugrađena u instalaciju veličine 100x40x10 cm. Ugrađeno zemljište je blago zbijeno pločom i ručno poravnato. Opiti su sprovedeni pri nagibima instalacije od 2.5, 11.5, 20.5, 30 i 40%. Kiša prosečnog intenziteta 49.1 mm/h i ukupnog trajanja od 75 min je simulirana pomoću simulatora sa mlaznicom. Oticaj sa površine i sprano zemljište je uzorkovano na svaka 3 min tokom prvih 15 min kiše a zatim na svakih 5 min do kraja kiše. Osim površinskog oticaja, na nizvodnom kraju je sakupljana i erozija usled kiše. Prikupljeni uzorci su osušeni na temperaturi od 105°C i izmereni. Ukupna erozija u zavisnosti od nagiba se kreće u granicama od 2-9 g/m² min. Upoređenjem ukupne erozije sa erozijom usled kiše na nizvodnom kraju sliva zaključeno je da erozija kišom učestvuje maksimalno sa 20% u ukupnoj eroziji. Takođe, uočena je linearna veza između nagiba slivne površine i erozije izazvane kišom.



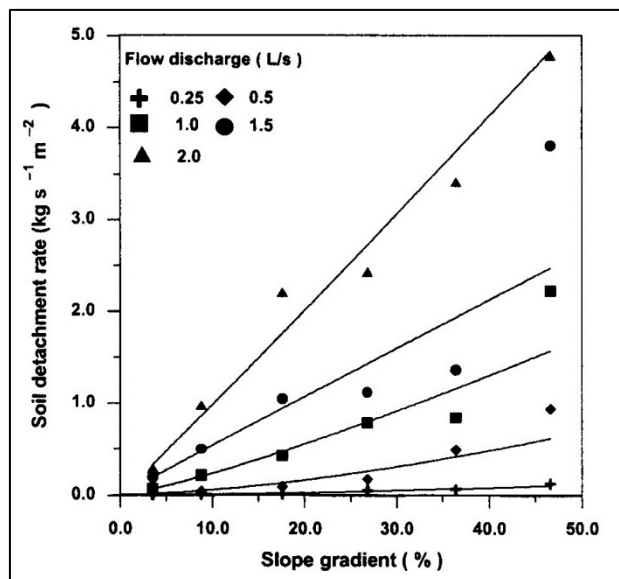
Slika 2.14. Erozijska funkcija nagiba slivne površine [23]

Radi poboljšanja postojećeg empirijskog modela za procenu erozije, RUSLE, izvršeno je 237 laboratorijskih opita erozije usled kiše sa površine pod nagibom [8]. Model je dobijen merenjem intenziteta kiše, tangencijalnih napona u zemljištu, zbijenosti zemljišta, vlažnosti zemljišta, nagiba slivne površine, brzine i dubine površinskog toka. Opiti su izvođeni na pet različitih tipova zemljišta: pesak (100% pesak), glina (20% pesak, 13.4 % prašina, 66.7% glina), peskovita ilovača (82.3% pesak, 3% glina, 14.7% glina), praškasta glinovita ilovača sa šljunkom (19.1% pesak, 40.6% prašina, 32.9% glina) i ilovača sa šljunkom (48.2% pesak, 22.2% prašina, 12% glina). Zemljište je bilo smešteno u kutije veličine 0.81x0.81 cm. Trajanje kiše iznosilo je 30 minuta sa intenzitetima od 12.7, 25.4, 50.8, 76.2 i 102 mm/h. Kiša se aplicirala pomoću simulatora kiše. Simulator kiše je izveden u vidu rama preko kojeg su postavljena perforirana gumena creva. "Treskanjem" rama pomoću ekscentra prislonjenog na ram, mlaz vode iz creva je prekidan i formirane su kapljice. Analizirani nagibi zemljišta iznosili su 0.1, 0.5, 1, 4 i 6%. Rezultati regresione analize ukazuju da je erozija u linearnoj zavisnosti sa intenzitetom kiše dok se između erozije i nagiba slivne površine ne može jasno definisati zavisnost. Ukupna maksimalna erozija sa peskovitog zemljišta na kraju kišne epizode iznosi oko 2300 grama.

Uticaj intenziteta kiše, površinske hrapavosti i napona u zemljištu na eroziju vršeno je laboratorijskim istraživanjem na praškastoj ilovači (18% glina, 80%

prašina, 2% pesak) [24]. Zemljište je ugrađivano u instalaciju dimenzija 3.7x0.61 m u nekoliko slojeva. U donjem sloju, debljine 3 cm, koji se sastojao od finog peska ugrađene su perforirane cevi radi drenaže. Sledeći sloj, debljine 12 cm, se sastojao od frakcija 0-4 mm i prilikom ugradnje je sabijan bacanjem aluminijumskog bloka težine 15 kg sa visine od 30 cm i naknadno ručno izravnat kako bi se dobila približno jednaka debljina uzorka. Završni, gornji sloj se sastojao od podjednake raspodele frakcija veličine 2, 27 i 56 mm. Za simulaciju kiše korišćene su tri oscilirajuće mlaznice Veejet 80150. Kiša je aplicirana na suvo zemljište i na nagibima od 2, 8 i 17% u vidu serije od četiri uzastopne kiše jednake visine padavina ali različitog intenziteta. Jedna serija se sastojala od kiša čiji intenziteti opadaju od 60, 45, 30 do 15 mm/h. Druga serija se sastojala od istih kiša kao u prvoj seriji ali rastućeg intenziteta. Ukupno trajanje cele kišne epizode je iznosilo 45 min uz različito trajanje svakog intenziteta u cilju dobijanja iste količine padavina. U drugom tipu opita, održavan je konstantan intenzitet kiše od 66 mm/h trajanja 45 min pri nagibu od 8%. Rezultati pokazuju da se erozija povećava povećanjem nagiba i hrapavosti slivne površine, dok redosled intenziteta kiše ne utiče na količinu erozije. Za glatke površine i nagibe od 2, 8 i 17% erozija iznosi 0.5, 1.4 i 7.2 kg/m², dok za hrapave površine i iste nagibe erozija iznosi 0.56, 3.31 i 9.83 kg/m².

Za studiju koja je imala za cilj izučavanje erozije pod uticajem plitkih tokova po površini terena izrađena je laboratorijska instalacija dimenzija 5x0.4 m [25]. Nagibi instalacije su bili podesivi, a merenja su vršena pri nagibima od 3.5, 8.8, 17.6, 26.8, 36.4 i 46.6%. Erozija je ispitivana na praškastoj ilovači (23.6% glina, 56.9% prašina, 16.7% pesak) dovođenjem proticaja od 0.25, 0.5, 1, 1.5 i 2 l/s na površinu terena bez simulacije kiše. Dubina površinskog toka u zavisnosti od proticaja i nagiba se kretala od 0.2-0.96 cm. Pre izvođenja opita, zemljište je prosušeno, prosejano kroz sito od 5 mm, navlaženo vodom u odnosu 180 g/kg i ostavljeno u plastičnim kesama tokom 48 časova. Nakon toga zemljište je ugrađeno u instalaciju u debljini od 5 cm. Rezultati pokazuju da se erozija u zavisnosti od površinskog oticaja eksponencijalno povećava do nagiba od 36.4%. Za nagib od 46.6% taj trend je linearan. Za analizirane slučajeve erozija se kreće u granicama od 2-4784 g/s m².



Slika 2.15. Erozijska funkcija nagiba i površinskog oticaja [25]

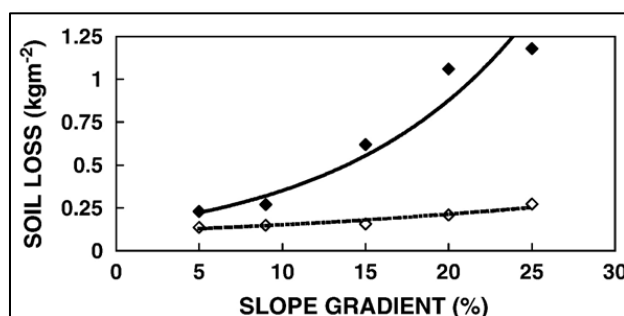
Erozija usled kombinovanog dejstva kiše i površinskog oticaja merena je na delu prirodnog poljoprivrednog sliva pod vegetacijom na severozapadu Francuske [26]. Na površini veličine 1 ha, koja na nizvodnom delu ima padinu u dužini od 500 m i 15 m visinske razlike, uspostavljena su tri sliva veličine 1x1 m i tri sliva veličine 2x5 m. Slivovi su ograničeni metalnim okvirima koji su zabijeni do 10 cm dubine i imaju nagibe od 1, 4 i 8%. Opiti su sprovedeni u periodu januar-mart kada je stepen obraslosti vegetacijom iznosio oko 10% a zemljište je već bilo primilo oko 450 mm kiše. U toku trajanja opita na sliv je palo šest prirodnih kiša. Kiša najvećeg intenziteta iznosila je 8 mm/h sa ukupnom visinom padavina od 16 mm. Preostale kiše bile su intenziteta 1.3-1.7 mm/h sa ukupnom visinom padavina od 2-46 mm. Osim prirodnih kiša na slivove je aplicirana i veštačka kiša pomoću ORSTOM simulatora sa mlaznicom Teejet SS6560 postavljenom na 3.5 metara iznad površine zemljišta. Pre početka merenja uz pomoć simulatora, zemljište je bilo nakvašeno kišom trajanja 30 minuta, intenziteta 30 mm/h, a sami opiti su bili sprovedeni uz pomoć kiše istog intenziteta, trajanja 90 minuta. Rezultati opita su varirali u širokim granicama i kretali su se od 1.5-384 g/m² h. Zaključeno je da je ukupna erozija u linearnoj korelaciji sa intenzitetom kiše i dužinom slivne površine, dok sa nagibom slivne površine ne postoji korelacija.

Za izučavanje metoda kontrole erozije vegetacijom, na Politehničkom fakultetu u Kaliforniji (California Polytechnic State University, San Louise) izrađen je simulator kiše [27]. Simulator je projektovan i konstruisan na principima Norton-ovog simulatora kiše. Četiri mlaznice FloodJet 3/8K SS45 (proizvođač Spraying System Company), postavljene na međusobnom rastojanju od 99 cm i pod pritiskom vode od 0.4 bara pokrivaju površinu dužine 3.56 metara i širine 1 metar. Ispod svake mlaznice nalazi se kutija sa otvorom veličine 15x11 cm koja omogućava ravnomernu distribucija vode po površini. Na dnu kutije nalazi se i otvor koji omogućava vraćanje viška vode iz kutije u rezervoar. Simulator je namenjen kišama intenziteta manjim od 50 mm/h. Intenzitet kiše se podešava pomoću računara koji je spojen sa upravljačkim mehanizmom zadavanjem broja prelaska mlaznice u minuti preko otvora kutije.

Uticao hrapavosti površine na eroziju izučavan je u laboratorijskim uslovima za nagibe od 5 i 20% [28]. Opiti su sprovedeni u instalaciji dimenzija 4x2 m. U oba slučaja, na dno instalacije je postavljen šljunak debljine 5 cm koji je obezbeđivao drenažu. Debljina peska pomoću kojeg je formiran nagib je iznosila 85 cm na uzvodnom i 5 cm na nizvodnom kraju za nagib od 20% odnosno 15 cm na uzvodnom i 5 cm na nizvodnom kraju za nagib od 5%. Preko peska, u debljini od 28 cm je postavljen sloj prašinate ilovače nepoznatog granulometrijskog sastava. Ugrađivanje zemljišta je vršeno u slojevima od 6 cm. Debljina poslednjeg sloja je iznosila 4 cm. Svaki sloj zemljišta je prvo ručno izravnat po površini a zatim sabijan tegom od 5 kg površine 225 cm². Površina je zatim pokrivena geotekstilom i aplicirano je 30 mm kiše u periodu od 3 h. Nakon kiše, skida se geotekstil i nakon 72 h nastale pukotine se popunjavaju suvim zemljištem, ponovo se oblikuje površina i nakon 5 dana se stavlja sledeći sloj zemljišta. Ovaj postupak je ponavljan dok ceo sloj zemljišta nije bio ugrađen u instalaciju. Izučavana su dva slučaja hrapavosti, glatka površina i hrapava površina. Glatka površina je pripremljena na prethodno opisan način, a za postizanje veće hrapavosti izvršeno je blago zaoravanje ručnim alatom širine 15 cm. Svaki opit se sastojao u apliciranju 5 kiša sa pauzama od 48 h između svake kiše. Prve tri kiše bile su intenziteta 45 mm/h a druge dve kiše bile su intenziteta 60 mm/h. Trajanje svake kiše iznosilo je 1 h. Nakon svake kiše merena je količina ukupne erozije. Za nagib od 5% i kiše

intenziteta 45 mm/h prosečna erozija je iznosila 0.4 kg/m² za glatku odnosno 0.5 kg/m² za hrapavu površinu. Za isti nagib i kiše od 60 mm/h erozija sa glatke površine je iznosila 0.8 kg/m² za glatku i 1.1 kg/m² za hrapavu površinu. Za nagibe od 20% i kišu 45 mm/h erozija je iznosila 2.8 kg/m² za glatku i za hrapavu površinu. Za kišu 60 mm/h erozija je iznosila 4.3 kg/m² za glatku odnosno 5.5 kg/m² za hrapavu površinu.

Izučavanjem erozije usled kiša različitog intenziteta i pri različitim nagibima površine sliva, u Volcani centru u Izraelu, zaključeno je da je erozija zavisi od nagiba slivne površine i oticaja [29]. Za sprovođenje opita korišćeno je vodom zasićeno peskovito zemljište (88% peska) sa primesama gline i prašine od 10% odnosno 2%. Sloj zemljišta debljine 2 cm je ugrađen u metalne posude veličine 30x50 cm sa perforiranim dnom. Posude su zatim postavljene na kutije sa krupnijim peskom debljine 8 cm koji omogućava drenažu gornjeg sloja. Posude su postavljane u nagibima od 5%, 9%, 15%, 20% i 25% ispod simulatora kiše sa rotirajućim diskom. Na zemljište je aplicirana kiša ukupne visine 70 mm sa intenzitetom od 24 mm/h i trajanja 3 h odnosno sa intenzitetom od 60 mm/h i trajanja 1.1 h. Površinski oticaj sa površine je uzorkovan na svakih 160 sekundi koliko je bilo potrebno za dve rotacije diska ispod mlaznice. Rezultati pokazuju da je erozija u linearnoj zavisnosti sa nagibom površine za kišu intenziteta 24 mm/h odnosno u eksponencijalnoj za kišu intenziteta 60 mm/h. Za kišu intenziteta 24 mm/h i nagibe od 5-25% prosečna erozija se kreće u intervalu 1-1.2 g/(m² min). Za iste nagibe i kišu od 60 mm/h erozije se kreće u intervalu 3.8-19 g/(m² min).



Slika 2.16. Erozija u funkciji nagiba [29]

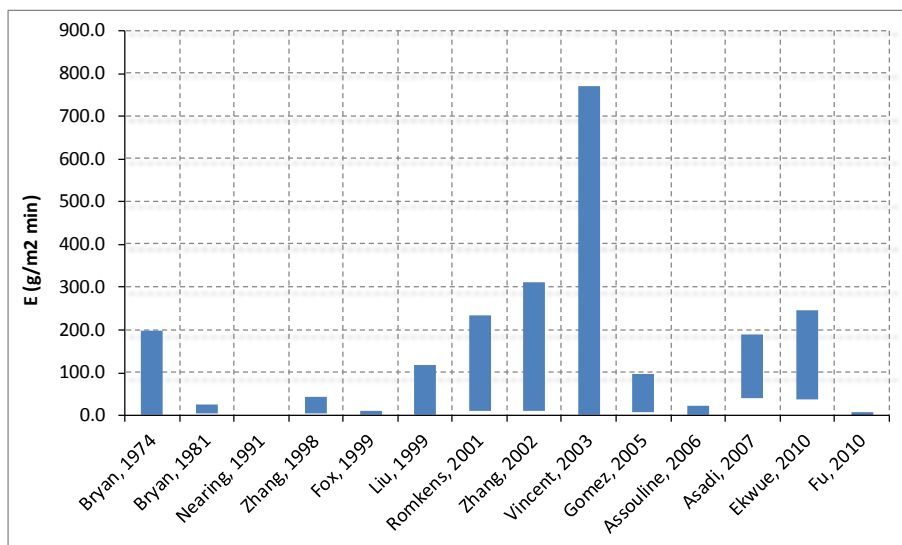
Odvajanje i transport čestica zemljišta su posledica erozionih sila udara kiše, tečenja vode po terenu i njihovog kombinovanog delovanja [30]. U cilju

određivanja interakcije između erozije kišom i površinskim oticajem, sprovedene su tri vrste opita na tri tipa zemljišta: glinovitom (13% pesak, 23% prašina, 64% glina), glinovitom (36% pesak, 21% prašina, 43% glina) i peskovitom (91% pesak, 4% prašina, 5% glina). Za svaki opit korišćena je instalacija veličine 6x1x0.1 m sa podesivim nagibom. Na instalaciji je moguća zasebna kontrola kiše i površinskog oticaja a dno instalacije je bilo nepropusno. Za simulaciju kiše korišćene su mlaznice niskog pritiska postavljene na visinu od 9 m. Na uzvodnom kraju instalacije nalazio se rezervoar za puštanje kontrolisanog površinskog oticaja. Opiti su se sastojali u analizi erozije pod uticajem isključivo kiše, isključivo površinskog oticaja i kombinovanog uticaja kiše i površinskog oticaja na prethodno zasićenom zemljištu. Za prvi tip opita nagib instalacije je iznosio 0.1% a za druga dva opita korišćen je nagib od 2.5%. Intenzitet kiše za prvi opit je iznosio 97 mm/h, za treći opit 102 mm/h a trajanje kiše je bilo 30 min. Rezultati pokazuju da se najveća količina nanosa u površinskom oticaju javlja tokom prvih 3 minuta kiše a nakon toga je konstantna. Količine nanosa usled erozije kišom i površinskim oticajem su podjednake po tipovima zemljišta dok se najveće količine javljaju na peskovitom zemljištu i iznose oko 3 kg/m³ suspenzije.

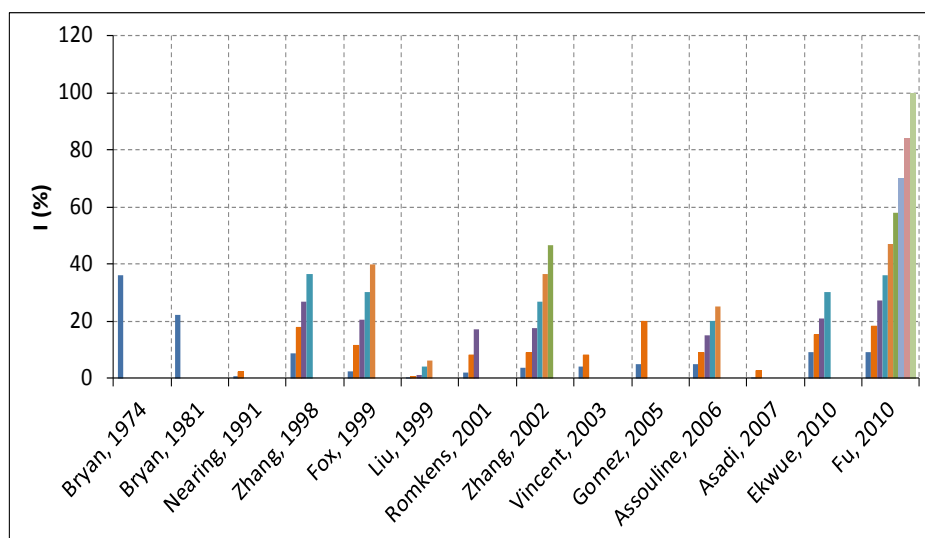
Za izučavanje uticaja tipa zemljišta, nagiba i zbijenosti zemljišta na eroziju izrađena je laboratorijska instalacija na Univerzitetu u St. Augustinu, Trinidad i Tobago [31]. Izučavana je erozija sa tri tipa zemljišta: peskovita ilovača (65% pesak, 17% prašina, 18% glina), glinovita ilovača (44.7% pesak, 24.7% prašina, 30.6% glina) i glina (25.4% pesak, 28.3% prašina, 46.3% glina). Zemljište je zbijeno silom pritiska od 95, 137 i 179 kPa u posudu veličine 2.6x0.4x0.12 m sa perforiranim crevom za drenažu i postavljeno u nagibu od 9, 15, 21 i 30%. Na dno posude, u visini od 8 cm, ugrađen je šljunak radi drenaže. Simulacija kiše vršena je uz pomoć simulatora sa mlaznicom FullJet postavljenom na visinu od 2 m, Christiansen-ov koeficijentom uniformnosti iznosio je 0.89. Kiša intenziteta 90 mm/h i trajanja 20 minuta je aplicirana na zemljište. Rezultati pokazuju da se erozija blago smanjuje povećanjem zbijenosti a linearno povećava usled većih nagiba. Najmanja erozija je ustanovljena na glinovitoj ilovači i iznosila je 0.75 kg/m², dok je za peskovitu ilovaču zabeležena vrednost erozije od 4.2 kg/m².

Uticao nagiba površine na eroziju zemljišta i doprinos erozije kišom na eroziju tečenjem vode po terenu je izučavan u Pekingu [32]. Ilovasto zemljište je ugrađivano u posude dimenzija 50x50x10 cm, sa perforacijama na dnu, u nagibima od 9, 18, 27, 36, 47, 58, 70, 84 i 100%. Posude su napravljene tako da je moguće prikupljanje erozije kišom sa sve četiri strane kao i prikupljanje površinskog oticaja na nizvodnoj strani. Za simulaciju kiše korišćena su dva simulatora sa oscilirajućim mlaznicama VeeJet 80100 postavljenih na visinu od 2.3 m u odnosu na zemljište. Trajanje kiše je iznosilo 60 min a intenzitet 67 mm/h. Povećanjem nagiba, erozija kišom na uzvodnoj i bočnim stranama se smanjila sa 1.5 g/m² min na 0.1 g/m² min odnosno sa 2 g/m² min na 1 g/m² min, dok se na nizvodnoj strani povećala sa 2 g/m² min na 4 g/m² min. Erozija usled spiranja je imala trend rasta od 2.9 g/m² min pri uglu od 9% do 6.6 g/m² min pri uglu od 58%. Pri većim uglovima erozija spiranjem je opadala do vrednosti od 3.2 g/m² min pri uglu od 100%.

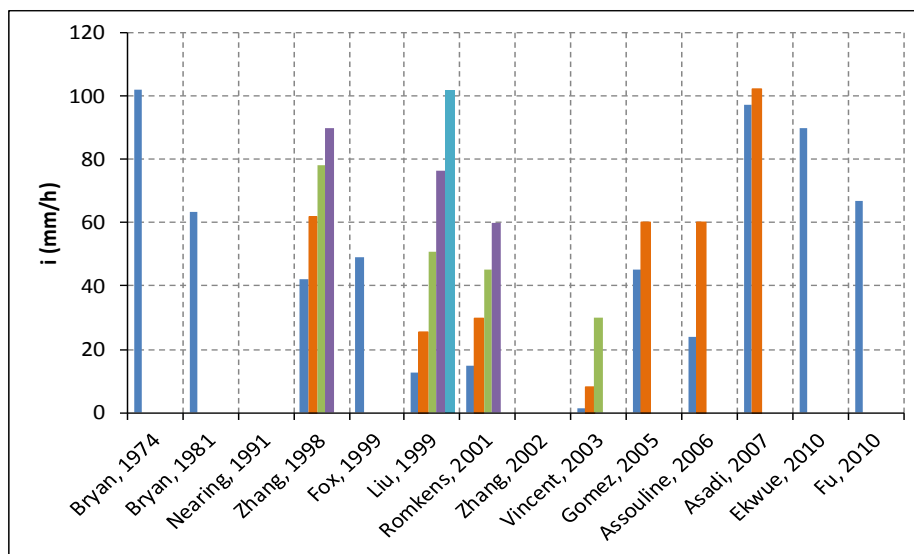
Iz navedene literature može se zaključiti da postoje različiti načini u pristupu izučavanja problema vezanih za eroziju. Pojedini autori su fokusirani isključivo na eroziju kišom, drugi analiziraju eroziju pod uticajem površinskog toka bez apliciranja padavina, dok postoje i oni koji pokušavaju da utvrde eroziju usled kombinovanog dejstva padavina i oticaja. Sve ovo uslovalo je izradu laboratorijskih i modela namenjenih za upotrebu u prirodi koji u značajnoj meri odstupaju jedni od drugih ne samo po nameni već i po dimenzijama. Iz navedenih radova se vidi da se veličine instalacija kreću od izuzetno malih, veličine 30.5x30.5 cm, pa sve do instalacija veličine 9x1 m. Osim dimenzija instalacija, promenljivi su i nagibi, intenziteti kiše i tipovi simulatora, tipovi zemljišta i postupci ugradnje zemljišta u instalaciju. Rezultat toga je da rezultati dobijeni na ovim instalacijama variraju u širokim granicama i često su neuporedivi jedni sa drugima a kamoli sa rezultatima dobijenim na prirodnim slivovima. Na slikama 2.17 – 2.21 grafički su prikazani i upoređeni rezultati erozije iz navedene literature, a takođe i nagibi, intenziteti kiša, dužine slivnih površina i korišćena zemljišta.



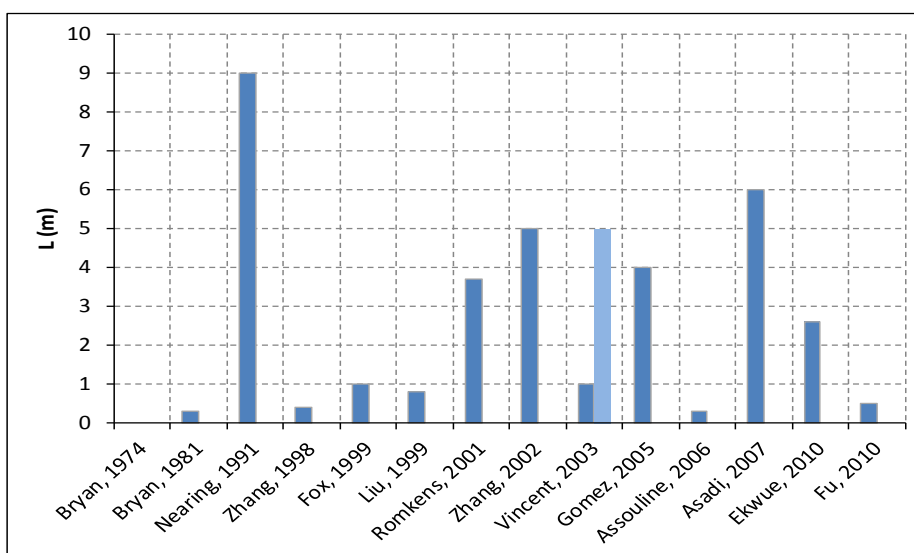
Slika 2.17. Vrednosti erozije (E) po analiziranoj literaturi



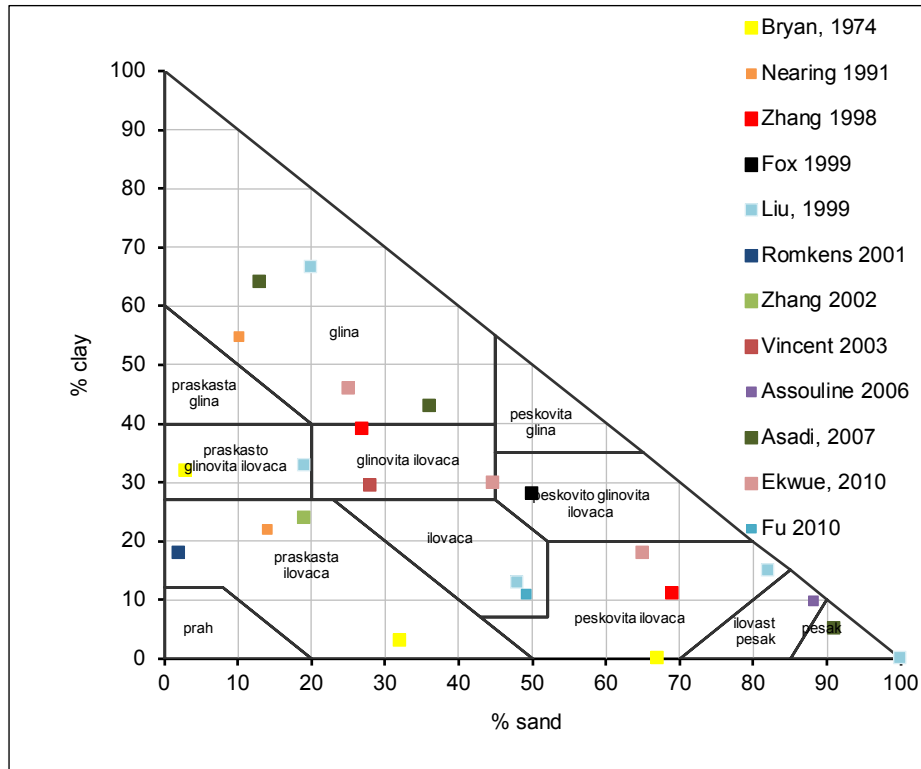
Slika 2.18. Nagibi slivne površine (I) po analiziranoj literaturi



Slika 2.19. Intenzitet kiše (i) po analiziranoj literaturi



Slika 2.20. Dužine slivova (L) po analiziranoj literaturi



Slika 2.21. Zemljište korišćeno za izučavanje erozije

2.3. Modeli erozije zasnovani na empirijskoj korelaciji

Erozija zemljišta se izučava više od 60 godina. Do sada je razvijeno mnogo empirijskih metoda za procenu količine erozije ali mnogi autori smatraju da, i pored svih svojih nedostataka i ograničenja, jednačina USLE (Universal Soil Loss Equation) i njene modifikacije predstavlja najvažniji model do sada razvijen za procenu količine erozije.

2.3.1. Stariji modeli

Razvoj modela za proračun erozije započeo je sredinom prve polovine XX veka, kada je Zingg objavio formulu pomoću koje je erozija sračunata na osnovu dužine i nagiba tla [33]:

$$A=4.85CS^{1.4}L^{0.6} \quad (2.6)$$

gde je:

A – prosečna masa erodiranog tla sa jedinične površine u nagibu (kg/m^2),

Pregled literature

C – koeficijent varijacije,

S – nagib (%) i

L – horizontalna dužina tla u nagibu (m)

Do 1956, više od 7500 instalacija-godina (plot-years) i 500 sliv-godina (watershed years) istraživanja erozije je obavljeno u 21 državi u Americi. Počevši od 1957, Smith i Wischmeier su objavili nekoliko empirijskih formula za proračun erozije zasnovanih na prethodnim rezultatima. Tvrdili su da, osim kiše, na pojavu erozije značajno utiču nagib i dužina slivne površine, rastinje, tip i način obrade zemljišta. Empirijska formula za proračun erozije koja je praktično bila uvod u USLE model je [8]:

$$A = 0.224 \cdot C \cdot S \cdot L \cdot K \cdot P \cdot M \quad (2.7)$$

gde su:

A – prosečan godišnji gubitak tla prirodnog sliva (kg/m^2)

C – prosečna godišnja erozija sa eksperimentalne instalacije (kg/m^2)

S i L – faktori koji se odnose na nagib (S) i dužinu (L) deonice podešeni da daju jediničnu eroziju sa deonice dužine 27.43 m i nagiba 3%

K – faktor erodibilnosti zemljišta,

P – faktor protiverzionih mera,

M – faktor upravljanja zemljištem.

2.3.2. Model USLE (Universal Soil Loss Equation) i njegove modifikacije

Najviše upotrebljavan model za proračun erozije predstavlja jednačina USLE koji je razvijen od strane USDA pod vodstvom Wischmeier-a i Smith-a. Model je prvi put objavljen u Agriculture Handbook 282 (1965. godina) [5] dok je nešto prerađena verzija (prerade se odnose na definisanje parametara formule) objavljena u Agriculture Handbook 537 (1978. godina) [33], takodje od strane Wischmeier-a i Smith-a.

Model je nastao na osnovu rezultata statističke obrade preko 10000 sliv-godina i podataka sa 1000 – 2000 instalacija-godina ispitivanja pomoću simulatora kiše. Autori su naglasili da model USLE služi za dugoročnu ocenu erozije usled tečenja

vode po površini terena ili u brazdama, sa površine pod kulturom i pod određenim uslovima obrade zemljišta. Tolerancija koju su dozvolili u odnosu na stvarnu eroziju kreće se od 5 – 12.5 t/(ha god).

Sve parametre koji utiču na proces erozije ovaj model svodi na šest glavnih faktora čiji produkt predstavlja prosečan gubitak tla tj. eroziju. Model se može predstaviti sledećom formulom [1]:

$$A = 0.224 \cdot R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2.8)$$

gde je:

A – gubitak zemljišta po jedinici površine, (kg/(m²god)),

R – faktor erozije snage kiše (kg m/(m²mm h)),

K – faktor erodibilnosti zemljišta, označava intenzitet erozije po jedinici erozionog indeksa za određeno zemljište,

L – faktor dužine padine,

S – faktor nagiba,

C – faktor biljnog pokrivača,

P – faktor protiverozionih mera.

Približne vrednosti svih faktora koji čine model USLE mogu da se odrede iz grafika i tabela datih u Agricultural Handbook 537 [33]. Ovi faktori važe za SAD i to uglavnom za područje istočno od planinskog venca Rocky Mountains te je njihova upotreba na druge regione kod kojih postoje značajne razlike u padavinama, tipu zemljišta i topografskim uslovima donekle ograničena. Međutim, i za ta područja rezultati dobijeni ovom metodom mogu predstavljati dobre smernice za razvoj faktora karakterističnih za ta područja. Značaj svakog faktora u USLE modelu je dat u nastavku.

Faktor erozije snage, R

Numerička vrednost faktora R u USLE modelu ukazuje na efekat udara kišne kapi odnosno energetske interakciju kiše i zemljišta. Wischmeier je istraživanjima utvrdio da je, držanjem svih parametara osim kiše konstantnim, erozija direktno proporcionalna parametru kiše kojeg je definisao kao:

$$R = EI_{30} = (916 + 331 \cdot \log I) \cdot I_{30} \quad (2.9)$$

gde je:

E – kinetička energija (kg m/(m² mm))

I – prosečan intenzitet kiše (mm/h)

I₃₀ – maksimalni 30-minutni intenzitet kiše (mm/h).

Po definiciji, vrednost EI za datu kišu predstavlja produkt kinetičke energije kiše i maksimalnog 30-minutnog intenziteta kiše. Kinetička energija kiše, E, sama po sebi nije dovoljan pokazatelj erozionog potencijala jer dugačke i slabe kiše mogu imati iste vrednosti kinetičke energije kao i kratke a jake kiše. Parametar EI pokazuje kako se ukupna energija i maksimalni intenzitet kiše kombinuju u jednu karakterističnu kišnu epizodu.

Faktor erodibilnosti zemljišta, K – je vrednost koja je eksperimentalno određena. Predstavlja eroziju tla, prikazanu erozionim indeksom, usled padavina sa 22.13 metara duge površine sa konstantnim nagibom od 9%.

Topografski faktori, L i S – predstavljaju odnos erozije sa prirodnog sliva i erozije sa slivne površine dužine 22.13 metara koja je pod nagibom od 9%. Faktor L je predstavljen izrazom:

$$L = (\lambda / 22.13)^m \quad (2.10)$$

gde je:

λ – dužina slivne površine (m)

m – 0.5 ako je nagib > 5%, 0.4 ako je nagib 3.5 – 4%, 0.3 ako je nagib 1-3% i 0.2 ako je nagib < 1%.

Faktor S je:

$$S = 65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065 \quad (2.11)$$

gde je:

θ – ugao koji slivna površina zauzima u odnosu na horizontalu.

Faktor biljnog pokrivača, C – vrednosti se kreću od bliskih nuli za zemljišta pod gustom vegetacijom do 1.5 za gola zemljišta.

Faktor protiverozionih mera, P – prikazuje kako uslovi na površini zemljišta utiču na formiranje kanala kojima otiče voda.

Ograničenja modela USLE

1. Model važi isključivo za eroziju izazvanu tečenjem vode po terenu,
2. Model je testiran i verifikovan na brežuljkastim terenima sa nagibima od 1-20%. Izbegavani su nagibi veći od 40% gde površinski oticaj preuzima primarnu ulogu u eroziji tla,
3. Odnos između kinetičke energije kiše i intenziteta kiše važi isključivo za američku ravnicu koja leži istočno od planinskog venca Rocky Mountains,
4. Model je baziran na podacima merenja tokom perioda od samo 20 godina i ne može se iskoristiti za ocenu erozije od jedne kišne epizode,

Modifikacija modela USLE - MUSLE

USLE model je bio prvi alat koji je služio za ocenu erozije sa sliva. Međutim, zbog nedostataka koje je imao, mnogi istraživači su predstavljali poboljšane modele USLE-a. Jedna od najznačajnijih modifikacija bio je model MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) [8].

Ovaj model predložio je Williams (1975). Glavna modifikacija u odnosu na USLE odnosi se na zamenu erozionog koeficijenta R, iz modela USLE, sa faktorom oticaja. Razlog za ovu modifikaciju leži u činjenici da faktor oticaja ima mnogo bolju korelaciju sa erozijom u odnosu na padavine. Formula koja opisuje model MUSLE glasi:

$$S = 95 \cdot (Q \cdot q_p)^{0.56} \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2.12)$$

gde je:

S – gubitak zemljišta (ton),

Q – zapremina oticaja (m²/m'),

q_p – vršni oticaj (m³/sec),

dok su ostali parametri identični kao u modelu USLE.

RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation

Godine 1987, ARS (Agricultural Research Service) i SCS (Soil Conservation Service) zajedno sa nekoliko kooperanata započeli su projekat revizije modela USLE i njegove dokumentacije. Renard [34], [35] je sa svojim saradnicima objavio revidovan model pod nazivom RUSLE koji ima identičnu strukturu kao USLE, s tom razlikom što su faktori koji utiču na eroziju razbijeni tako da se dobije veća tačnost pri proceni erozije. Model glasi identično kao i model USLE (jednačina 2.8):

$$A = 0.224 \cdot R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2.13)$$

gde je:

A – gubitak zemljišta po jedinici površine (kg/(m²god))

R – faktor erozije snage (kg m/(m²mm h))

K – faktor erodibilnosti zemljišta

L – faktor dužine padine,

S – faktor nagiba,

C – faktor biljnog pokrivača,

P – faktor protiverozionih mera.

Ukratko, poboljšanja koja donosi RUSLE u odnosu na USLE su:

1. Kompjuterizovanje proračuna,
2. Nove vrednosti faktora R za zapadnu Ameriku,
3. Poboljšani faktori R za istočnu Ameriku,
4. Faktor K promenljiv po sezonama,
5. Faktor C se sračunava pomoću pod faktora,
6. LS zavisi od oblika površine,
7. nove vrednosti faktora P za različita stanja površine.

Činjenica je da su oba modela (USLE i RUSLE) zasnovana na podacima dobijenim merenjima kako na prirodnim slivovima tako i na eksperimentalnim poljima. I pored određenog napretka napravljenog primenom modela RUSLE, nedostaci koji karakterišu USLE model u dobroj meri važe i za RUSLE model. Najveći nedostatak je svakako nemogućnost procene sezonske ili erozije od jedne kiše. Kao i USLE, i

RUSLE model daje bolje rezultate na slivovima koji su pod manjim nagibom, dok će za veće nagibe (veće od 20%) erozija biti precenjena [8].

2.3.3. Ostali modeli za proračun erozije

Osim modela koji su spomenuti u prethodnom delu, u svetu je razvijeno još mnoštvo empirijskih modela koji se uspešno primenjuju za procenu erozije sa sliva. USLE i RUSLE modeli su koncipirani na osnovu velikog broja merenja i za područje SAD-a i njihova primena na neka druga područja može dovesti do grešaka u proračunu erozije. Ova činjenica je navela mnoge istraživače da sami naprave neki model za proračun erozije.

Nichols i Sexton [36] su bili među prvima koji su zastupali gledište da je u procesu erozije intenzitet kiše mnogo važniji od količine kiše odnosno od količine površinskog oticaja. Na osnovu eksperimenata sa različitim intenzitetima kiše i različitim tipovima zemljišta, Meyer [36] je došao do eksponencijalne zavisnosti između erozije i intenziteta padavina koju je opisao sledećom funkcijom:

$$E = aI^b \quad (2.14)$$

gde je:

E – intenzitet erozije (t/(ha h)),

I – intenzitet kiše (mm/h),

b – eksponencijalni koeficijent,

a – erozioni faktor koji obuhvata tip zemljišta i stanje površine.

U Meyer-ovoj formuli, vrednosti za koeficijent b su varirale između 1.63 – 2.30 te je formula korišćena u sledećem obliku [36]:

$$D_i = K_i I^2 \quad (2.15)$$

gde je:

D_i – intenzitet erozije (kg m²/s),

K_i – erozioni koeficijent (kg s/m⁴),

I – intenzitet kiše (mm/h).

Početakom devedesetih godina XX veka, Kinnell je sa saradnicima došao do zaključka da se erozija usled površinskog oticaja ne sme zanemariti i da je ukupna erozija produkt kombinacije intenziteta kiše i površinskog oticaja. Uzimajući ovu činjenicu u obzir, Flanagan i Nearing [36] su predložili model:

$$D_i = K_i I q \quad (2.16)$$

gde je:

D_i – intenzitet erozije ($\text{kg m}^2/\text{s}$),

K_i – erozioni koeficijent ($\text{kg s}/\text{m}^4$),

I – intenzitet kiše (m/s),

q – površinski oticaj (m^2/s)

Razvijeno je i verifikovano još nekoliko sličnih modela od različitih autora [36] koji imaju sličan oblik kao prethodna formula:

$$D_i = K_i I^\alpha q^\beta \quad (2.17)$$

gde je:

D_i – intenzitet erozije ($\text{kg m}^2/\text{s}$),

K_i – erozioni koeficijent ($\text{kg s}/\text{m}^4$),

I – intenzitet kiše (m/s),

q – površinski oticaj (m^2/s)

ali sa različitim koeficijentima α i β . Zajednički problem svim ovim modelima je činjenica da su svi razvijeni pod pretpostavkom nezavisnosti oticaja od padavina, što se koeficijentima α i β pokušava na neki način kompenzovati.

Vredan je pomena još jedan pravac u razvoju modela za proračun erozije [22]. Modeli imaju sličan oblik kao prethodni ali se za proračun erozije umesto površinskog oticaja koristi nagib padine. Model je oblika:

$$D_i = K_i I^2 S_f \quad (2.18)$$

gde je:

D_i – intenzitet erozije ($\text{kg m}^2/\text{s}$),

K_i – erozioni koeficijent ($\text{kg s}/\text{m}^4$),

I – intenzitet kiše (mm/h),

S_f – faktor nagiba koji predstavlja ograničenje transporta nanosa pri malim uglovima.

$$S_f = 1.05 - 0.85 \exp(-4 \sin(s)) \quad (2.19)$$

gde je:

s – ugao nagiba padine.

2.4. Modeli oticaja i erozije zasnovani na fizičkim procesima

Kao i kod metoda za ispitivanje količine erozije, i kod modela postoji veliki izbor. Od modela koji su striktno empirijski i sastoje se od svega nekoliko elemenata, postoje i modeli koji opisuju fiziku pojave erozije na slivu.

Pod matematičkim modeliranjem erozionih i transportnih procesa podrazumeva se opisivanje ovih procesa jednačinama i njihovo povezivanje u integrisane modele koji opisuju celokupnu dinamiku geneze i transporta nanosa u slivu [37]. Modeli predstavljaju korisno sredstvo, čijom primenom je moguće predvideti kako će se procesi oticaja i erozije odvijati i kako će se promena neke karakteristike sliva odraziti na promenu ovih veličina. U fizički baziranim modelima procesi erozije zemljišta i transporta nanosa na slivu opisuju se kao odgovor sliva na određene klimatske, topografske, pedološke, geološke i vegetacione uslove na slivu [38]. U nastavku rada dat je opšti opis i uporedni prikaz karakteristika nekoliko fizički baziranih modela oticaja i erozije: ANSWERS, CREAMS, WEPP, KINEROS2, EUROSEM i SHETRAN.

ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Response Simulation) je distributivan model pogodan za predviđanje količine oticaja i erozije usled jedne kišne epizode [39]. Dok je veza između padavina i oticaja opisana empirijskim vezama, model koristi fizički zasnovane relacije za opisivanje procesa erozije i transporta nanosa [40].

Model *CREAMS* (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) razvijen je sa ciljem da omogući procenu uticaja zagađujućih materija sa poljoprivrednih površina na vodotoke [38]. Modelom se opisuju hidrološki,

erozioni i transportni procesi u okviru jedne parcele, uniformnog načina korišćenja zemljišta i uniformne topografije.

WEPP (Water Erosion Prediction Project) je model kontinualnih kišnih epizoda za procenu erozije sa poljoprivrednih površina, površina pod šumom, građevinskih parcela i urbanih površina [39]. Model deli oticaj na oticaj po površini i u brazdama, pa zasebno računa i eroziju po površini i u brazdama. Za procenu erozionih procesa koristi se jednačina kontinuiteta za ustaljeno kretanje nanosa.

Model *KINEROS2* (KINematic EROsion Simulation) deli sliv na mrežu elemenata kao što su slivovi, kanali ili retenzije koji su međusobno povezani. Model koristi jednačinu kontinuiteta neustaljenog pronosa nanosa za procenu erozionih procesa na slivu [39]. Erozijska i taloženja su predstavljena kao kombinacija erozije kišom i hidrauličke erozije.

Model *EUROSEM* (EUROpean Soil Erosion Model) je jedan od najpoznatijih evropskih erozionih modela. Baziran je na modeliranju erozije od jedne kišne epizode jer se smatralo da na eroziju, tokom godine, utiče mali broj parametara [39]. Model daje podatke o ukupnom oticaju, ukupnoj eroziji, hidrogramu oticaja kao i vezu između oticaja i erozije.

SHETRAN predstavlja programski paket zasnovan na interakciji nekoliko različitih modula kojima su opisani procesi evapotranspiracije i intercepcije, kretanje vode po površini terena i kroz hidrografsku mrežu, kretanje kroz nezasićenu i zasićenu sredinu i modula u kome su opisani erozioni i transportni procesi.

Tabela 2.3. Poređenje nekoliko fizički baziranih programskih paketa [38]

| Karakteristike programskog paketa | Naziv programskog paketa | | | | | |
|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|---|----------------------------|
| | ANSWERS | CREAMS | WEPP | KINEROS | EUROSEM | SHETRAN |
| Period simulacija: | | | | | | |
| Model kontinualnih simulacija | ne | da | da | ne | ne | da |
| Model epizoda kiše | da | da | da | da | da | da |
| Veličina sliva | <50km ² | <4km ² | <2.6km ² | <1km ² | mali sliv | <2000km ² |
| Prostorna diskretizacija | grid | grid | grid | homogene površine uniformnih karakteristika | homogene površine uniformnih karakteristika | grid |
| Tip površinskog oticaja | | | | | | |
| Hortonov tip | da | da | da | da | da | da |
| Zasićen tip | ne | ne | ne | ne | ne | da |
| Erozioni procesi | | | | | | |
| Pod uticajem kiše i površinskog oticaja | da | da | da | da | da | da |
| Pojava brazdi | ne | da | da | ne | da | ne |
| Pojava jaruga | ne | da | ne | ne | ne | ne |
| Klizišta | ne | ne | ne | ne | ne | ne |
| Način korišćenja zemljišta | uglavnom poljopriv. zemljište | uglavnom poljopriv. zemljište | uglavnom poljopriv. zemljište | uglavnom poljopriv. zemljište | uglavnom poljopriv. zemljište | različite vrste vegetacije |
| Rezultati | | | | | | |
| Prostorni prikaz erozionih procesa | da | da | da | ne | ne | da |
| Psamogram | ne | ne | ne | da | da | da |

Uporedni pregled jednačina za opisivanje hidroloških i psamoloških procesa na slivu dat je u tabeli 2.4.

Tabela 2.4. Jednačine za opisivanje erozije i transportnih nanosa na slivu [38]

| | Naziv programskog paketa | | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|--|--|
| | PROCES | ANSWERS | CREAMS | WEPP | KINEROS | EUROSEM | SHETRAN |
| Jednačine pri proračunu različitih procesa u vezi erozije i transporta nanosa | infiltracija | Modif. Holtanova j-na | SCS metoda | Mein-Larsonova metoda | Hillelova j-na | Hillelova j-na | Ričardsova j-na |
| | Evpotranspiracija | Ričijeva j-na | Ričijeva j-na | Ričijeva j-na | - | - | Penman-Montejeva |
| | Kretanje vode po površini terena | Kinematički i talas | Kinematički talas | Kinematički talas | Kinematički talas | Kinematički talas | Difuzioni talas |
| | Kretanje nanosa niz padine sliva i kroz hidrografsku mrežu | J-na kontinuiteta za ustaljeno kretanje nanosa | J-na kontinuiteta za ustaljeno kretanje nanosa | J-na kontinuiteta za ustaljeno kretanje nanosa | J-na kontinuiteta za neustaljeno kretanje nanosa | J-na kontinuiteta za neustaljeno kretanje nanosa | J-na kontinuiteta za neustaljeno kretanje nanosa |
| | Transportni kapacitet površ. oticaja i oticaja kroz reke | Yalinova j-na | Yalinova j-na | Yalinova j-na | Yalinova j-na, j-na Engelunda i Hansena | j-na Goversa | Yalinova j-na, j-na Engelunda i Hansena |

Iz priloženog pregleda nekoliko matematičkih modela oticaja i erozije može se zaključiti da postoje dva pristupa rešavanja problema procene količine erozije sa sliva. Sa jedne strane postoje modeli kontinualnih simulacija kojima se, osim oticaja i erozije tokom jedne kišne epizode, modelišu i događaji između kiša (CREAMS, WEPP, SHETRAN). Sa druge strane postoje i modeli kojima se modeliraju procesi od kišnih epizoda različitog trajanja (KINEROS2, EUROSEM, ANSWERS). Prva grupa modela sliv diskretizuje kao grid mrežu dok druga sliv tretira kao homogene površine uniformnih karakteristika. Svi modeli su predviđeni za procenu oticaja i erozije sa, uglavnom, poljoprivrednih površina veličine 1-2000 km². Modeli opisuju erozione procese pod uticajem kiše i površinskog oticaja dok modeli CREAMS, WEPP i EUROSEM opisuju i eroziju u brazdama. Jedino model CREAMS računa i eroziju u jarugama.

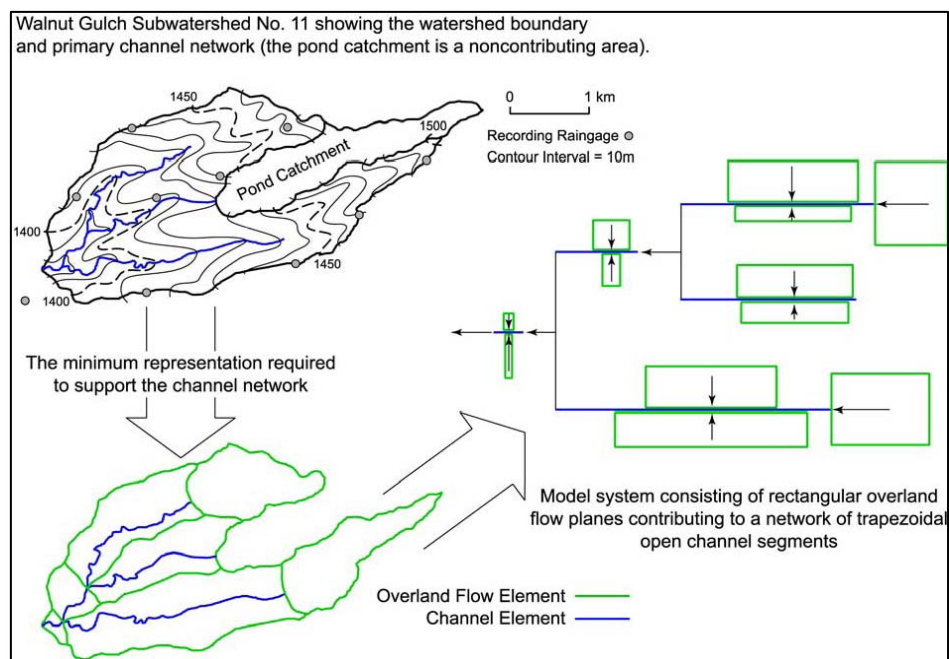
Za opisivanje hidroloških i psamoloških procesa na slivu modeli koriste slične jednačine. Kretanje vode po površini terena se u modelima opisuje empirijskim i jednačinama kinematskog talasa, osim u modelu SHETRAN koji koristi jednačine difuzionog talasa. Kretanje nanosa niz padine sliva i kroz hidrografsku mrežu opisano je jednačinom kontinuiteta za ustaljeno (ANSWERS; CREAMS i WEPP), odnosno neustaljeno kretanje nanosa (KINEROS2, EUROSEM i WEPP). Transportni

kapacitet površinskog i oticaja kroz reke modelira se upotrebom jednačina Yalin-a, Engelund-Hansena i Goversa.

Odluka o primeni određenih modela, empirijskih ili matematičkih, zavisi od stepena raspoloživih podataka merenja klimatskih, topografskih, pedoloških, geoloških i vegetacionih uslova na slivu. Iz priloženog pregleda matematičkih modela oticaja i erozije može se zaključiti da rade na vrlo sličnim principima. U ovom radu model KINEROS2 je odabran za kalibraciju odnosno verifikaciju merenja oticaja i erozije. Naime, na osnovu pregledane literature ([39], [41], [42]) zaključeno je da model može uspešno da reprodukuje hidrograme oticaja i psamograme a na izbor je uticala i dostupnost izvornog koda. Detaljniji opis ovog modela dat je u nastavku.

2.4.1. KINEROS2 (The KINEmatic Runoff EROSION Model)

KINEROS2 je distributivan, fizički zasnovan model koji opisuje procese intercepcije, infiltracije, površinskog oticaja i erozije sa sliva pod dominantnim uticajem površinskog toka [42]. Model je nastao 1995. godine kao rezultat istraživanja oticaja i erozije stručnjaka iz U.S. Department of Agriculture (USDA), Agricultural Research Service (ARS) i Southwest Watershed Research Center (SWRC). Prva verzija modela objavljena je 1970. godine i omogućavala je samo proračun oticaja. Kombinovanjem sa modelom infiltracije, 1974. godine je objavljen model KINGEN. Uključivanjem modela erozije i transporta sedimenata, konačna verzija modela KINEROS objavljena je 1990. godine. Konačno, dodatnim istraživanjima i poboljšanjima, 1995. godine objavljen je model KINEROS2. Konceptija modela se zasniva na podeli sliva na kaskadno poređane nizove površina i kanala preko kojih se oticaj propagira nizvodno koristeći metodu konačnih razlika za rešavanje 1-D jednačina kinematskog talasa.



Slika 2.22. Šematski prikaz kreiranja elemenata KINEROS2 modela[42]

Glavni nedostatak modela je nedovoljna formulacija raspodele vlažnosti zemljišta pri dužim beskišnim periodima kao i ne uzimanje u obzir gubitaka na isparavanje [43]. Preporuka je da se model koristi na poljoprivrednim i urbanim slivovima površine do 1000 ha.

KINEROS2 je program otvorenog koda (open source) i dostupan je na internetu u slobodnoj verziji.

2.4.1.1. Padavine

Padavine predstavljaju ulazne podatke za modeliranje oticaja. Unose se kao parovi vreme-visina ili vreme-intenzitet. Modeliraju se kao prostorno ravnomerne preko svakog zasebnog sliva.

2.4.1.2. Intercepcija

Intercepcija se u modelu kontroliše pomoću dva parametra: količinom padavina zadržanoj na vegetaciji ili procentom površine koja je prekrivena određenom vegetacijom. U prvom slučaju zadaje se visina „izgubljenih“ padavina a u drugom procenat redukcije padavina (slika 2.23).

Table 1.
Interception depths (I)

| Vegetative cover | Height | | I | | Reference |
|--------------------|--------|----|-----------|-------------------|--|
| | m | ft | mm | in | |
| Corn | 1.82 | 6 | 0.76 | ¹ 0.03 | Horton (1919) |
| Tobacco | 1.22 | 4 | 1.8 | ¹ .07 | Horton (1919) |
| Small grains | .91 | 3 | 4.1 | ¹ .16 | Horton (1919) |
| Meadow grass | .30 | 1 | 2.0 | ¹ .08 | Horton (1919) |
| Alfalfa | .30 | 1 | 2.8 | ¹ .11 | Horton (1919) |
| Grass (fescue) | -- | -- | 1.0 - 1.2 | .04 - .048 | Burgy and Pomeroy (1958) |
| Mixed hardwoods | -- | -- | .5 - 1.8 | .02 - .07 | Horton (1919) |
| Apple | -- | -- | .5 | .02 | Calheiros de Miranda and Butler (1986) |
| Big bluestem grass | .6 | 2 | 2.3 | .09 | Clark (1940) |
| Bluegrass | -- | -- | 1.0 | .04 | Haynes (1940) |
| Tarbrush | -- | -- | 3.0 | ² .12 | Tromble (1983) |

¹For 1-in (25.4-mm) storms.
²Depth of water per crown projected area.

Slika 2.23. Preporučene vrednosti intercepcije [41]

2.4.1.3. Infiltracija

U modelu, infiltracija se može modelisati za najviše dva sloja zemljišta konačnih debljina. Javlja se usled padavina ili od površinskog zadržavanje vode u depresijama. U nastavku je opisan model infiltracije za slučaj jednoslojevitog homogenog zemljišta.

Potencijalna infiltracija, f_c , predstavlja intenzitet kojim zemljište upija vodu u slučaju neograničenog dotoka vode. Infiltracija, f , je jednaka padavinama, $r(t)$, sve dok padavine ne dostignu limit f_c , tada se javlja i površinski oticaj. Infiltracija se modeliše Parlange-ovim tro-parametarskim modelom. Dva osnovna parametra modela su koeficijent filtracije zasićenog zemljišta, K_s i kapilarna konstanta G , dok treći parametar čini težinski faktor γ . Osnovni model predstavlja stanje u određenim vremenskim trenucima i glasi:

$$f_c = K_s \left[1 + \frac{\gamma}{\exp\left(\frac{\gamma I}{G \Delta \theta_i}\right) - 1} \right] \quad (2.20)$$

gde su:

f_c – intenzitet infiltracije (cm/h),

Pregled literature

K_s – koeficijent filtracije zasićenog zemljišta (cm/h) (slika 2.24),

γ – težinski faktor ($\gamma=0.85$)

G – parametar zavisian od vrste zemljišta,

θ_i – deficit saturacije,

I – sumarna infiltracija (cm).

| | $\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$ | | | cm/h | in/h |
|-----------------|-----------------------------------|-------|------|------|------|
| Sand | 0.437 0.374 - 0.500 | 0.045 | 0.95 | 21.0 | 8.3 |
| Loamy sand | .437 .368 - .506 | .080 | .92 | 6.1 | 2.4 |
| Sandy loam | .453 .351 - .555 | .09 | .91 | 2.6 | 1.0 |
| Loam | .463 .375 - .551 | .06 | .94 | 1.3 | .52 |
| Silt loam | .501 .420 - .582 | .03 | .97 | .68 | .27 |
| Sandy clay loam | .398 .332 - .464 | .17 | .83 | .43 | .17 |
| Clay loam | .464 .409 - .519 | .16 | .84 | .23 | .09 |
| Silty clay loam | .471 .418 - .524 | .08 | .92 | .15 | .06 |
| Sandy clay | .430 .370 - .490 | .25 | .75 | .12 | .05 |
| Silty clay | .479 .425 - .533 | .12 | .88 | .09 | .04 |
| Clay | .475 .427 - .523 | .19 | .81 | .06 | .02 |

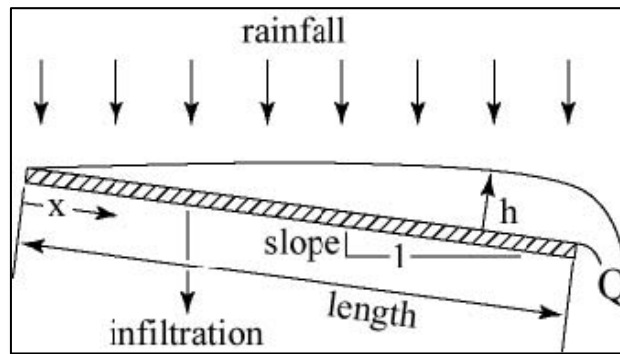
¹Obtained by analysis of data presented in Rawls et al. (1982).

²Arithmetic mean obtained from arithmetic means of soil characteristics in Rawls et al. Geometric mean is obtained by taking the antilog of the mean of the logarithms of the same data. Range shown below each value is approximately \pm one standard deviation.

Slika 2.24. Preporučene vrednosti koeficijenta filtracije [41]

2.4.1.4. Površinski oticaj vode

U modelu, površinski oticaj se javlja na dva načina. U prvom slučaju, intenzitet kiše je veći od intenziteta infiltracije. U drugom slučaju, ukoliko je tlo slojevito i kada je donji sloj zemljišta manje vodopropusnosti od pokrovnog sloja, dolazi do punjenja pora pokrovnog sloja i pojave površinskog oticaja.



Slika 2.25. Šema nastanka površinskog oticaja [41]

Oticaj se modelira kao 1-D proces jednačinama kinematskog talasa. Izrazom (2.21) data je jednačina kontinuiteta a izrazom (2.22) dinamička jednačina. Ove jednačine su poznate i kao Saint Venant-ove jednačine.

Jednačina kontinuiteta

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x, t) \quad (2.21)$$

Dinamička jednačina:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0 \quad (2.22)$$

gde je:

h – dubina vode u preseku (m),

t – vreme (s),

Q – protok (m^3/s),

q – lateralni dotok po jedinici širine ($\text{m}^2/\text{s m}'$)

x – rastojanje (m),

A – površina poprečnog preseka (m^2),

g – gravitaciono ubrzanje (m/s^2),

S_o – nagib dna,

S_f – nagib linije energije

Pregled literature

Jednačine kinematskog talasa su pojednostavljene Saint Venant-ove jednačine i one ne sadrže sve osobine kompleksnih jednačina. Međutim, ove jednačine su odlična aproksimacija za većinu uslova pri kojima se javlja površinski oticaj. U jednačini (2.22) kinematski talas je dat izrazom:

$$g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2.23)$$

odnosno:

$$S_0 = S_f \quad (2.24)$$

U modelu KINEROS2, nagib linije energije se računa preko izraza [42]:

$$q = \alpha h^m \quad (2.25)$$

gde je:

q – oticaj po jedinici širine (m^2/s),

$\alpha = \frac{S_0^{\frac{1}{2}}}{n}$, $m = \frac{5}{3}$, - ako se koristi Manning-ov zakon otpora,

$\alpha = CS_0^{\frac{1}{2}}$, $m = \frac{3}{2}$ - ako se koristi Chezy-jev zakon otpora.

S_0 – nagib slivne površine,

n – Manning-ov koeficijent hrapavosti ($m^{-1/3}s$),

C – Chezy-jev koeficijent hrapavosti ($m^{-1/2}s$).

| Surface | Laminar flow (k_o) | Turbulent flow | |
|---------------------------------|------------------------|----------------|----------------------------|
| | | Manning's n | Chezy C |
| | | | $\text{ft}^{1/2}/\text{s}$ |
| Concrete or asphalt | 24 - 108 | 0.01 - 0.013 | 73 - 38 |
| Bare sand | 30 - 120 | .01 - .016 | 65 - 33 |
| Graveled surface | 90 - 400 | .012 - .03 | 38 - 18 |
| Bare clay-loam soil (eroded) | 100 - 500 | .012 - .033 | 36 - 16 |
| Sparse vegetation | 1,000 - 4,000 | .053 - .13 | 11 - 5 |
| Short grass prairie | 3,000 - 10,000 | .10 - .20 | 6.5 - 3.6 |
| Bluegrass sod | 7,000 - 40,000 | .17 - .48 | 4.2 - 1.8 |

Slika 2.26. Preporučene vrednosti koeficijenta hrapavosti [41]

Jednačina (2.25) u kombinaciji sa jednačinom kontinuiteta (2.21) glasi:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x, t) \quad (2.26)$$

gde je:

h – dubina vode (m),

t – vreme (s),

x – rastojanje u pravcu nagiba (m) i

q – lateralni dotok po jedinici širine ($\text{m}^2/\text{s m}'$).

Kao granični uslov na uzvodnom kraju, u najvećem broju slučajeva se zadaje dubina:

$$h(0, t) = 0 \quad (2.27)$$

Ukoliko na uzvodnom kraju postoji dotok sa druge površine, granični uslov je:

$$h(0, t) = \left[\frac{\alpha_u h_u(L, t)^{m_u} W_u}{\alpha W} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (2.28)$$

gde je:

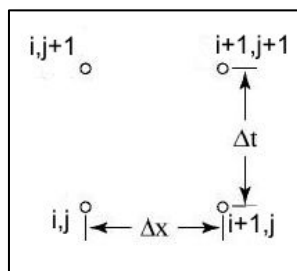
h – dubina vode (m)

u – indeks koji označava uzvodni elemenat sliva,

W – širina elementa (m) i

L – dužina elementa (m).

Za diskretizaciju jednačina kinematskog talasa KINEROS2 koristi šemu četiri tačke (slika 2.27).



Slika 2.27. Diskretizaciona šema [41]

Diskretizovana jednačina (2.26) glasi:

$$\frac{2\Delta t}{\Delta x} \left\{ \theta_w \left[\alpha_{j+1}^{i+1} (h_{j+1}^{i+1})^m - \alpha_j^{i+1} (h_j^{i+1})^m \right] + \right. \\ \left. (1 - \theta_w) \left[\alpha_{j+1}^i (h_{j+1}^i)^m - \alpha_j^i (h_j^i)^m \right] \right\} - \Delta t (\bar{q}_{j+1} + \bar{q}_j) = 0 \quad (2.29)$$

gde je:

h – dubina vode (m),

i,j – indeksi za označavanje prostornog i vremenskog koraka,

θ_w – težinski parametar čije se vrednosti kreću od 0.6 – 0.8,

Δt – vremenski priraštaj (s),

q – lateralni dotok po jedinici širine (m²/s m')

Jednačine se rešavaju Newton-Raphson-ovim iterativnim postupkom. Dok je rešenje bezuslovno stabilno, tačnost zavisi od veličine prostornog i vremenskog koraka koji se koristi.

2.4.1.5. Oticaaj kroz kanale

Neustaljeno tečenje u kanalima sa slobodnom površinom takođe je predstavljeno jednačinama kinematskog talasa. Kanali mogu primati doticaj sa površina celom bočnom dužinom sa jedne ili obe strane kanala, iz jednog ili dva kanala na uzvodnom kraju i sa površine na uzvodnom kraju kanala.

Jednačina kontinuiteta za kanal sa bočnim dotokom glasi:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_c(x, t) \quad (2.30)$$

gde je:

A – površina poprečnog preseka (m^2),

Q – protok (m^3/s),

q_c – lateralni dotok po jedinici dužine kanala ($m^2/s m'$).

Jednačina (2.30) može da se napiše u sledećem obliku:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial x} = q_c(x, t) \quad (2.31)$$

Kinematska pretpostavka je oličena u zavisnosti između proticaja i površine poprečnog preseka kanala kao:

$$Q = \alpha R^{m-1} A \quad (2.32)$$

gde je:

Q – protok (m^3/s)

R – hidraulički radijus (m)

A – površina poprečnog preseka (m^2),

α i m – parametri zavisni od načina obračuna otpora trenja.

Kinematske jednačine za za kanale rešavaju se sličnom tehnikom kao i jednačine za površinski oticaj s tim što se umesto h , koristi A .

$$\frac{2\Delta t}{\Delta x} \left\{ \begin{array}{l} A_{j+1}^{i+1} - A_{j+1}^i + A_j^{i+1} - A_j^i + \\ \theta_w \left[\frac{dQ^{i+1}}{dA} (A_{j+1}^{i+1} - A_j^{i+1}) \right] + \\ (1-\theta) \left[\frac{dQ^i}{dA} (A_{j+1}^i - A_j^i) \right] \end{array} \right\} - \quad (2.33)$$

$$0.5\Delta t (q_{cj+1}^{i+1} + q_{cj}^{i+1} + q_{cj+1}^i + q_{cj}^i) = 0$$

gde je:

A – površina poprečnog preseka (m²),

i,j - indeksi za označavanje prostornog i vremenskog koraka,

Δt – vremenski priraštaj (s),

Δx – prostorni priraštaj (m),

Q – protok (m³/s),

θ_w – težinski parametar i

q – lateralni dotok po jedinici dužine kanala (m²/s m').

Jednačine se rešavaju Newton-Raphson-ovim iterativnim postupkom.

2.4.1.6. Erozija i sedimentacija

KINEROS2 zasebno računa eroziju usled erozionog dejstva kiše i eroziju usled tečenja vode – hidraulička erozija. Erozija se računa kako za slivne površine tako i za kanale.

Jednačina koja opisuje kretanje sedimenata je jednačina kontinuiteta koja je slična kinematskoj jednačini tečenja vode:

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x,t) = q_s(x,t) \quad (2.34)$$

gde je:

C_s – koncentracija sedimenata (m³/m³),

Q – protok (m^3/s),

A – površina poprečnog preseka (m^2),

e – intenzitet erozije (m^2/s),

q_s – intenzitet lateralnog dotoka sedimenata u kanale ($\text{m}^2/\text{s m}'$).

Za površinske elemente, pretpostavka je da se e sastoji iz dve osnovne komponente – produkcije erodovanog zemljišta usled kiše, e_s i hidrauličke erozije (ili taloženja), e_h , usled odnosa tangencijalnih sila i gravitacije. S toga, e može biti pozitivno (povećanje koncentracije nanosa u vodi) ili negativno (taloženje). Ukupna erozija predstavlja sumu erozije erozionim dejstvom kiše i hidrauličke erozije:

$$e = e_s + e_h \quad (2.35)$$

Na osnovu malog broja eksperimentalnih istraživanja, erozija kišom se može prikazati kao:

$$\begin{aligned} e_s &= c_f k(h) r^2 & ; & \quad q > 0 \\ e_s &= 0 & ; & \quad q < 0 \end{aligned} \quad (2.36)$$

gde je:

e – intenzitet erozije (m^2/s),

e_s – erozija usled kiše (m^2/s),

e_h – hidraulička erozija (m^2/s),

$c_f = 422 * K_{USLE}(\Phi_f)$ – erodibilnost zemljišta - konstanta vezana za zemljište i osobine površine,

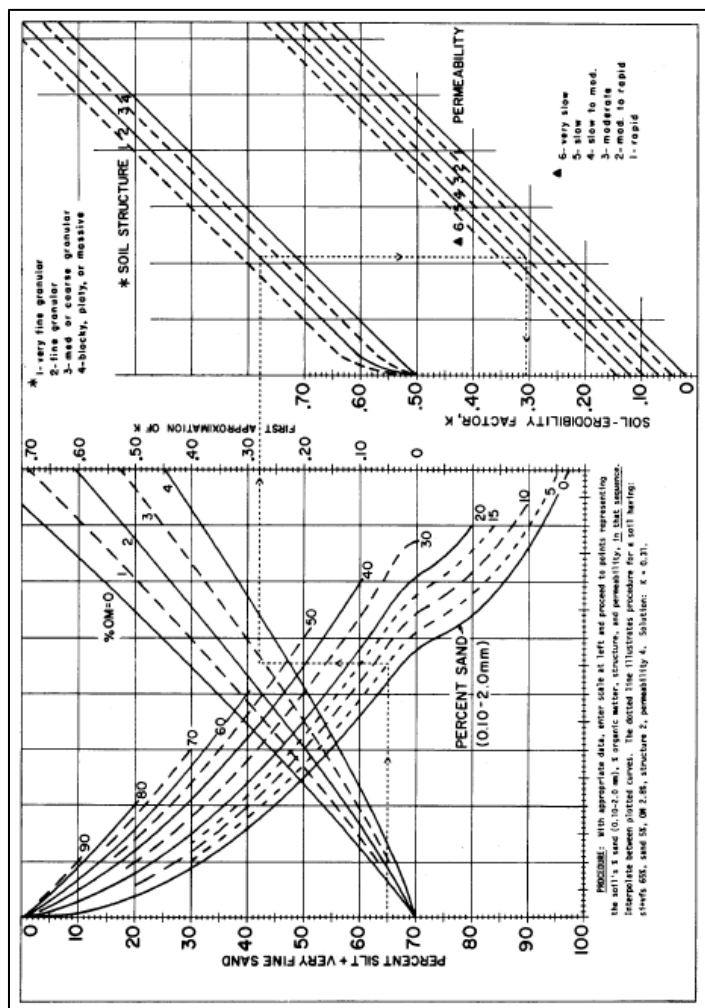
K_{USLE} – vrednost faktora K iz USLE modela,

Φ_f – faktor ublaženja erozije biljnim pokrivačem,

$k(h) = \exp(-c_h h)$ – redukcionni faktor erozije kišom usled povećavanja dubine vode

($k(h) = 1$ pre početka oticaja, $k(h) = 0$ za velike dubine vode,

c_h – faktor umirenja erozije slojem vode na površini terena.



Slika 2.28. Određivanje faktora K_{USLE} [41]

Za hidrauličku eroziju, KINEROS2 polazi od pretpostavke da za određene uslove tečenja vode (brzina, dubina, nagib...) postoji koncentracija nanosa koja može biti transportovana ukoliko se ti uslovi nastave – transportni kapacitet. Hidraulička erozija, e_s je linearno proporcionalna razlici između transportnog kapaciteta i trenutne koncentracije nanosa.

$$e_h = c_g (C_m - C_s) A \quad (2.37)$$

gde je:

e_h – hidraulička erozija (m^2/s),

C_m – transportni kapacitet,

$C_s(x,t)$ – trenutna, lokalna koncentracija nanosa,

c_g – koeficijent intenziteta pronosa ($1/s$).

Za proračun transportnog kapaciteta koristi se modifikovana jednačina Govers-a:

$$C_m = \frac{0.05}{d(\gamma_s - 1)^2} \sqrt{\frac{Sh}{g}} (\Omega - \Omega_c) \quad (2.38)$$

gde je:

d – prečnik zrna (m),

γ_s - specifična težina čestica u suspenziji (N/m³),

S – nagib linije nivoa,

h – dubina vode (m),

Ω – jedinična snaga toka (m/s),

u – brzina vode (m/s),

Ω_c – granična jedinična snaga toka za male dubine tečenja (m/s).

Jednačine 2.34-2.38 se rešavaju numerički za svaki vremenski korak. Za rešavanje se koristi metoda četiri tačke. U ovom slučaju iteracije nisu potrebne jer su poznate trenutne i vrednosti iz prethodnog koraka za A i Q kao i prethodne vrednosti za C_s , što šemu čini eksplicitnom.

Ovakav proračun erozije koristi se i za površinsku eroziju i za eroziju u kanalima. Kod erozije u kanalima, član koji obračunava eroziju kišom e_s se zanemaruje zbog dubine vode u kanalu, dok član q_s postaje važan u smislu prikazivanja lateralnog dotoka.

2.4.2. Primeri primene modela KINEROS2

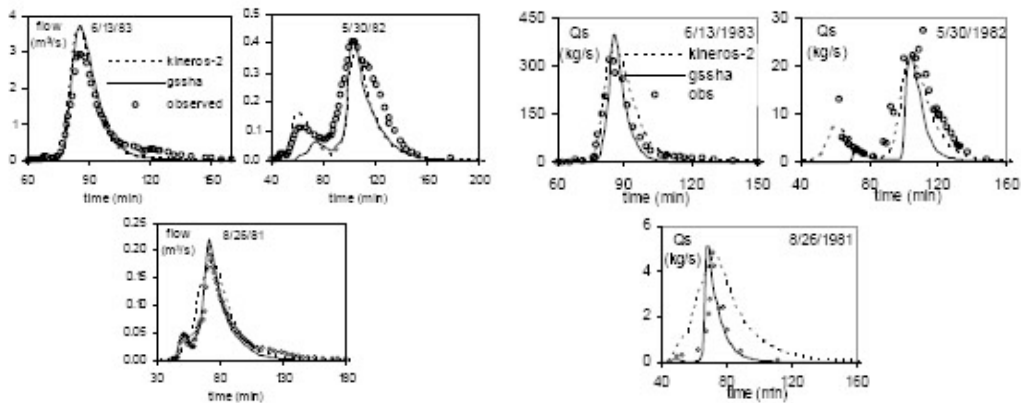
Na eksperimentalnom slivu Lucky Hills 106, koji se nalazi u okviru sliva Walnut Gulch, a kojim upravlja USDA (United States Department of Agriculture) vršeno je merenje oticaja i erozije [44]. Veličina sliva iznosi 3490 m², sliv je pokriven žbunastim rastinjem a zemljište se sastoji od peskovite ilovače i ilovače. Oba tipa zemljišta sadrže veliki procenat stena. Cilj studije je bio utvrđivanje efekata geometrijskog pojednostavljenja sliva u modelu KINEROS na rezultate erozije i oticaja zadržavajući sve parametra modela istim. Za analizu su korišćene tri kišne epizode sa visinama padavina od 16.5 – 30.7 mm i intenzitetima 50.8 – 133.4

mm/h. Sliv je podeljen na modele sa jednim, 9, 25 i 30 elemenata. Rezultati analize pokazuju da se pri velikim intenzitetima kiše uticaj geometrije sliva smanjuje u odnosu na kiše malih intenziteta. Razlog za to leži u činjenici da veliki intenziteti kiše praktično neutrališu uticaj infiltracije čime se gubi lokalni karakter elementa sliva.

Mereni rezultati oticaja i erozije sa sliva Catsop u Holandiji su korišćeni za kalibraciju i verifikaciju modela KINEROS2 [45]. Analiza osetljivosti modela na promenu vrednosti parametara kohezije, koeficijenta filtracije, hrapavosti površine i faktora erozionog dejstva kiše, takođe je bila predmet studije. Za potrebe modela, sliv veličine 41.2 ha je podeljen na 47 slivnih površina i 11 kanala. Analizom osetljivosti je utvrđeno da na vrednosti oticaja i erozije najviše utiču koeficijent filtracije i Manning-ov koeficijent hrapavosti. Variranjem vrednosti ovih faktora za $\pm 10\%$, oticaj odnosno erozija se menjaju u granicama od $\pm 7 - 14\%$. Za kalibraciju modela na raspolaganju je bilo šest kišnih epizoda sa merenim vrednostima proticaja i erozije. Visine padavina u ovom setu podataka su se kretale od 8.9 – 27.2 mm sa intenzitetima od 12 – 36 mm/h. Set za verifikaciju modela se takođe sastojao od 6 kišnih epizoda, visine padavine 11.3 – 23 mm i intenziteta 18 – 144 mm/h. Rezultati kalibracije i verifikacije ukazuju da se vrednosti parametara kohezije, koeficijenta filtracije i Manning-ovog koeficijenta hrapavosti kreću u očekivanim granicama, dok se vrednost faktora erodibilnosti zemljišta kreće u mnogo širim granicama od očekivanih. Po uputstvu modela KINEROS2, maksimalne vrednosti ovog faktora se kreću oko vrednosti od 200, dok je ova analiza pokazala da se vrednosti ovog parametra kreću u granicama od 10 – 20000 za razmatrane slučajeve. Na ovaj način postignuta je tačnost modela od 3-6%.

Dva modela oticaja sa sliva, KINEROS2 i GSSHA su analizirana i upoređivani sa merenim rezultatima oticaja i erozije sa sliva veličine 35 ha u Treynor-u, Iowa [43]. Nagibi se kreću u granicama od 2-4% u dolinama odnosno 12-16% na granicama sliva. Prosečan nagib sliva iznosi 8.4%. Površinski sloj zemljišta se sastoji od praškasto-ilovastog i praškasto-glinovito-ilovastog materijala. Na slivu se kontinualno, od 1964. godine uzgaja kukuruz. Modeli se razlikuju u načinu dekompozicije sliva. Dok KINEROS2 deli sliv na podslivove, GSSHA deli sliv na ćelije kroz koje propagira oticaj i nanos. Rezultat toga je mnogo kraće vreme rada

modela KINEROS2. Za kalibraciju oba modela korišćeni su sledeći parametri: Manning-ov koeficijent hrapavosti, koeficijent filtracije, visina intercepcije, početna vlažnost zemljišta, kohezija i faktor erozionog dejstva kiše. Radi uspešnog simuliranja oticaja vode parametri su usvojeni ponaosob za oba modela. Faktor erodibilnosti zemljišta za model KINEROS2 se kreće od 100 – 200 u zavisnosti od faze rasta kukuruza. Oba modela daju rezultate koji odstupaju od merenih vrednosti za najviše 20%.



Slika 2.29. Uporedni prikaz merenih i simuliranih rezultata oticaja i erozije [43]

Poglavlje 3

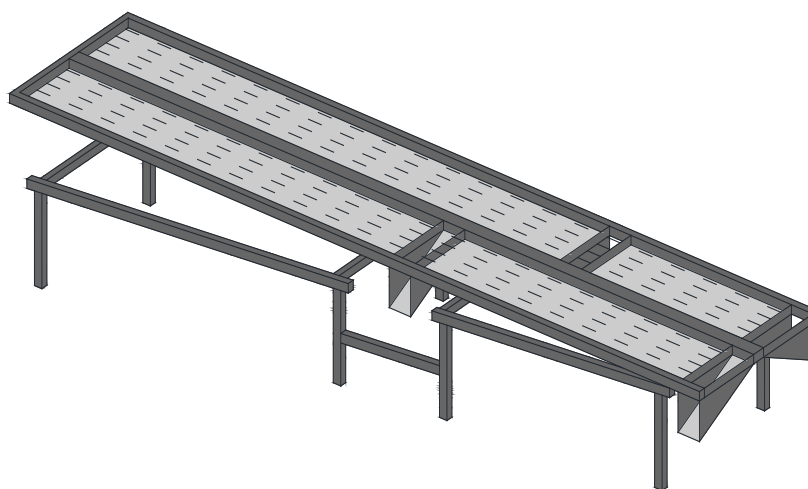
3. Eksperimentalna instalacija, kalibracija i postupci merenja

3.1. Opis instalacije

Eksperimentalna instalacija sastoji se iz:

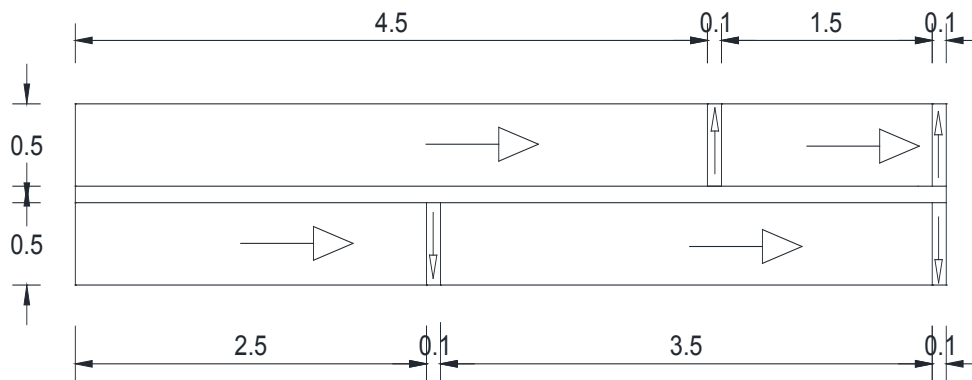
- slivne površine sa podesivim nagibom kosine i
- simulatora kiše sa mlaznicama pod pritiskom.

Slivna površina izrađena je u ukupnoj dužini od 6 metara, širine 1 metar i izdijeljena je na četiri nezavisna dela (Slika 3.1). Svaki od četiri dela predstavlja kutiju za smeštaj zemljišta. Dužine kutija su 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m, širina svake kutije iznosi 0.5 m a dubina 7 cm. Na kraju svake kutije nalazi se slivnik za prikupljanje erodovanog zemljišta i površinskog oticaja.



Slika 3.1. Slivna površina – šematski prikaz

Dno slivne površine je izrađeno od čeličnih cevi kvadratnog preseka i limova. Cevi su perforirane i služe za dovod vode kojom se zemljište natapa pre izvođenja opita i za drenažu tokom opita. Na uzvodnom kraju slivne površine nalaze se posude koje su spojene sa cevima i kroz koje se vrši natapanje zemljišta. Na nizvodnom kraju se nalaze ventili za ispuštanje vode iz cevi.

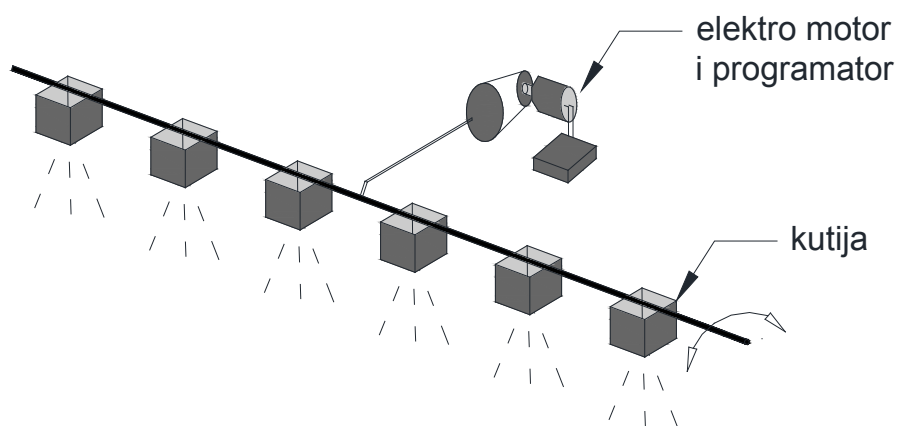


Slika 3.2. Slivna površina - dimenzije

Podešavanje nagiba slivne površine omogućeno je pomoću obrtnog mehanizma koji se nalazi na nizvodnom kraju instalacije i dizalice koja se nalazila na uzvodnom kraju. Na ovaj način omogućeno je izvođenje opita u rasponu nagiba od 0° do 45° (0% - 100%).

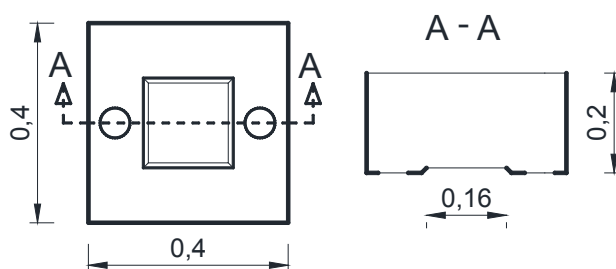
Simulator koristi šest mlaznica VeeJet 80100 koje su postavljene na horizontalnu cev prečnika 50 mm i dužine 6 m. Odabrani prečnik cevi, zbog male brzine tečenja vode, omogućava održavanje konstantnog pritiska vode od 0.4 bara na svim mlaznicama. Na sredini cevi, između mlaznica 3 i 4, nalazi se priključak za dovod vode.

Mlaznice se nalaze na međusobnom rastojanju od 100 cm i postavljene su na visinu od 4.5 m od podloge u horizontalnom položaju (slika 3.3). Mlaznice su postavljene na visinu koja je nešto veća od navedenih u literaturi kako bi se eksperimenti mogli sprovesti i pri velikim nagibima površine. Na ovaj način, kišnim kapima je ostavljeno dovoljno prostora da dostignu konstantnu brzinu i da vertikalno padnu na površinu.



Slika 3.3. Simulator kiše

Ispod svake mlaznice nalazi se kutija za redukovanje intenziteta kiše (slika 3.4). Kutija je dimenzija 0,4x0,4x0,2 m. Sa gornje strane je u potpunosti otvorena, dok se sa donje strane nalaze tri otvora. Kroz srednji otvor, dimenzija 0.16x0.16 m, voda iz mlaznice pada na eksperimentalnu podlogu dok dva manja otvora služe za odvođenje viška vode iz kutije nazad u rezervoar.



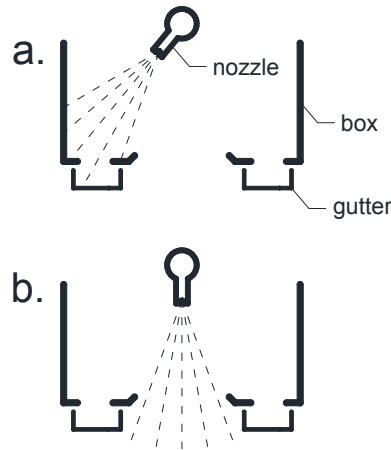
Slika 3.4. Kutija za redukovanje intenziteta kiše

Zapremina rezervoara za snabdevanje vodom simulatora iznosi 500 litara. Iz njega se pomoću centrifugalne pumpe voda dovodi do cevi sa mlaznicama. Pomoću ventila koji se nalaze nizvodno od pumpe vrši se regulacija pritiska u sistemu.

Sistem za upravljanje simulatora kiše sastoji se iz elektromotora, programatora i dva lančanika sa lancem pomoću kojih se cev sa mlaznicama oscilatorno okreće. Pomoću ovog sistema moguće je okretati mlaznice za $\pm 45^\circ$ (slika 3.5) i vršiti promenu intenziteta kiše definisanjem vremena tokom kojeg će se mlaznica zaustaviti van otvora na kutiji.

Do ujednačavanja pritiska u sistemu, pre početka svake kiše, mlaznice se postavljaju u položaj u kom voda ne može da pada na podlogu – tzv. krajnji položaj

(slika 3.5 a). U ovom položaju mlaz vode ne prolazi kroz srednji otvor na kutiji, već odlazi do oluka koji tu vodu vraća nazad u rezervoar. Kada se pritisak u sistemu ustali na 0.4 bara, preko programatora se startuje motor koji vrši rotiranje cevi. Rotiranjem cevi se mlaznica pokreće, prelazi preko otvora kutije (slika 3.5 b) i dospeva u drugi krajnji položaj. Vremenom zadržavanja mlaznice u krajnjim položajima određuje se intenzitet kiše na eksperimentalnu podlogu.



Slika 3.5. a) krajnji položaj mlaznice, b) radni položaj mlaznice

Oscilovanjem mlaznice iznad kutije, pomoću ovog simulatora, moguće je ostvariti maksimalni intenzitet kiše od 186 mm/h (3.1 mm/min), što generalno pokriva najveće intenzitete kiša na našim prostorima (prema Zelenhasiću [46], intenziteti 100-godišnjih 10-minutnih kiša u Srbiji kreću se do 3.5 mm/min).

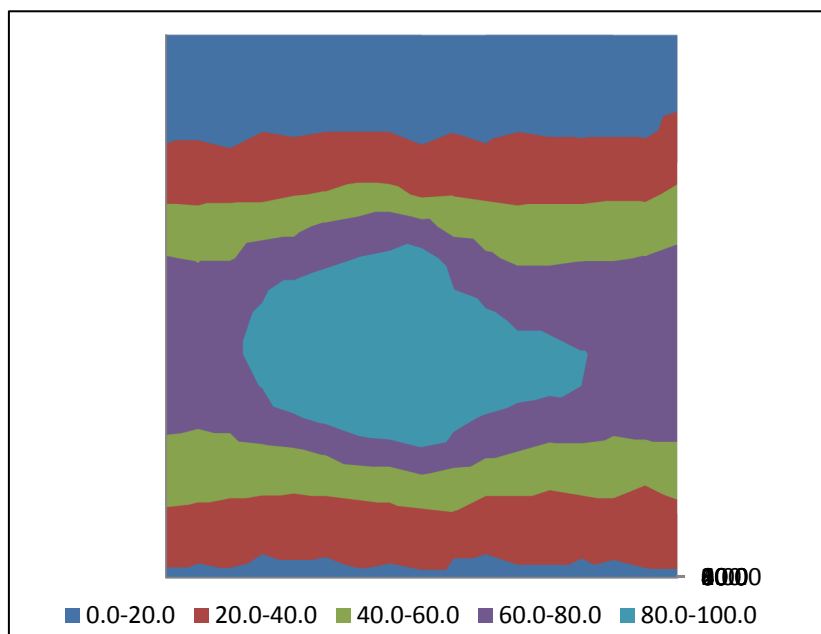
Maksimalna površina pokrivena simulatorom iznosi 6.0 m².

3.2. Kalibracija simulatora

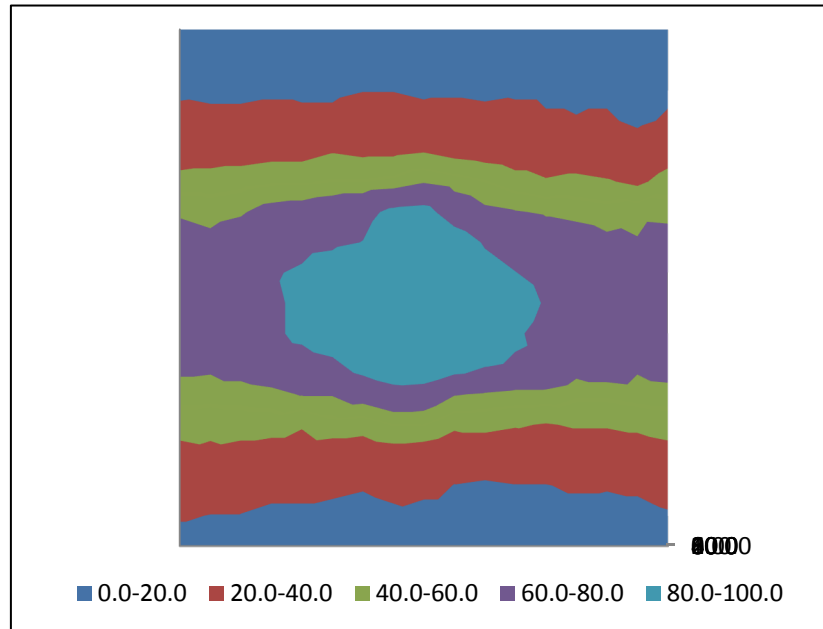
Kako bi rezultati opita bili međusobno uporedivi neophodno je da oni budu sprovedeni pod istim uslovima odnosno istim intenzitetima kiše, istim rasporedom kiše po površini sliva, istom vlažnošću uzoraka zemljišta i istim nagibom. Ista vlažnost uzoraka i nagib slivne površine su postizani zasićivanjem i očeđivanjem zemljišta pre opita, odnosno postavljanjem graničnika do visine na koju se podiže uzvodni kraj instalacije. Za postizanje istih intenziteta i rasporeda kiše po površini izvršena je kalibracija simulatora.

VeeJet mlaznice, korišćene za opite, imaju otisak u obliku uske elipse. Ranije je rečeno da je minimalna visina na koju je potrebno postaviti ove mlaznice 3 m kako bi kapi vode vertikalno padale na tlo i kako bi dostigle konstantnu brzinu. U ovom slučaju mlaznice su postavljene na visinu od 4.5 m u odnosu na slivnu površinu u horizontalnom položaju. Na taj način je omogućen vertikalni pad kišnih kapi i u slučajevima kada je slivna površina u nagibu.

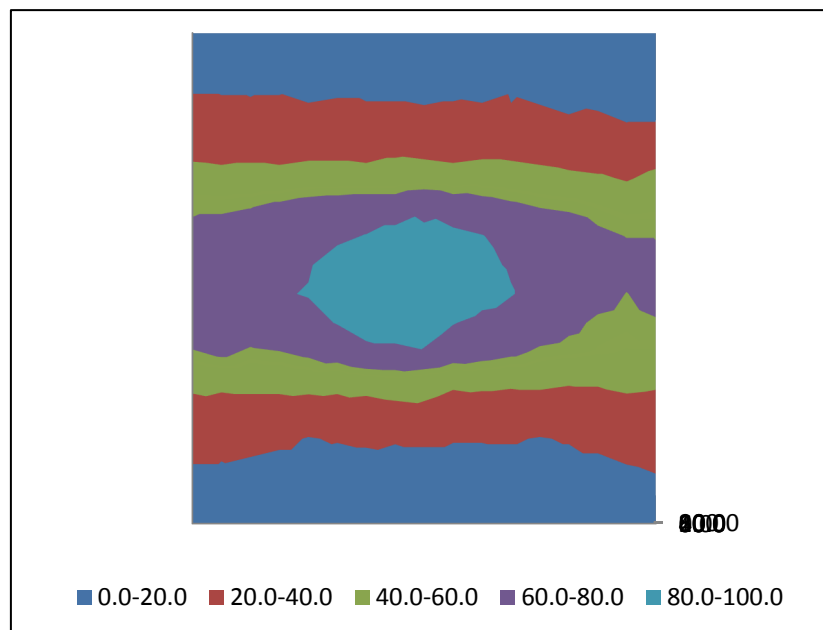
U prvoj fazi kalibracije ispitan je rad svake mlaznice zasebno bez rotiranja cevi. Ispod mlaznice, na površinu od 1x1 m, su postavljene posude prečnika 5 cm. Nakon ustaljenja pritiska na manometru od 0.4 bara, voda je zahvatana u posudama u periodu od 5 minuta. Merenjem težine vode u svakoj čašici određena je veličina otiska i raspodela količine vode po površini. Mlaznica je bila postavljena na 4 m visine u odnosu na posude. Rezultati ispitivanja prikazani su na slikama 3.6 – 3.12. Najviše vode nakupilo se u čašicama neposredno ispod mlaznice. Maksimalna količina vode u posudi, na slikama 3.6 – 3.12, predstavljena je kao 100%.



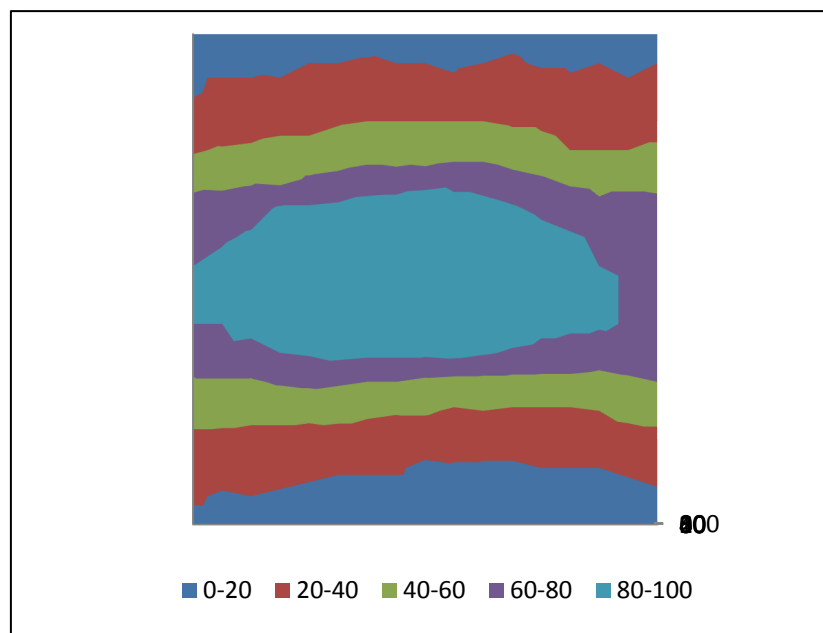
Slika 3.6. Raspodela vode u čašicama za mlaznicu broj 1 (% od maksimalne vrednosti)



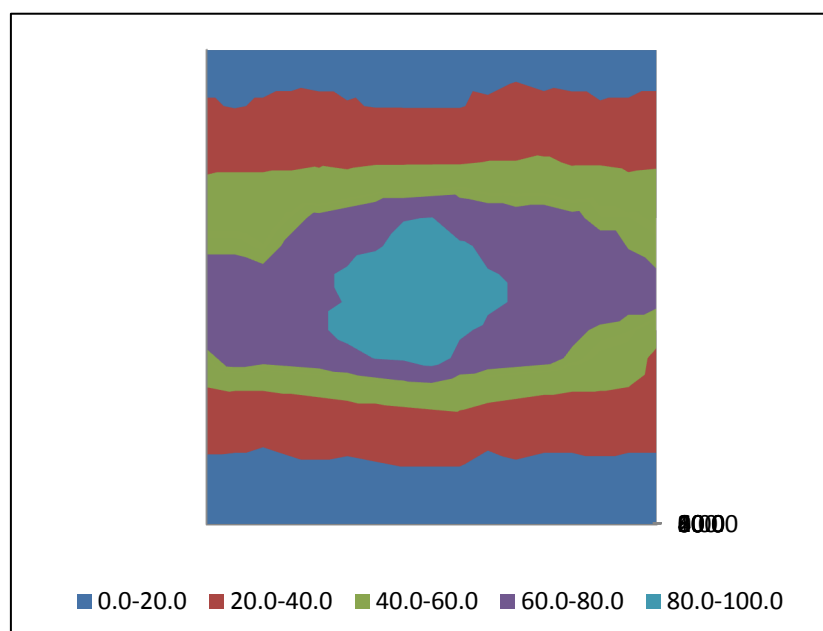
Slika 3.7. Raspodela vode u čašicama za mlaznicu broj 2 (% od maksimalne vrednosti)



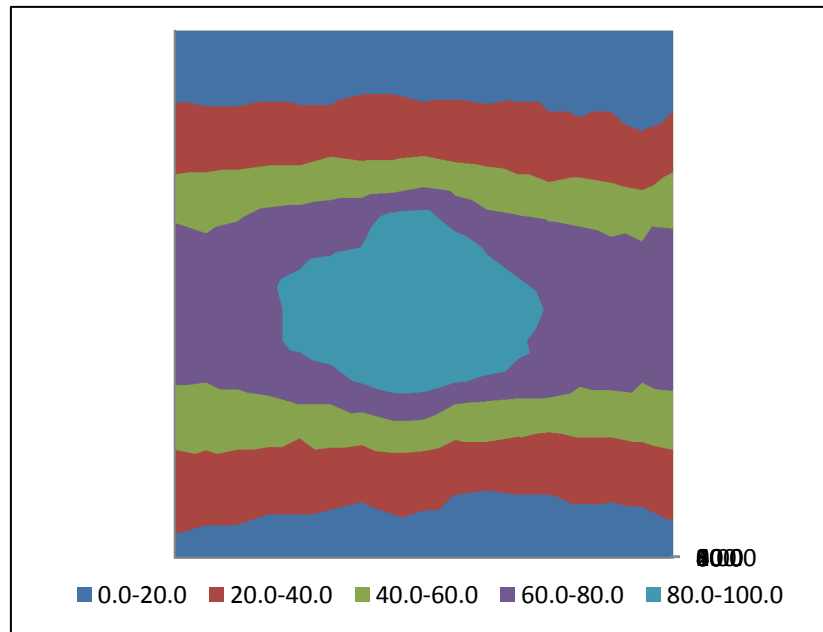
Slika 3.8. Raspodela vode u čašicama za mlaznicu broj 3 (% od maksimalne vrednosti)



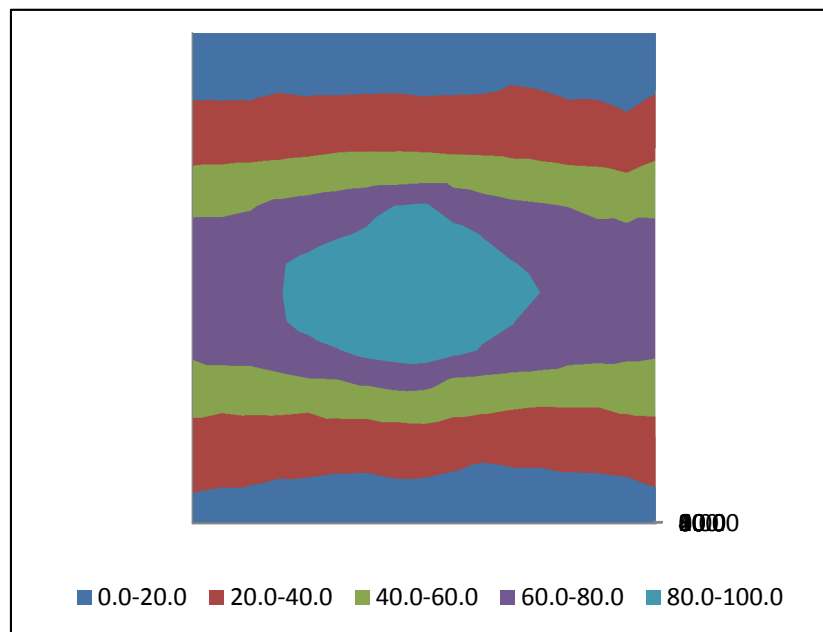
Slika 3.9. Raspodela vode u čašicama za mlaznicu broj 4 (% od maksimalne vrednosti)



Slika 3.10. Raspodela vode u čašicama za mlaznicu broj 5 (% od maksimalne vrednosti)



Slika 3.11. Raspodela vode u čašicama za mlaznicu broj 6 (% od maksimalne vrednosti)

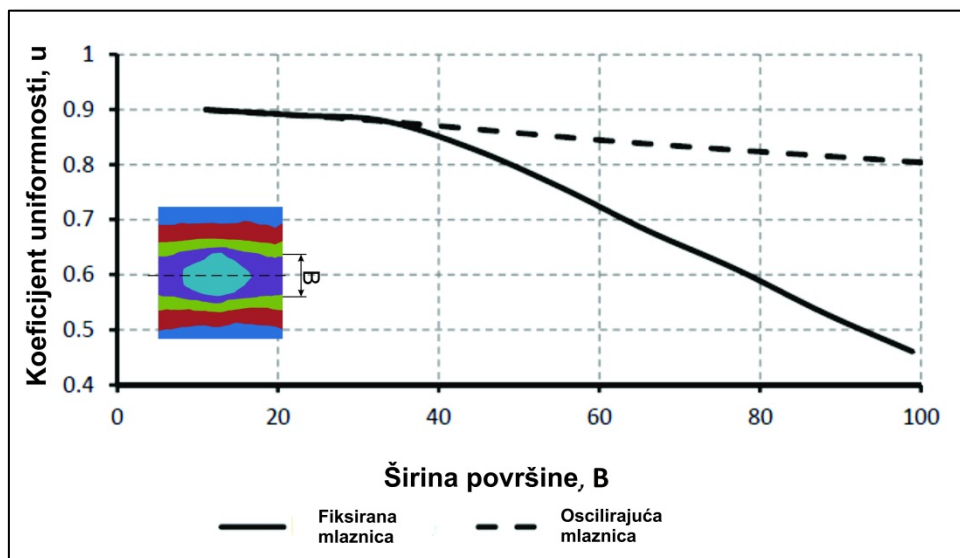


Slika 3.12. Prosečna raspodela vode (% od maksimalne vrednosti)

Promena količine vode po površini izraženija je u poprečnom u odnosu na podužni pravac zbog činjenice da je otvor na mlaznici elipsastog oblika. Christiansen-ov koeficijent ravnomernosti se kreće u granicama od 0.46 za površinu širine 1 metar do 0.9 za površinu širine 0.1 metar (slika 3.13). Dužina površine iznosi 1 metar.

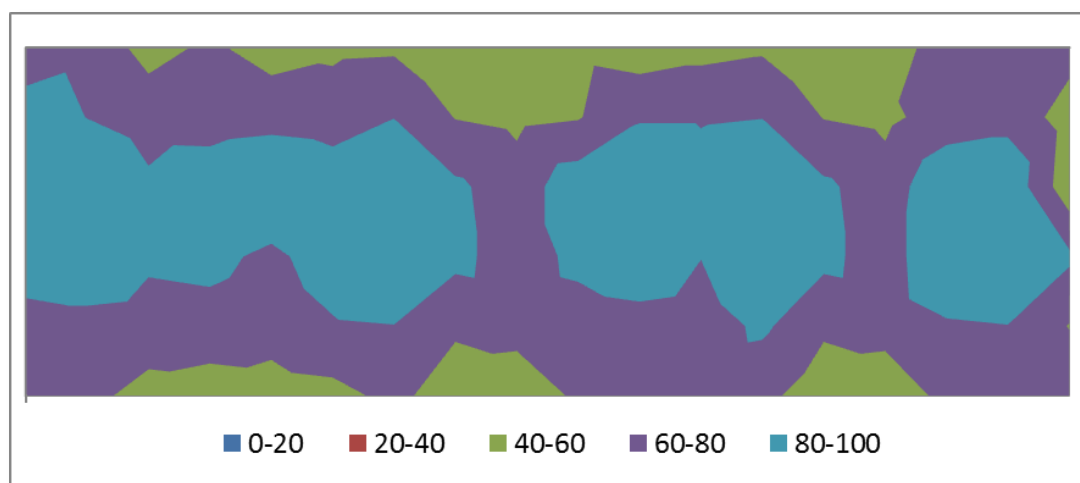
Kako bi se poboljšala vrednost Christiansen-ovog koeficijenta i umanjili veliki intenziteti kiše, uvodi se oscilovanje mlaznice iznad kutije sa otvorom.

Raspodela vode na površini za jednu oscilirajuću mlaznicu utvrđena je na identičan način kao i za stacionarnu. Christiansen-ov koeficijent ravnomernosti se kreće u granicama 0.8-0.9 za površine širine od 0.1-1.0 metar (slika 3.13). Dužina površine iznosi 1 metar.



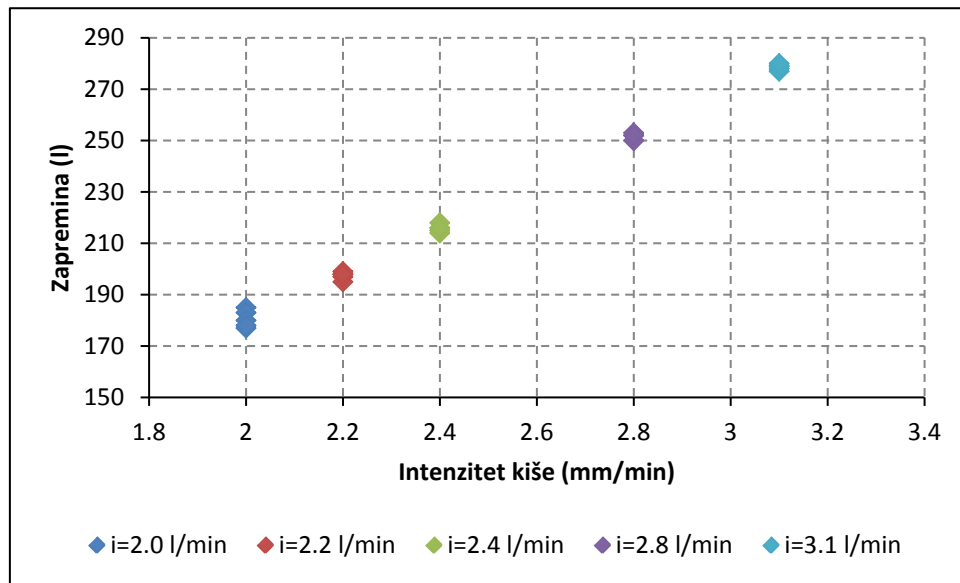
Slika 3.13. Christiansen-ov koeficijent za stacionarnu i oscilirajuću mlaznicu

Utvrđena je i raspodela vode na površinu veličine 6x1 metar pri istovremenom radu 6 oscilirajućih mlaznica na međusobnom rastojanju od 100 cm (slika 3.14). Za ovaj slučaj Christiansen-ov koeficijent uniformnosti iznosi 0.8.



Slika 3.14. Raspodela vode na slivnoj površini

Ispitana je i mogućnost simulatora da ponovi kišu određenog intenziteta. Kalibracija je izvedena pomoću metalnih tacni dubine 7 cm koje su postavljene na slivnu površinu. Pre puštanja pumpe u pogon mlaznice su bile postavljene u krajnji položaj, tako da kiša ne pada na tacne sve dok se pritisak ne ujednači na 0.4 bara. Kada se pritisak ujednači, pokreće se mehanizam za osciliranje i u vremenu od 15 minuta kiša pada na tacne. Nakon 15 minuta, mlaznice se ponovo postavljaju u krajnji položaj i meri se zapremina vode u tacni. Ovaj postupak je urađen 5 puta za svaki intenzitet kiše i rezultati su prikazani na slici 3.15.



Slika 3.15. Kalibracija simulatora kiše

Merenjem zapremine vode koja se nakupila na svakoj tacni u vremenskom intervalu od 15 minuta, pri intenzitetu kiše od 3.1 mm/min, dobijen je raspored kao u tabeli 3.1.

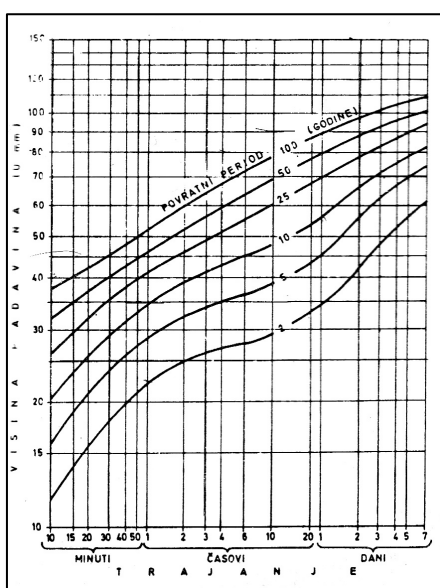
Tabela 3.1. Prosečne zapremine vode na slivnim površinama nakon 15 minuta

| | Polje | Prosečna zapremina (l) | Zapremina po m ² površine (l/m ²) |
|---|---------|------------------------|--|
| 1 | L=1.5 m | 33.75 | 45.0 |
| 2 | L=2.5 m | 58.00 | 46.5 |
| 3 | L=3.5 m | 81.75 | 46.7 |
| 4 | L=4.5 m | 105.25 | 46.8 |

3.3. Merne veličine i parametri

3.3.1. Padavine

Trajanje i intenzitet kiše predstavljaju promenljivu u procesu erozije. Kiše slabih intenziteta imaju slabu erozionu moć, dok se kiše velikog intenziteta javljaju relativno retko. Za analizu erozije su se koristile kiše trajanja 15 minuta koje pokrivaju povratne periode od 25 do preko 100 godina za meteorološku stanicu Palić [46]. Ti intenziteti su: 2.0 mm/min, 2.2 mm/min, 2.4 mm/min, 2.8 mm/min i 3.1 mm/min.



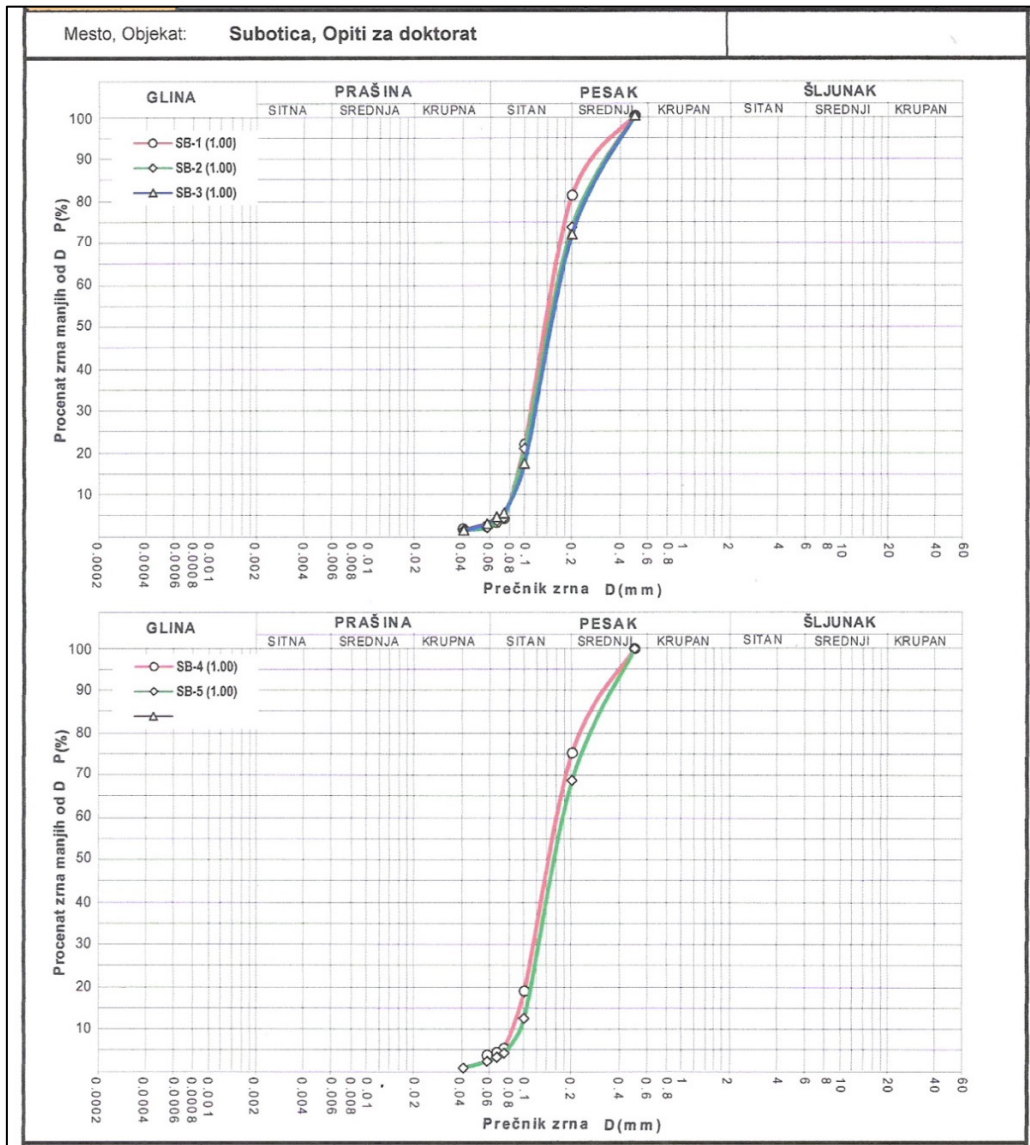
Slika 3.16. Računske padavine MS Palić [46]

3.3.2. Zemljište

U procesima istraživanja površinske erozije korišćene su različite vrste zemljišta: čist pesak, gline, poljoprivredna zemljišta ali i različita veštačka zemljišta. Iako je prvobitno predviđeno sprovođenje eksperimenata na tri različite vrste zemljišta, svi eksperimenti su sprovedeni na prirodnoj mešavini peska, karakterističnoj za region severne Bačke. Naime, nakon izvedenih eksperimenata na peskovitom zemljištu, tri merenja za jedan nagib i jedan intenzitet kiše (koliko je prvobitno bilo predviđeno zadatkom), rezultati su varirali u širokim granicama te su merenja proširena na 5 ponavljanja za svaku kombinaciju intenziteta i kiše i nagiba, a merenja na druga dva tipa zemljišta nisu izvođena. Takođe, postojala je bojazan da

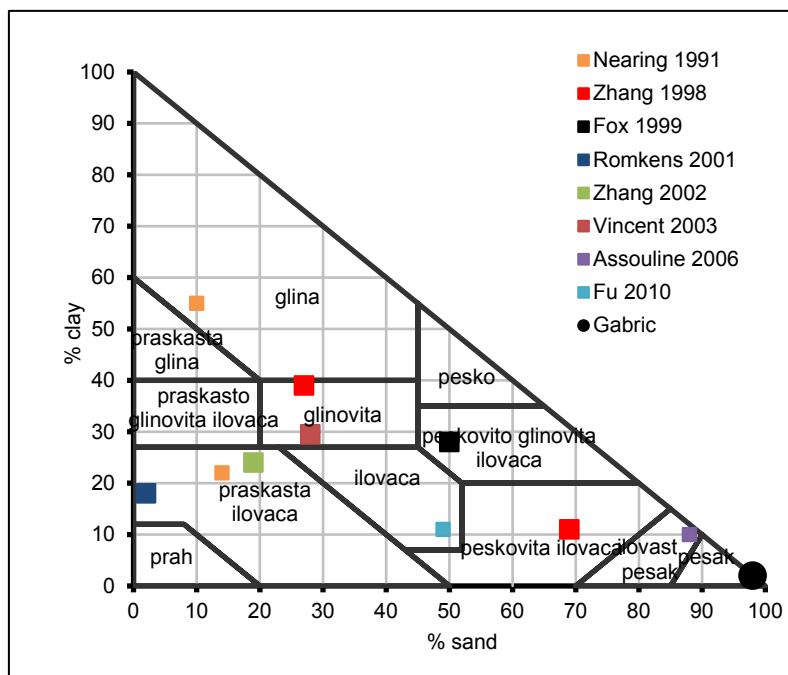
glinovito zemljište začepi drenažne otvore na instalaciji čime bi instalacija postala neupotrebljiva.

Radi utvrđivanja granulometrijskog sastava uzorka peska, izrađeno je pet granulometrijskih krivih na osnovu uzoraka zemljišta koje je ugrađivano u eksperimentalnu instalaciju. Granulometrijske krive uzoraka date su na slici 3.17.



Slika 3.17. Granulometrijske krive ugrađivanog peska

Na trougaonom USDA dijagramu, za analizu tekstone zemljišta, utvrđeno je da uzorak pripada peskovima (slika 3.18).



Slika 3.18. Troughaoni USDA dijagram

3.3.3. Zbijenost i vlažnost zemljišta

Erozija zemljišta zavisi i od stepena zbijenosti zemljišta. U rastresitom zemljištu postoje pore i pukotine koje omogućavaju da se padavine brže infiltriraju i samim tim spreče veći površinski oticaj koji može dovesti do erozije.

I pored poznavanja ove činjenice, u ovom radu se uticaj zbijenosti nije izučavao (iako je prvobitno planirano) zbog činjenice da je debljina sloja peska mala (7 cm) i da nije bilo moguće postići značajne razlike u zbijenosti primenom statičkog nabijanja zemljišta.

Osnovna zbijenost, kojom su se vršili svi opiti postignuta je primenom metalnih ploča koje su pritiskale ugrađeni pesak. Ploče su sa jedne strane bile šarkama pričvršćene za instalaciju dok su se sa druge strane vijcima navrtale momentključem do opterećenja od 60 Nm.

Erozija je povezana i sa sadržajem vode u zemljištu. U zavisnosti od stepena zasićenja zemljišta vodom, erozija može da varira za iste uslove i do 800 puta [8]. Uticaj zasićenosti na eroziju je kompleksan jer objedinjuje različite faktore koji utiču na povećanje erozije kao i na otpor prema eroziji. Smičući naponi u tlu zavise

od sadržaja vode u tlu a zemljišta sa većim smičućim otporima imaju manju sklonost ka eroziji [8].

Kako bi rezultati eksperimenata bili uporedivi, nakon zbijanja, zemljište je natopljeno vodom i ostavljeno da odstoji 24 sata nakon čega je gravitaciona voda, neposredno pre izvođenja opita, drenirana iz zemljišta.

3.3.4. Nagib zemljišta

Nagib zemljišta je jedna od najvažnijih promenljivih u istraživanju erozije. U razvoju modela USLE, parametar S, koji je vezan za nagib slivne površine se do sada najmanje menjao. Nagib utiče na brzinu oticaja kao i na ugao pod kojim kišne kapi padaju na tlo.

Prvobitna namera je bila da se erozija ispita na nagibima od 4%, 10% i 16% kako bi se odredila erozija sa veoma blage, srednje i velike kosine. Tokom izvođenja eksperimenta, pri nagibima od 16%, usled zasićenosti vodom ugrađeno zemljište nije imalo sposobnost da se odupre gravitacionim silama i dolazilo je do "isticanja" zemljišta iz kutija na slivnoj površini. Iz tog razloga odlučeno je da se eksperimenti sprovedu pri nagibima od 4%, 7% i 10%.

3.4. Postupak merenja

Pre svakog opita zemljište u suvom stanju je ručno unošeno u tekstilom obložene kutije na slivnoj površini. Uloga tekstila je bila da spreči unošenje frakcija peska kroz perforacije na dnu. Zemljište je ravnomerno raspoređeno i izravnavano u debljini od 7.5 cm. Čeličnim pločama dimenzija 1.5x0.5 m, koje su bile fiksirane šarkama po sredini instalacije, zemljište je nabijeno na debljinu od oko 7 cm navrtanjem vijaka po obodu instalacije (Slika 3.19).



Slika 3.19. Zbijanje zemljišta



Slika 3.20. Izravnato i zbijeno zemljište

U sledećem koraku, zemljište je lagano natapano vodom dok tanak sloj vode nije izbio na površinu zemljišta. U ovom stanju zemljište je stajalo 24 časa nakon čega je sledilo dreniranje zemljište kroz otvore na nizvodnom kraju instalacije.

Uključivanjem pumpe pritisak u sistemu raste do maksimalnih 0.4 bara koliko je potrebno za pravilan rad mlaznica. Kada se pritisak ustali, odnosno kada vazduh izađe iz instalacije, preko programatora se simulator kiše pušta u pogon.

Poglavlje 4

4. Rezultati merenja

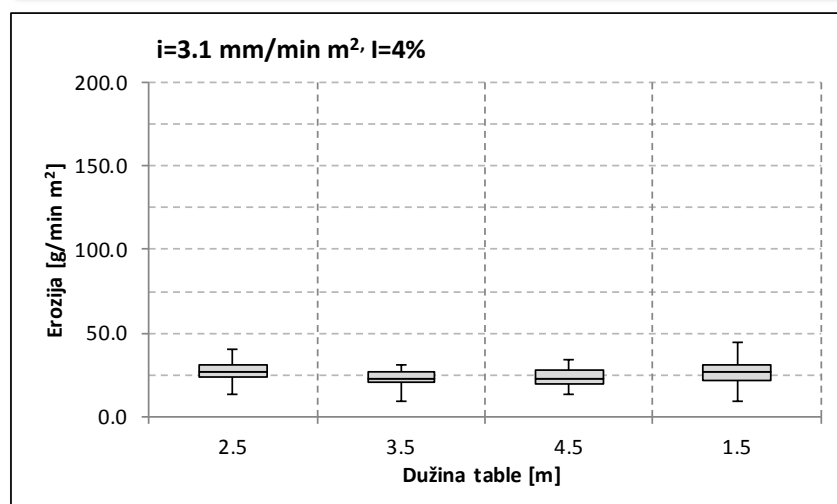
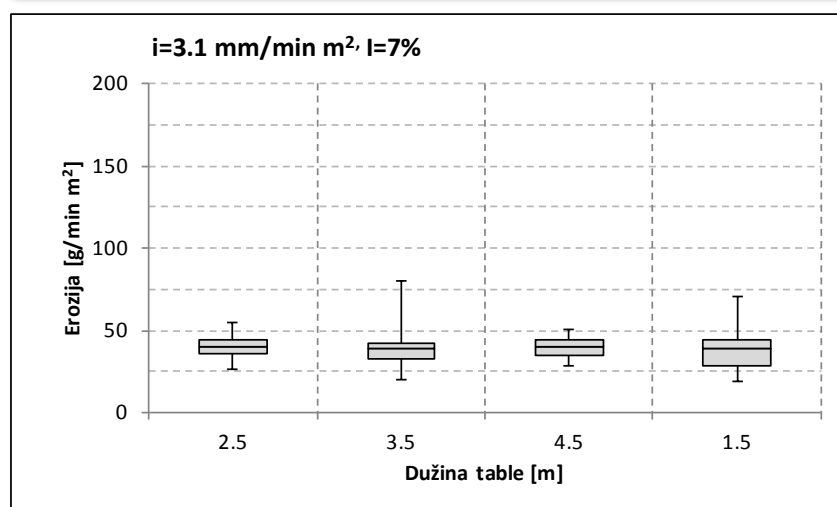
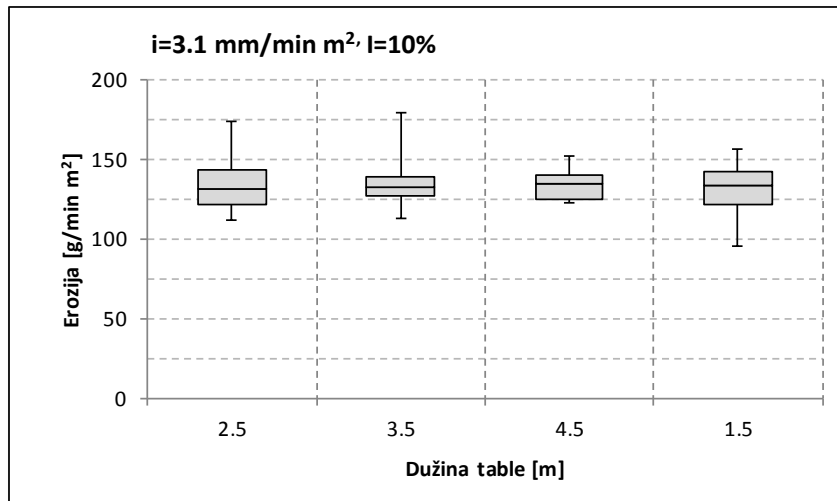
Za potrebe ispitivanja veze između padavina, oticaja i erozije izvršena su dva seta merenja. Na osnovu prvog seta merenja ova veza je utvrđena statističkim pristupom, dok je drugi set merenja poslužio za kalibraciju i verifikaciju matematičkog modela oticaja zasnovanog na fizičkim procesima.

U prvom setu merenja, za ispitivanje erozije korišćeno je pet intenziteta kiše (2.0 mm/min, 2.2 mm/min, 2.4 mm/min, 2.8 mm/min i 3.1 mm/min) trajanja 15 minuta i tri nagiba slivne površine (4%, 7% i 10%). Uzorkovanje vode i spranog nanosa sa slivne površine vršilo se plastičnim posudama zapremine 20 l postavljenim na izlivu svake table. Na svaka 3 minuta posuda ispod izliva je zamenjivana kako bi se odredio prosečan proticaj i erozija u pet vremenskih intervala. Poslednja posuda u seriji je prikupila i ocedenu vodu sa sliva nakon prestanka kiše. Na taj način se, za svaku kombinaciju kiše i nagiba, sa svake slivne površine sakupi suspenzija vode i nanosa u pet posuda (ukupno 20 posuda tokom jednog opita). Svaka kombinacija intenziteta i nagiba ponovljena je pet puta. Izvršeno je ukupno 75 opita. Nakon opita izmerena je zapremina suspenzije u svakoj kanti tačnošću od 0.25 litara. Nakon 24 časa taloženja suspenzije izvršeno je odlivanje viška vode i sušenje erodovanog zemljišta na 105°C do konstantne težine. Težina erodovanog materijala određivana je vagom tačnosti 1 gram.

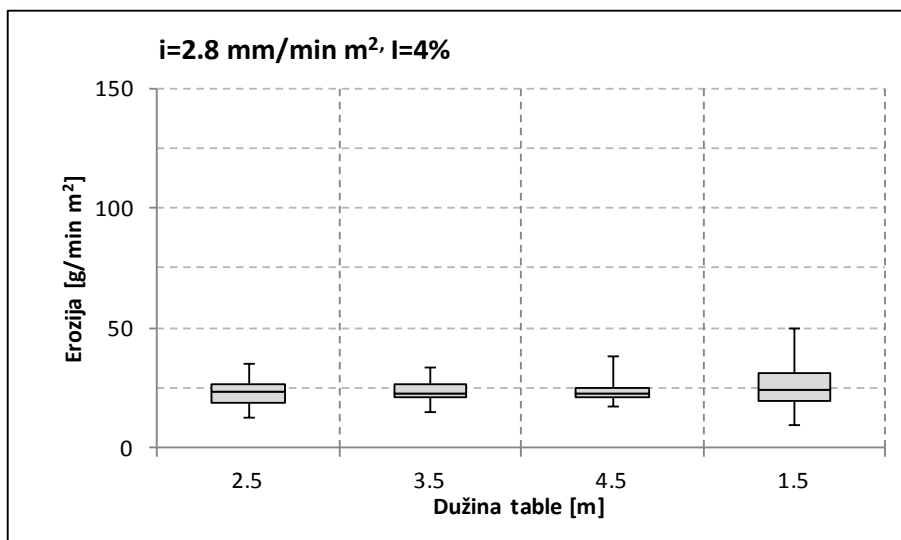
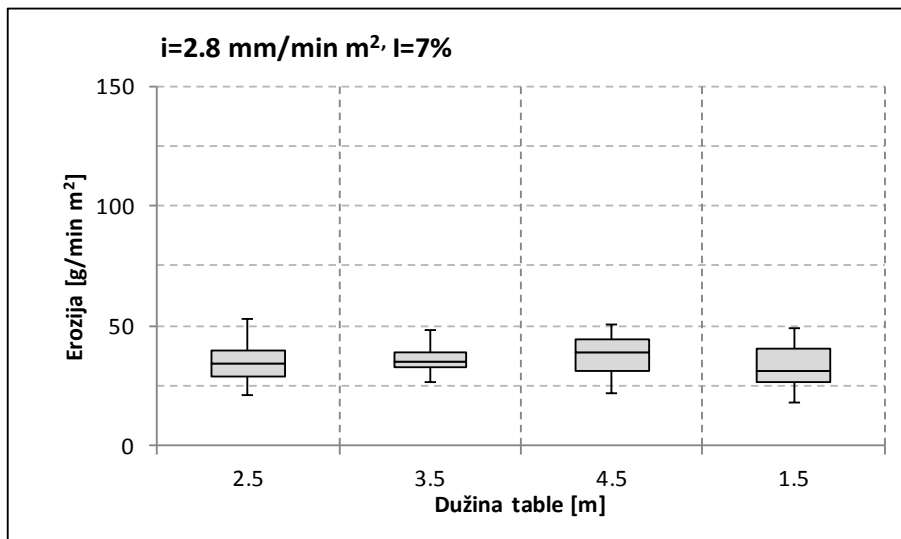
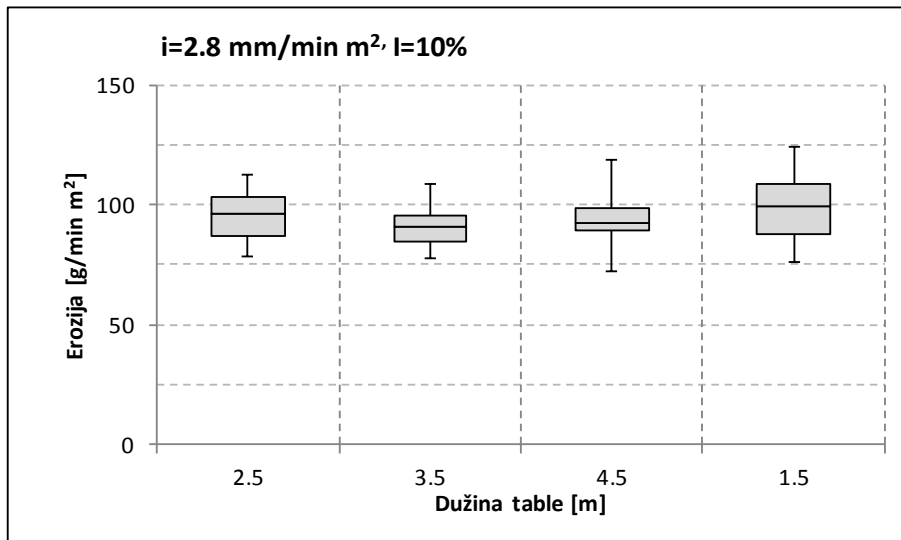
Kako je uzorkovanje suspenzije vršeno na svaka tri minuta, nije bilo moguće rekonstruisati kompletne hidrograme oticaja i psamograme. Za određivanje vremena podizanja hidrograma, trajanja stacionarnog stanja i recesione grane hidrograma izvršen je drugi set merenja u trajanju od tri minuta sa uzorkovanjem suspenzije na svakih 10 sekundi u toku prvog minuta i nakon prestanka kiše, odnosno na svakih 20 s za vreme stacionarnog stanja. Merenja su vršena na tabli dužine 4.5 metara (kalibracioni set) i 2.5 metra (verifikacioni set), pod nagibom od 10% i pri kiši intenziteta 3.1. mm/min. Izvršeno je po 5 merenja za kalibracioni odnosno verifikacioni set.

4.1. Set podataka za statistički pristup

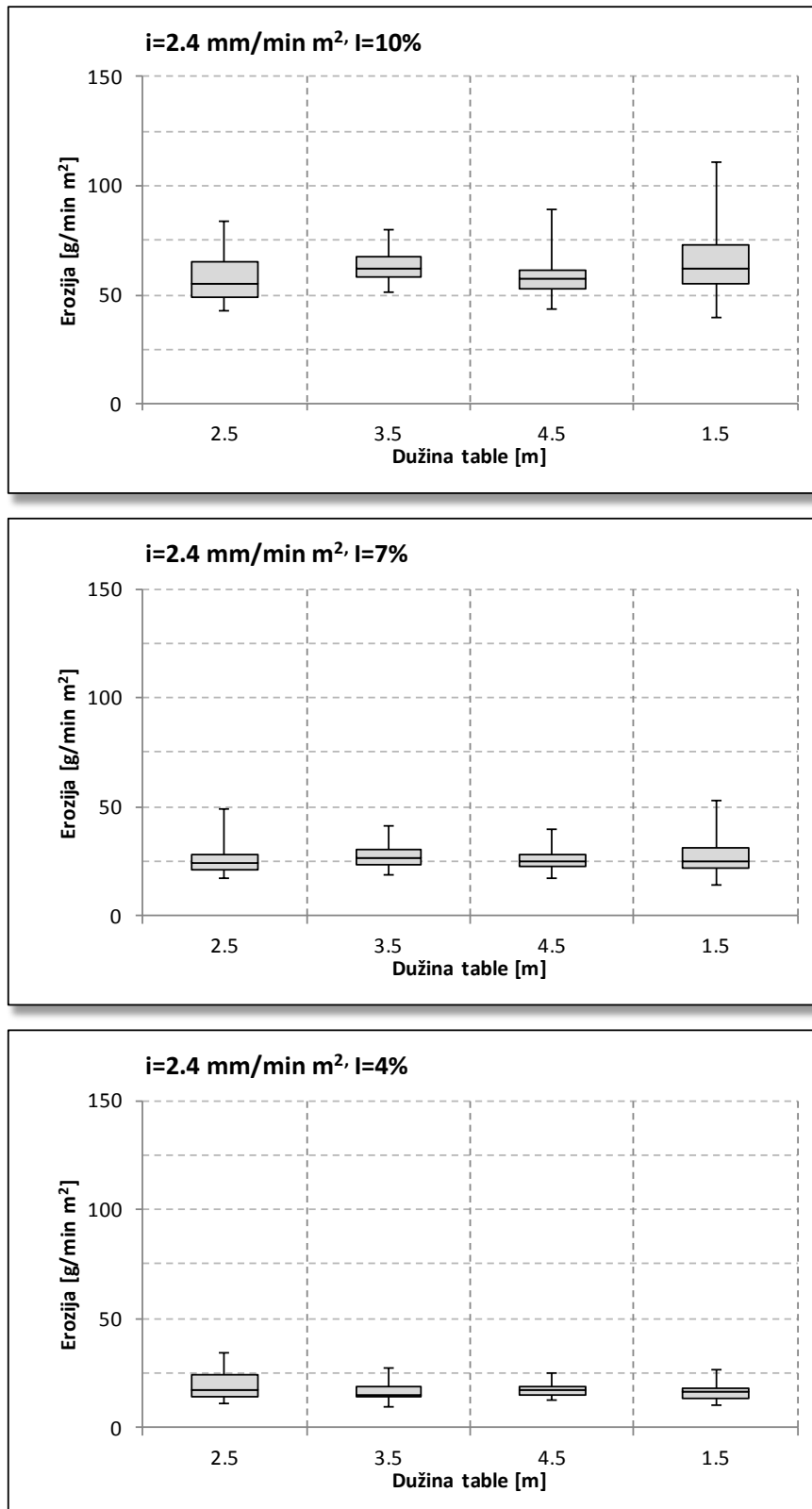
Rezultati prvog seta merenja prikazani su na slikama 4.1 – 4.5.



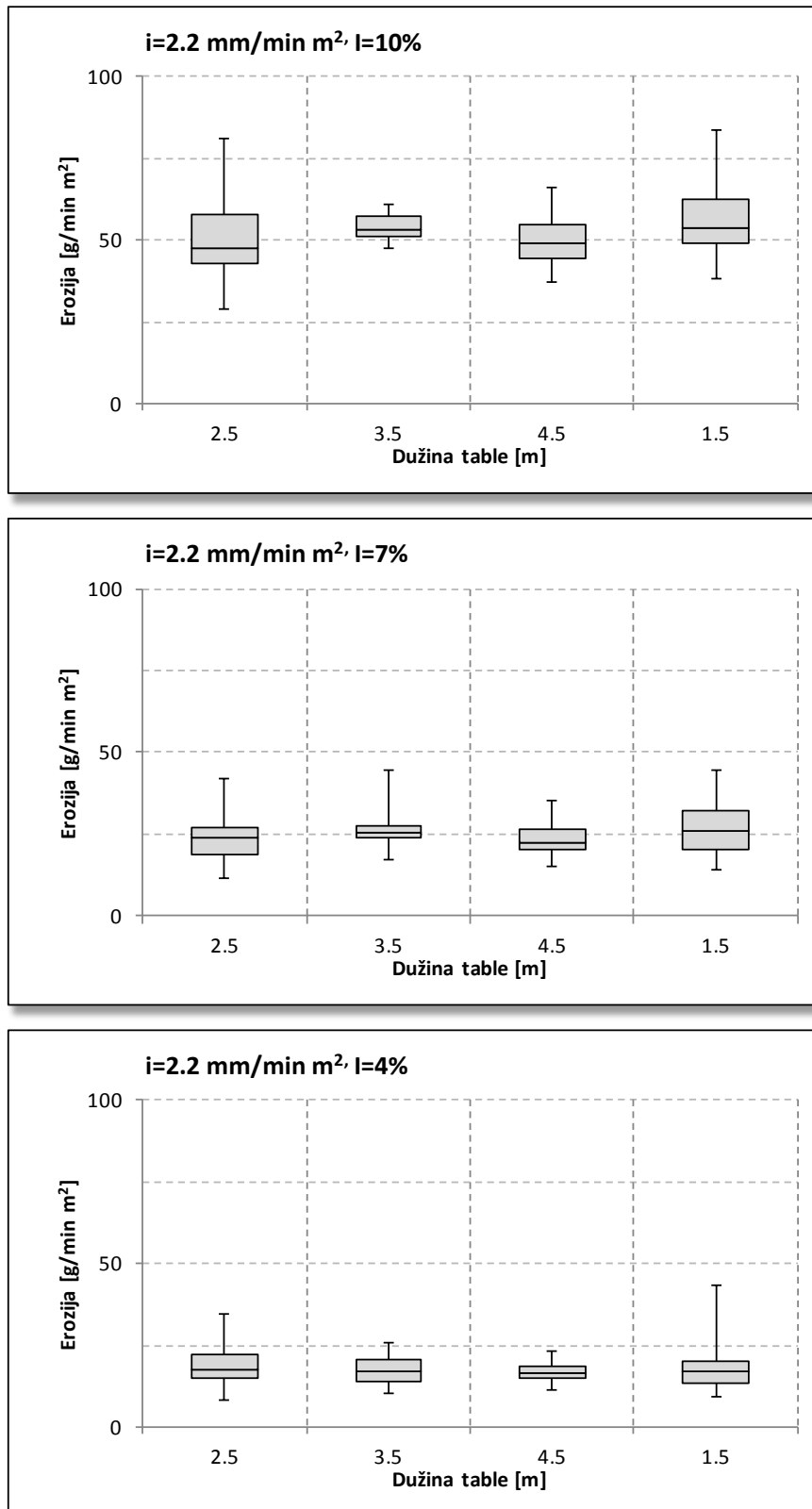
Slika 4.1. Erozija sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 3.1 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%



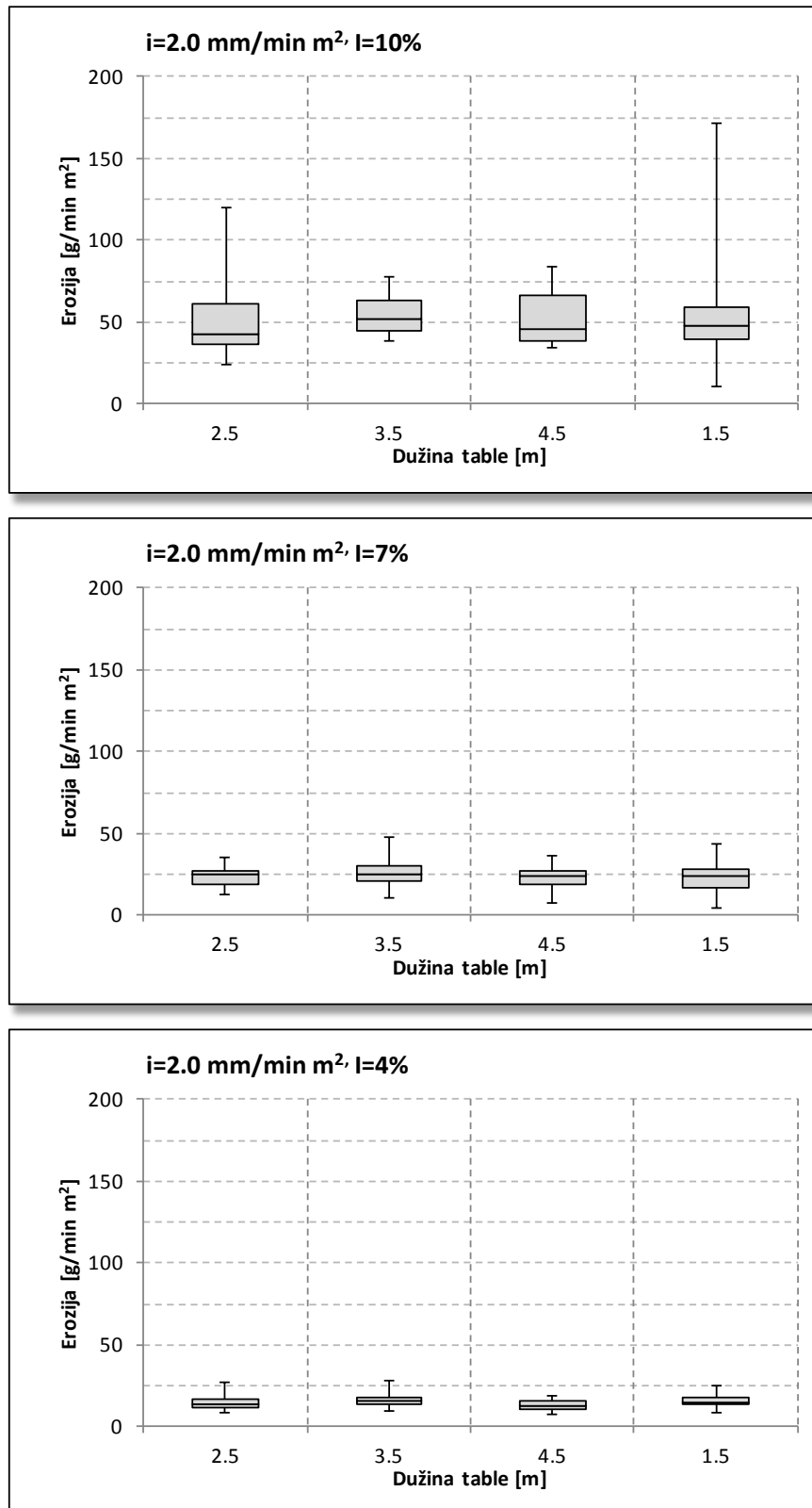
Slika 4.2. Erozija sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 2.8 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%



Slika 4.3. Erozija sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 2.4 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%



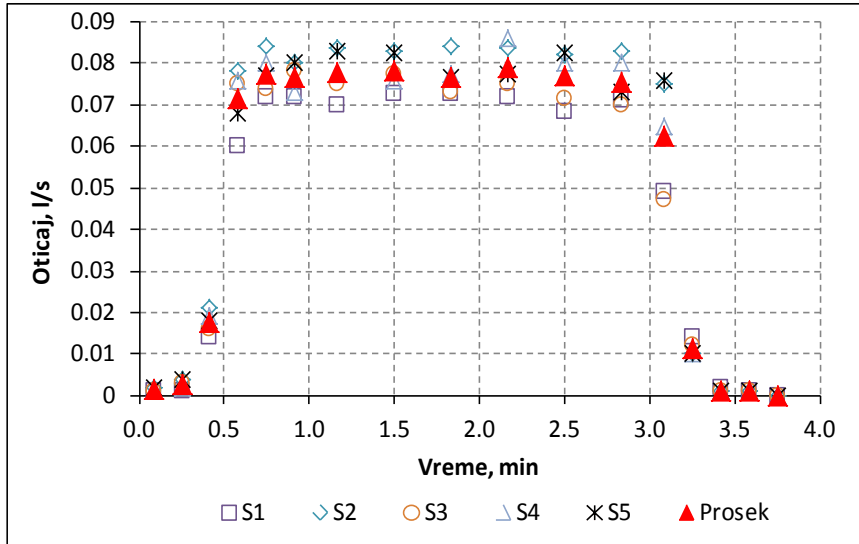
Slika 4.4. Erozija sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 2.2 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%



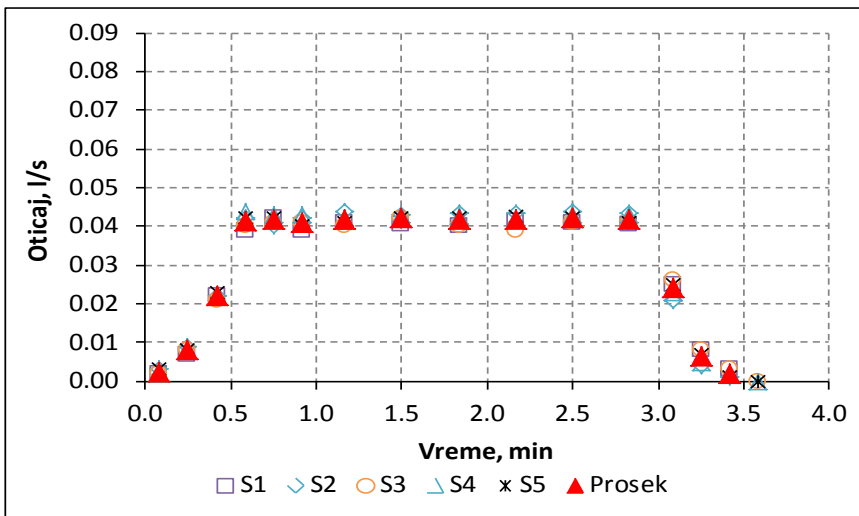
Slika 4.5. Erozija sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 2.0 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%

4.2. Set podataka za modeliranje procesa oticaja i erozije

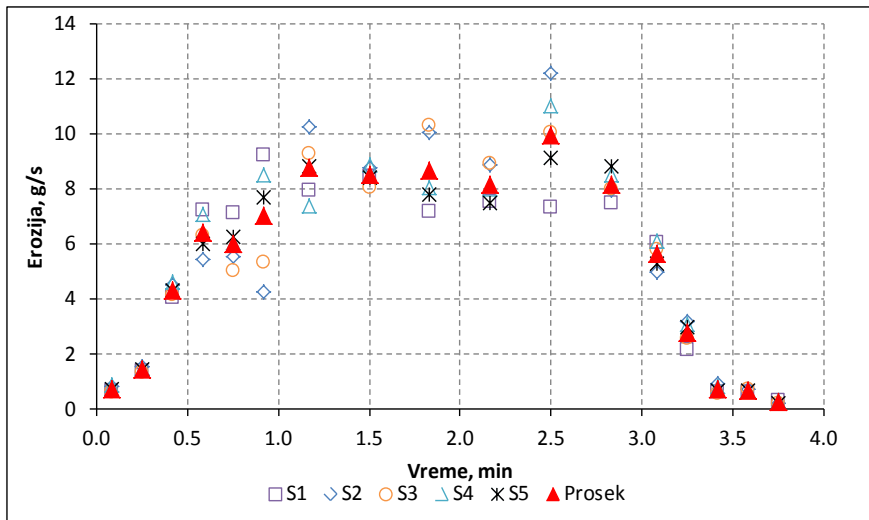
Rezultati merenja drugog seta podataka prikazani su na slikama 4.6. – 4.9.:



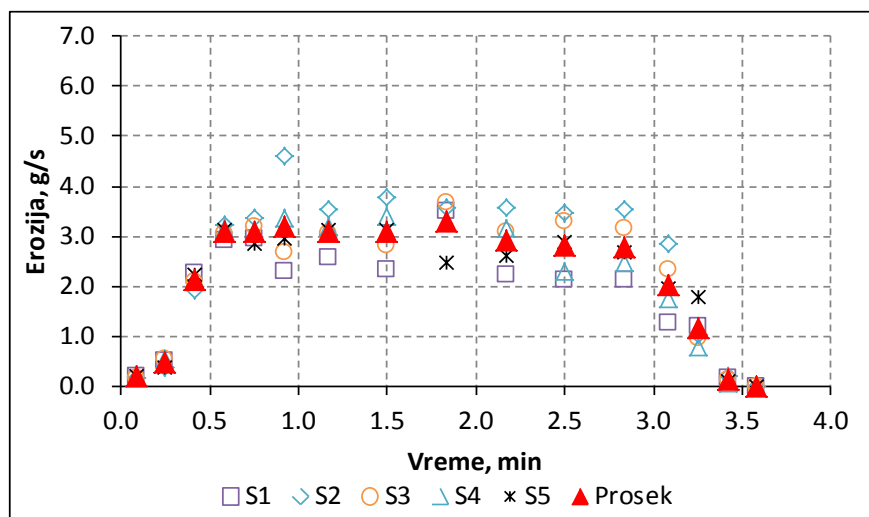
Slika 4.6. Kalibracioni set za oticaj



Slika 4.7. Verifikacioni set za oticaj



Slika 4.8. Kalibracioni set za eroziju



Slika 4.9. Verifikacioni set za eroziju

4.3. Merna nesigurnost

Primena mernog rezultata moguća je uz poznavanje njegovog kvaliteta koji se iskazuje mernom nesigurnošću [48]. Što je merna nesigurnost manja, kvalitet mernog rezultata je veći. Merna nesigurnost se iskazuje standardnim odstupanjem ili proširenim standardnim odstupanjem i ona je parametar koji se pridružuje rezultatima merenja. Dva osnovna tipa merne nesigurnosti su: tip A i tip B. U određenim uslovima koristi se i kombinovana merna nesigurnost.

Merna nesigurnost tipa A

Merna nesigurnost tipa A se određuje statističkom analizom rezultata dobijenih ponavljanjem merenja pod istim uslovima [49]. Ukoliko se raspoloža sa više ponovljenih merenja $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, može se sračunati srednja vrednost uzorka kao:

$$x_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

gde je:

x_s – srednja vrednost rezultata merenja,

n – broj merenja.

Standardno odstupanje pojedinih elemenata, koje je u stvari jednako standardnoj nesigurnosti pojedinih rezultata merenja računa se kao:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_s)^2}{n-1}} \quad (4.2)$$

gde je:

u_A – standardna nesigurnost rezultata merenja,

x_i – rezultat merenja,

x_s – srednja vrednost rezultata merenja,

n – broj merenja.

Standardno odstupanje srednje vrednosti merenja, odnosno standardna nesigurnost srednje vrednosti iznosi:

$$u_{Ax_s} = \frac{u_A}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_s)^2}{n(n-1)}} \quad (4.3)$$

gde je:

u_{Ax_s} – standardna nesigurnost srednje vrednosti rezultata merenja,

u_A – standardna nesigurnost rezultata merenja,

x_i – rezultat merenja,

x_s – srednja vrednost rezultata merenja,

n – broj merenja.

Iz jednačine (4.3) se vidi da se, ponavljanjem merenja i računanjem srednje vrednosti, merna nesigurnost nastala slučajnim odstupanjem može smanjiti za faktor $1/\sqrt{n}$. Kada se raspolaže sa velikim brojem merenja tada merna nesigurnost tipa A podleže Gausovoj raspodeli. Ukoliko u eksperimentu imamo uzorak sa malim brojem elemenata, tada Gausova raspodela neće biti adekvatna i tada se primenjuje Studentova raspodela.

Merna nesigurnost tipa B

Merna nesigurnost tipa B se određuje kod pojedinačnog merenja i predstavlja standardno odstupanje dobijeno analizom različitih uticaja na merni rezultat.

Procena nesigurnosti tipa B zasniva se na:

- specifikaciji uređaja kojim se meri – granične greške instrumenta,
- podacima o baždarenju instrumenta kojim se meri,
- podacima o nesigurnosti konstanti koje koristimo,
- podacima o ranije sprovedenim sličnim merenjima...

Kod merne nesigurnosti tipa B najčešće je odgovarajuća raspodela uniformna mada se u pojedinim slučajevima može pojaviti i trougaona raspodela kao odgovarajuća.

Kombinovana merna nesigurnost

Kombinovana merna nesigurnost se koristi u slučajevima kada su merenja izvršena jednom, ali na sigurnost utiče više merenih veličina, odnosno kada se rezultat dobija indirektno. Merna nesigurnost se računa kao:

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 \right]} \quad (4.4)$$

Proširena merna nesigurnost

Proširena merna nesigurnost, U , predstavlja umnožak standardne merne nesigurnosti, u , i koeficijenta proširenja K :

$$U = K \cdot u \quad (4.5)$$

Koeficijent proširenja ima vrednost u intervalu 1.732 do 3, u zavisnosti od raspodele. Proširenoj mernoj nesigurnosti odgovara visoka vrednost statističke sigurnosti, reda veličine 99%. To znači da se merena veličina sa velikom sigurnošću nalazi u intervalu $x_s \pm U$.

Merna nesigurnost intenziteta kiše – Intenzitet kiše određen je merenjem zapremine koja se zadržala na slivnoj površini nakon kiše trajanja 15 minuta. Merenje zapremine odnosno trajanja kiše određene su prosečne vrednosti zapremine vode, vremena trajanja kiše i intenziteta kiše. Zapremina i vreme su određivani direktno – merenjem, dok je intenzitet kiše računat po formuli:

$$i = \frac{V}{t \cdot A} \quad (4.6)$$

gde je:

i – intenzitet kiše (mm/min)

V – merena zapremina (l),

t – vreme trajanja kiše (min) i

A – veličina slivne površine (m²).

Za izmerene vrednosti zapremine određena je merna nesigurnost u_V :

Tabela 4.1. Merna nesigurnost zapremine

| 1 | V (l) | | | | | |
|---|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2 | | 3.1 (mm/min) | 2.8 (mm/min) | 2.4 (mm/min) | 2.2 (mm/min) | 2.0 (mm/min) |
| 3 | 1 | 280.00 | 253.25 | 218.00 | 199.25 | 181.50 |
| 4 | 2 | 279.25 | 252.25 | 216.25 | 197.50 | 180.25 |
| 5 | 3 | 278.75 | 251.75 | 215.75 | 198.00 | 180.25 |
| 6 | 4 | 278.00 | 250.25 | 215.00 | 197.50 | 178.50 |
| 7 | 5 | 277.00 | 250.25 | 214.00 | 195.50 | 178.75 |
| 8 | prosek (l) | 278.60 | 251.55 | 215.80 | 197.55 | 179.85 |
| 9 | u_V (l) | ±0.52 | ±0.58 | ±0.67 | ±0.60 | ±0.55 |

Merna nesigurnost određena je i za vreme uzorkovanja, u_t :

Tabela 4.2 Merna nesigurnost vremena uzorkovanja

| | t (min) | | | | | |
|---|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | | 3.1 (mm/min) | 2.8 (mm/min) | 2.4 (mm/min) | 2.2 (mm/min) | 2.0 (mm/min) |
| 2 | 1 | 14.994 | 14.997 | 15.006 | 15.007 | 15.003 |
| 3 | 2 | 15.007 | 15.004 | 14.995 | 15.006 | 14.996 |
| 4 | 3 | 14.996 | 15.004 | 14.996 | 15.005 | 15.004 |
| 5 | 4 | 14.996 | 14.997 | 15.004 | 14.996 | 15.004 |
| 6 | 5 | 15.004 | 15.005 | 15.006 | 15.006 | 15.005 |
| 7 | prosek | 14.999 | 15.001 | 15.002 | 15.004 | 15.002 |
| 8 | u_t (min) | ±0.0025 | ±0.0019 | ±0.0025 | ±0.0019 | ±0.0018 |

Na osnovu ovih rezultata, prosečne vrednosti intenziteta kiše iznose 3.1, 2.8, 2.4, 2.2 i 2.0 mm/min. Merna nesigurnost ovih vrednosti određena je jednačinom (4.4) koja za konkretan slučaj glasi:

$$u_i = \sqrt{\left(\frac{\partial i}{\partial V}\right)^2 u_V^2 + \left(\frac{\partial i}{\partial t}\right)^2 u_t^2} \quad (4.7)$$

Standardne merne nesigurnosti u , odnosno proširene merne nesigurnosti U za svaki intenzitet kiše prikazane su u tabeli 4.3. Za koeficijent proširenja K , usvojena je vrednost 2.132 na osnovu tabele Studentove raspodele za četiri stepena slobode i prag poverenja 95%.

Tabela 4.3. Merna nesigurnost intenziteta kiše

| 1 | | 3.1 (mm/min) | 2.8 (mm/min) | 2.4 (mm/min) | 2.2 (mm/min) | 2.0 (mm/min) |
|---|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2 | ui (g) | ±0.035 | ±0.039 | ±0.045 | ±0.040 | ±0.037 |
| 3 | U (g) | ±0.074 | ±0.083 | ±0.095 | ±0.086 | ±0.078 |

Merna nesigurnost merenja erozije – Erozija je određivana direktnim merenjem težine spranog peska sa svake slivne površine u vremenskim intervalima od tri minuta. Statističkom obradom rezultata merenja određena je proširena standardna nesigurnost tipa A. Rezultati su prikazani tabelarno za svaki nagib, intenzitet kiše i dužinu slivne površine.

Tabela 4.4. Merna nesigurnost erozije za nagib od 10%

| 1 | 10% | | | | | |
|---|---------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 2 | | i=3.1 (mm/min) | i=2.80 (mm/min) | i=2.40 (mm/min) | i=2.20 (mm/min) | i=2.00 (mm/min) |
| 3 | L=2.5 m | 508 ± 27.52 g | 358 ± 15.24 g | 224 ± 19.63 g | 189 ± 21.66 g | 168 ± 33.14 g |
| 4 | L=3.5 m | 711 ± 34.46 g | 482 ± 18.57 g | 331 ± 16.33 g | 282 ± 8.88 g | 267 ± 18.88 g |
| 5 | L=4.5 m | 903 ± 26.01 g | 636 ± 27.18 g | 389 ± 26.71 g | 326 ± 19.07 g | 306 ± 27.36 g |
| 6 | L=1.5 m | 295 ± 14.86 g | 224 ± 11.78 g | 146 ± 13.99 g | 124 ± 10.54 g | 116 ± 27.52 g |

Tabela 4.5. Merna nesigurnost erozije za nagib od 7%

| 1 | 7% | | | | | |
|---|---------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 2 | | i=3.1 (mm/min) | i=2.80 (mm/min) | i=2.40 (mm/min) | i=2.20 (mm/min) | i=2.00 (mm/min) |
| 3 | L=2.5 m | 149 ± 11.42 g | 134 ± 13.16 g | 97 ± 11.16 g | 90 ± 11.44 g | 87 ± 10.44 g |
| 4 | L=3.5 m | 208 ± 25.01 g | 189 ± 12.18 g | 142 ± 10.50 g | 140 ± 12.92 g | 136 ± 18.32 g |
| 5 | L=4.5 m | 267 ± 16.85 g | 251 ± 22.60 g | 173 ± 14.86 g | 159 ± 13.88 g | 155 ± 20.09 g |
| 6 | L=1.5 m | 84 ± 11.68 g | 76 ± 8.62 g | 63 ± 8.82 g | 61 ± 7.90 g | 56 ± 8.24 g |

Tabela 4.6. Merna nesigurnost erozije za nagib od 4%

| 1 | 4% | | | | | |
|---|---------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 2 | | i=3.1 (mm/min) | i=2.80 (mm/min) | i=2.40 (mm/min) | i=2.20 (mm/min) | i=2.00 (mm/min) |
| 3 | L=2.5 m | 101 ± 9.76 g | 88 ± 9.04 g | 72 ± 9.39 g | 71 ± 9.72 g | 55 ± 6.68 g |
| 4 | L=3.5 m | 120 ± 12.41 g | 125 ± 9.55 g | 91 ± 9.18 g | 91 ± 9.10 g | 83 ± 8.75 g |
| 5 | L=4.5 m | 158 ± 17.81 g | 159 ± 12.08 g | 116 ± 8.90 g | 115 ± 8.52 g | 88 ± 8.22 g |
| 6 | L=1.5 m | 59 ± 8.62 g | 60 ± 9.41 g | 37 ± 3.91 g | 43 ± 8.16 g | 35 ± 4.63 g |

Rezultati merene nesigurnosti prikazani u tabelama 4.4 – 4.6 pokazuju da, izraženo u procentima, oprema kojom je vršeno merenje utiče okvirno na rezultate erozije u

opsegu od 4 – 10%. Kode nekih kombinacija dobija se nesigurnost i do 20%. Iz rezultata prikazanih na slikama 4.1 – 4.5 vidi se da rezultati erozije variraju u zavisnosti od kombinacije merenja u znatno širim granicama od onih koje pokazuje nesigurnost merenja. Razlog za ovo treba tražiti u mogućnosti da i pored istovetnog postupka pripreme instalacije za merenja, ugrađeni materijal nije ugrađen istom zbijenosti. Ovo ima za posledicu variranje zapremine otekle vode (prilog 1 – prilog 15) čiji se uticaj zbog razlika u dubinama i brzinama tečenja prenosi na pronos nanosa.

Poglavlje 5

5. Obrada i analiza rezultata na osnovu statističkog pristupa

Rezultati merenja na laboratorijskoj instalaciji seta podataka za obradu statističkim pristupom su prikazani u poglavlju 4., na slikama 4.1 – 4.5. Prikazane su maksimalne vrednosti, percentil od 75%, medijana, percentil od 25% i minimalne vrednosti erozije za svaki intenzitet kiše, nagib i dužinu slivne površine. U nastavku su prikazane metode i rezultati analiza merenih vrednosti erozije.

5.1. Regresiona analiza

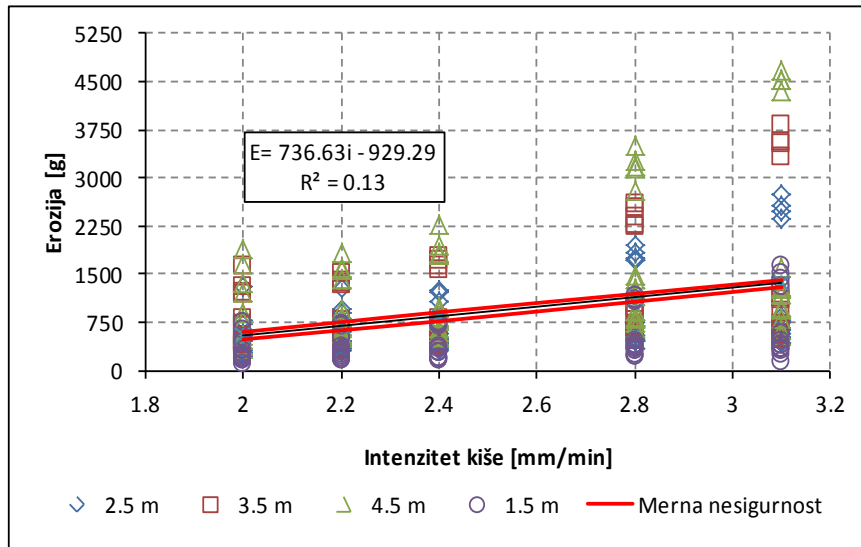
Linearna regresiona analiza je sprovedena kako bi se ispitala varijacija erozije u zavisnosti od nagiba slivne površine i intenziteta kiše. Kao zavisna promenljiva u regresionoj analizi uzeta je erozija zemljišta, dok nezavisne promenljive predstavljaju nagib površine, intenzitet kiše i dužina slivne površine.

Prvo je analiziran zaseban uticaj nagiba slivne površine, intenziteta kiše i dužine slivne površine na eroziju a zatim je sprovedena i višestruka linearna regresija.

Na osnovu rezultata regresione dobijeni su modeli za proračun erozije čiji su rezultati upoređeni sa prosečnim vrednostima merenih rezultata.

5.1.1. Intenzitet kiše

Za ukupnu eroziju nakon kiše trajanja 15 minuta, sa površina dužine 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 metara, određena je zavisnost erozije i intenziteta padavina.



Slika 5.1. Ukupna erozija sa slivnih površina dužine 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m pod nagibom 4, 6 i 10% usled kiše intenziteta 3.1, 2.8, 2.4, 2.2 i 2.0 mm/min

Regresijom je dobijena jednačina za proračun erozije u zavisnosti od intenziteta kiše. Jednačina glasi:

$$E = 736.63(i \pm U) - 929.29 \quad (5.1)$$

gde je:

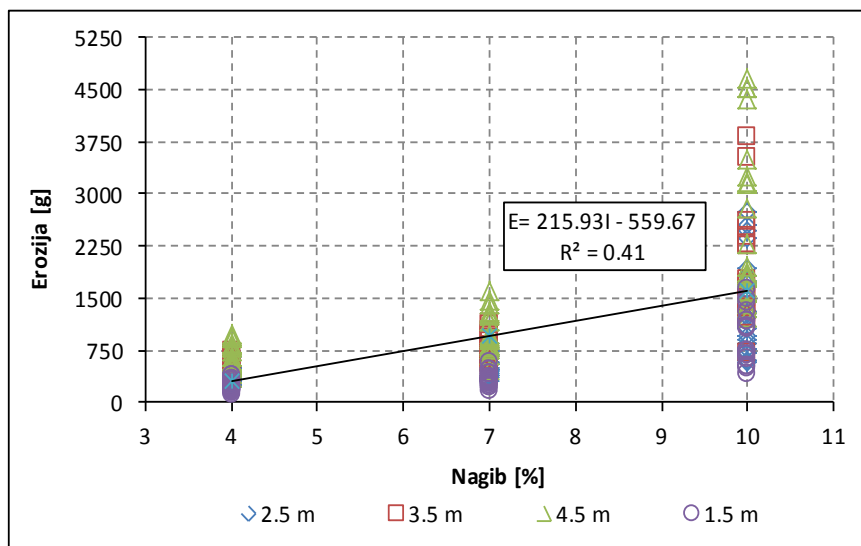
E – ukupna erozija usled kiše trajanja 15 minuta [g],

i – intenzitet kiše [mm/min],

U – proširena merna nesigurnost intenziteta kiše [mm/min].

5.1.2. Nagib slivne površine

Za ukupnu eroziju nakon kiše trajanja 15 minuta, sa površina dužine 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 metara, određena je zavisnost erozije i nagiba slivne površine za analizirane padavine.



Slika 5.2. Ukupna erozija usled kiše intenziteta 3.1, 2.8, 2.4, 2.2 i 2.0 mm/min sa slivnih površina dužine 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 metara pod nagibom 4, 6 i 10%

Regresionom analizom dobijena je linearna veza između erozije i nagiba koja glasi:

$$E = 215.93I - 559.67 \quad (5.2)$$

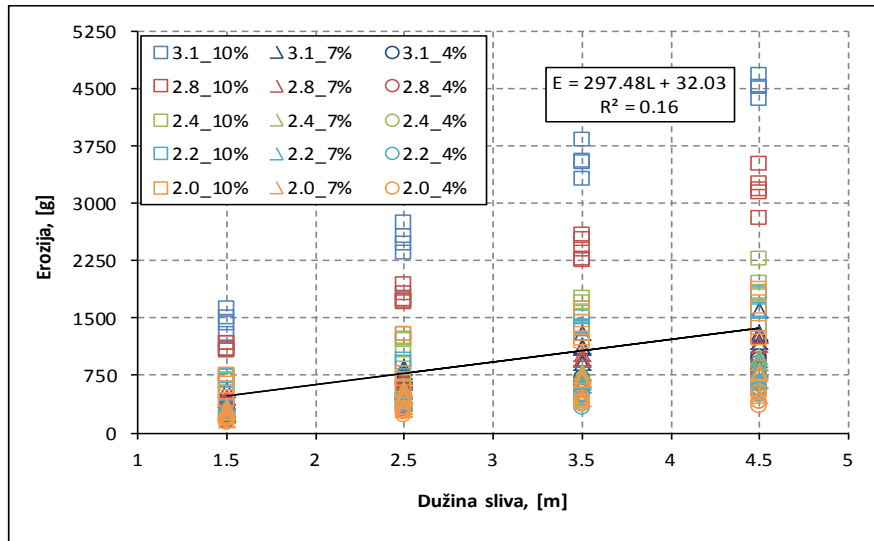
gde je:

E – ukupna erozija nakon kiše trajanja 15 minuta [g],

I – nagib slivne površine [%].

5.1.3. Dužina slivne površine

Uticao dužine slivne površine na eroziju prikazan je na slici 5.3.



Slika 5.3. Ukupna erozija usled kiše intenziteta 3.1, 2.8, 2.4, 2.2 i 2.0 mm/min, pri nagibima 10%, 7% i 4% sa tabli dužine 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 metara

Regresionom analizom utvrđena je veza između dužine slivne površine i erozije bez uvođenja uticaja nagiba a za izučavane intenzitete kiše.

$$E = 297.48L + 32.03 \quad (5.3)$$

gde je:

E – ukupna erozija nakon kiše trajanja 15 minuta [g],

L – dužina slivne površine [m].

Sa dijagrama 5.3. se može zaključiti da je veza između ukupne erozije i dužine slivne površine, gledajući po nagibima, linearna. Ova veza je detaljnije obrađena u nastavku.

5.2. Test homogenosti podataka sa različitim dužina slivova

Simulatorom kiše aplicirane su kiše različitog intenziteta, trajanja 15 minuta na slivne površine dužine 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 metara. Iz rezultata eksperimentalnih ispitivanja, prikazanih na slikama 4.1 – 4.5., erozija se za kišu određenog intenziteta i nagiba slivne površine, a za različite dužine slivnih površina kreće u

približno istim granicama. Radi utvrđivanja uticaja razmatranih dužina slivnih površina na eroziju, na količine spranog peska sa svake table primenjen je test homogenosti. Za ispitivanje homogenosti korišćen je Kruskal-Wallis test varijansi. Nulta hipoteza testa (H_0) je da k -setova podataka pripada istoj populaciji sa različitim medijanama [47]. S obzirom da je test neparametarski, pripadnost normalnoj raspodeli setova podataka nije uslov.

Statistika testa je data izrazom:

$$K = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k \left[\frac{(\sum R_j)^2}{n_j} \right] - 3(N+1) \quad (5.4)$$

gde je:

K – statistika testa,

N – ukupan broj podataka u svim grupama,

R_j – rang podatka u grupi,

n_i - broj podataka u grupi.

Za svaki intenzitet kiše i nagib, mereni podaci su poredani u grupe po dužinama slivnih površina. Određena je kritična vrednost statistike, rang svakog podatka i sračunata je statistika testa. Primer proračuna je prikazan za nagib od 10% i kišu intenziteta 3.1 mm/min.

Podaci su grupisani po dužinama slivnih površina u četiri grupe, k_1 , k_2 , k_3 i k_4 . Svaka grupa ima 20 podataka.

Tabela 5.1 Merene vrednosti erozije

| 1 | i=3.1 mm/min m ² , I=10% | | | |
|----|-------------------------------------|----------|----------|----------|
| 2 | k=1 | k=2 | k=3 | k=4 |
| 3 | L= 2.5 m | L= 3.5 m | L= 4.5 m | L= 1.5 m |
| 4 | 141.3 | 133.3 | 139.3 | 151.1 |
| 5 | 136.0 | 131.4 | 142.2 | 155.6 |
| 6 | 117.3 | 127.6 | 134.8 | 133.3 |
| 7 | 122.7 | 121.9 | 139.3 | 142.2 |
| 8 | 112.0 | 118.1 | 136.3 | 137.8 |
| 9 | 114.7 | 145.3 | 135.7 | 144.0 |
| 10 | 160.0 | 142.5 | 141.0 | 117.8 |
| 11 | 130.7 | 132.0 | 123.4 | 107.1 |
| 12 | 138.7 | 123.8 | 122.7 | 125.3 |
| 13 | 117.3 | 133.1 | 124.0 | 142.7 |
| 14 | 148.0 | 159.6 | 143.9 | 154.7 |
| 15 | 160.3 | 137.7 | 151.6 | 138.2 |
| 16 | 127.7 | 137.5 | 124.0 | 133.3 |
| 17 | 131.5 | 112.8 | 124.3 | 113.3 |
| 18 | 116.0 | 125.1 | 125.2 | 131.1 |
| 19 | 173.3 | 179.0 | 144.1 | 133.3 |
| 20 | 167.5 | 161.9 | 134.8 | 123.1 |
| 21 | 124.5 | 132.6 | 131.1 | 95.1 |
| 22 | 131.2 | 129.7 | 130.1 | 108.9 |
| 23 | 135.2 | 126.9 | 129.2 | 122.2 |

Pomoću χ^2 raspodele, za prag značajnosti $\alpha=0.05$ i tri stepena slobode određena je kritična vrednost statistike K_{krit} i ona iznosi 7.81. U tabeli 5.2. dati su rangovi podataka iz tabele 5.1. Zbog ponavljanja određenih rezultata urađena je korekcija rangova.

Tabela 5.2. Rangovi podataka, R

| 1 | i=3.1 mm/min m2, I=10% | | | |
|----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | k=1 | k=2 | k=3 | k=4 |
| 3 | L= 2.5 m | L= 3.5 m | L= 4.5 m | L= 1.5 m |
| 4 | 60 | 43.5 | 57.5 | 70 |
| 5 | 50 | 37 | 61.5 | 73 |
| 6 | 9.5 | 28 | 46.5 | 43.5 |
| 7 | 15.5 | 13 | 57.5 | 61.5 |
| 8 | 4 | 12 | 51 | 54 |
| 9 | 7 | 68 | 49 | 66 |
| 10 | 75 | 63 | 59 | 11 |
| 11 | 33 | 39 | 18 | 2 |
| 12 | 56 | 19 | 15.5 | 26 |
| 13 | 9.5 | 41 | 20.5 | 64 |
| 14 | 69 | 74 | 65 | 72 |
| 15 | 76 | 53 | 71 | 55 |
| 16 | 29 | 52 | 20.5 | 43.5 |
| 17 | 38 | 5 | 22 | 6 |
| 18 | 8 | 24 | 25 | 34.5 |
| 19 | 79 | 80 | 67 | 43.5 |
| 20 | 78 | 77 | 46.5 | 17 |
| 21 | 23 | 40 | 34.5 | 1 |
| 22 | 36 | 31 | 32 | 3 |
| 23 | 48 | 27 | 30 | 14 |
| 24 | R ² =645612.25 | R ² =683102.25 | R ² =721650.25 | R ² =578360.25 |

Iz izraza 5.4. sledi:

$$K = \frac{12}{80(80+1)} \left[\frac{645612.25}{20} + \frac{683102.25}{20} + \frac{578360.25}{20} \right] - 3(80+1) = 0.40$$

U slučajevima kada je vrednost statistike K manja od kritične vrednosti statistike K_{krit} , usvaja se nulta hipoteza (H_0) o pripadnosti podataka istoj populaciji. U suprotnom, nulta pretpostavka se odbacuje. Proračun je sproveden i za ostale kombinacije intenziteta kiše i nagiba slivne površine. Rezultati su prikazani u tabeli 5.3.

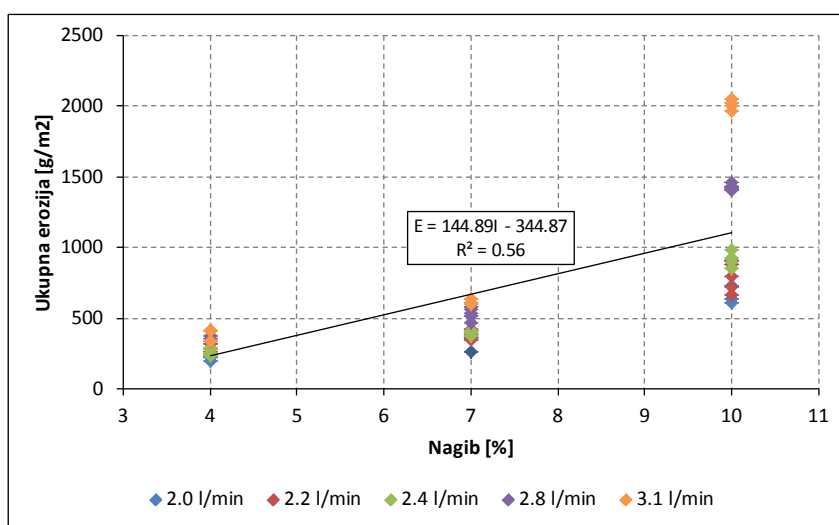
Tabela 5.3. Rezultat Kruskal-Wallis testa

| 1 | Nagib | Intenzitet kiše | K | H ₀ |
|----|-------|-----------------|------|----------------|
| 2 | % | mm/min | - | - |
| 3 | 10 | 3.1 | 0.40 | DA |
| 4 | | 2.8 | 6.29 | DA |
| 5 | | 2.4 | 6.55 | DA |
| 6 | | 2.2 | 7.62 | DA |
| 7 | | 2.0 | 4.17 | DA |
| 8 | 7 | 3.1 | 1.06 | DA |
| 9 | | 2.8 | 2.10 | DA |
| 10 | | 2.4 | 2.71 | DA |
| 11 | | 2.2 | 4.86 | DA |
| 12 | | 2.0 | 1.26 | DA |
| 13 | 4 | 3.1 | 5.94 | DA |
| 14 | | 2.8 | 1.34 | DA |
| 15 | | 2.4 | 3.12 | DA |
| 16 | | 2.2 | 1.27 | DA |
| 17 | | 2.0 | 6.93 | DA |

Na osnovu rezultata testa zaključuje se da rezultati erozije sa svih tabli, prikazani po jedinici površine, pripadaju istoj populaciji. Zbog ovoga, i činjenice da su širine svih tabli iste, erozija je u linearnoj vezi sa dužinom tabli.

Nadalje će se prikazati zavisnost erozije po jedinici površine u funkciji nagiba pa potom u funkciji intenziteta kiše.

Zavisnost erozije i nagiba slivne površine po jedinici površine prikazana je na slici 5.4.



Slika 5.4. Ukupna erozija usled kiše intenziteta 3.1, 2.8, 2.4, 2.2 i 2.0 mm/min sa slivnih površina pod nagibom 4, 6 i 10%

Regresijom je dobijena jednačina za proračun erozije u zavisnosti od nagiba slivne površine. Pretpostavka je da intenzitet kiše ne utiče na eroziju. Jednačina glasi:

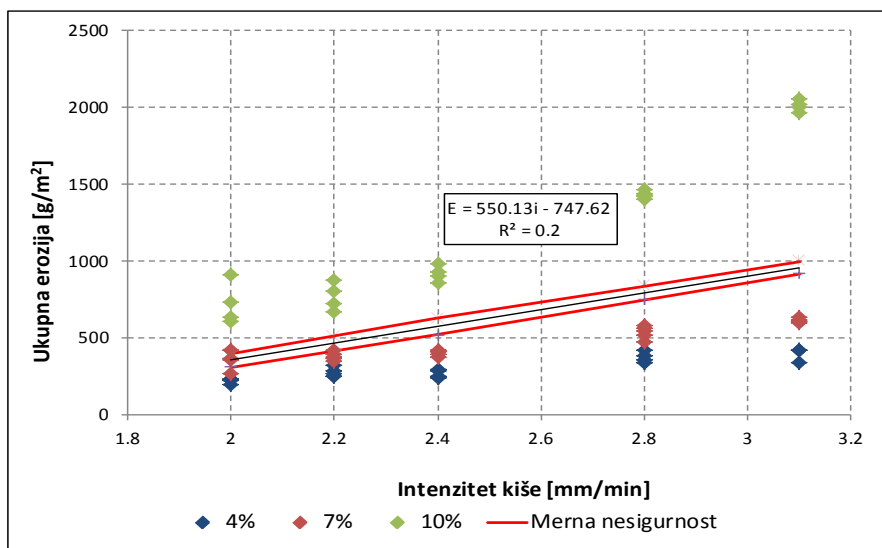
$$E = 144.89I - 344.87 \quad (5.5)$$

gde je:

E – ukupna erozija usled kiše trajanja 15 minuta [g/m²],

I – nagib slivne površine [%].

Na slici 5.5. prikazana je kumulativna erozija, izražena po m² površine, sa sliva površine 6 m² pri intenzitetima kiše 2.0, 2.2, 2.4, 2.8 i 3.1 mm/min pri nagibima od 4, 7 i 10%. Uočava se trend rasta erozije povećanjem intenziteta kiše.



Slika 5.5. Ukupna erozija sa slivnih površina pod nagibom 4, 6 i 10% usled kiše intenziteta 3.1, 2.8, 2.4, 2.2 i 2.0 mm/min

Regresijom je dobijena jednačina za proračun erozije u zavisnosti od intenziteta kiše. Pretpostavka je da intenzitet kiše ne utiče na eroziju. Jednačina glasi:

$$E = 550.13(i \pm U) - 747.62 \quad (5.6)$$

gde je:

E – ukupna erozija usled kiše trajanja 15 minuta [g/m²],

i – intenzitet kiše [mm/min],

U – proširena merna nesigurnost [mm/min].

5.3. Višestruka regresiona analiza

Na rezultate ukupne erozije nakon kiše trajanja 15 minuta sprovedena je regresiona analiza koja obuhvata uticaj nagiba slivne površine, dužine slivne površine i intenziteta kiše. Jednačina glasi:

$$E = 718.583(i \pm U) + 294.482L + 214.37I - 3231.18 \quad (5.7)$$

gde je:

E – ukupna erozija usled kiše trajanja 15 minuta [g],

i – intenzitet kiše [mm/min],

U – proširena merna nesigurnost [mm/min]

L – dužina slivne površine [m] i

I – nagib slivne površine [%].

Za ovaj slučaj koeficijent determinacije, R^2 , iznosi 0.69.

Takođe je sprovedena i regresiona analiza koja obuhvata uticaj nagiba slivne površine i intenziteta kiše na rezultate prikazane po m^2 površine. Regresionom analizom dobijena je sledeća veza:

$$E = 156.61I + 437.726(i \pm U) - 1516.82 \quad (5.8)$$

gde je:

E – ukupna erozija usled kiše trajanja 15 minuta [g/m^2],

I – nagib slivne površine [%] i

i – intenzitet kiše [mm/min],

U – proširena merna nesigurnost [mm/min].

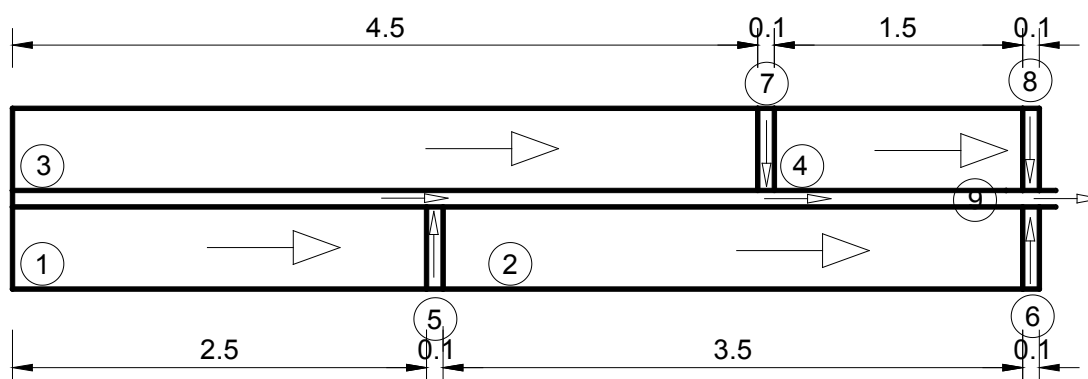
Za ovaj slučaj koeficijent determinacije, R^2 , iznosi 0.74.

Poglavlje 6

6. Direktna primena modela KINEROS2 na set podataka za statističku analizu

Simulacija procesa oticaja i erozije sa eksperimentalne instalacije izvršena je programom KINEROS2 kako bi se ispitala mogućnost matematičkih modela za prognozu pojave oticaja i erozije sa laboratorijskih slivova. Za potrebe simulacije instalacija je u matematičkom modelu opisana kao sliv koji se sastoji od četiri nezavisne površine (na kakvoj su i vršeni eksperimenti). Sa svake površine voda otiče u kanal koji se nalazi duž uže strane površine a zatim u kanal koji prikuplja vodu sa celog sliva. Šematski prikaz simulacije dat je na slici 6.1. Zaokruženi brojevi predstavljaju identifikacioni broj elementa sliva u programu.

Analizirano je samo tečenje vode i erozija po površini sliva. Tečenje vode i transport nanosa u kanalu nisu analizirani.



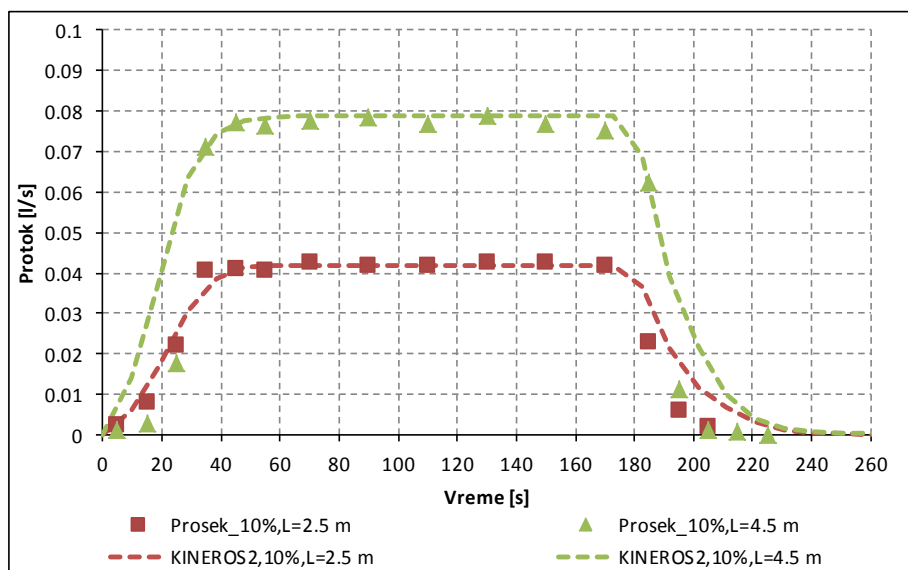
Slika 6.1. Šematski prikaz modela

U tabeli 6.,1. je prikazan primer ulaznog fajla za model KINEROS2.

Tabela 6.1. Parametri simulacije

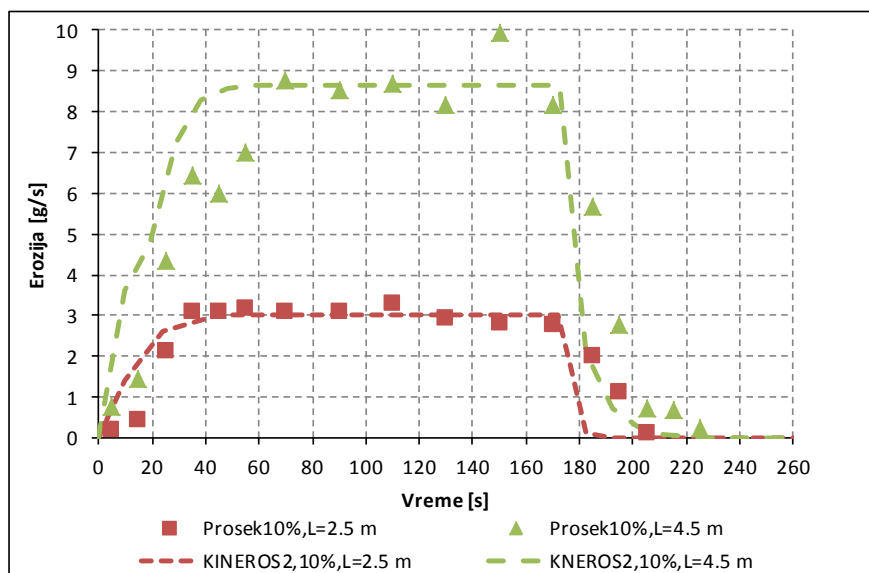
| | | GLOBAL | | | | KOMENTAR |
|----|---------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|---|
| 1 | CLEN | 6 | | | | Dužina celog sliva |
| 2 | UNITS | METRIC | | | | Jedinice mere |
| 3 | DIAMS | 0.1 | | | | Prosečan prečnik zrna u mm |
| 4 | DENSITY | 2.6 | | | | Gustina frakcija |
| 5 | TEMP | 25 | | | | Temperatura |
| 6 | NELE | 9 | | | | Broj elemenata sliva |
| 7 | | | | | | |
| 8 | PLANE | | | | | |
| 9 | ID | 1 | 2 | 3 | 4 | Redni broj elementa sliva |
| 10 | LEN | 2.5 | 3.5 | 4.5 | 1.5 | Dužina elementa sliva |
| 11 | WID | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | Širina elementa sliva |
| 12 | SL | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | Nagib sliva |
| 13 | MANNING | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | Manningov koeficijent hrapavosti |
| 14 | CV | 0 | 0 | 0 | 0 | Koef. varijacije koeficijenta filtracije |
| 15 | THICK | 70 | 70 | 70 | 70 | Debljina sloja zemljišta u mm |
| 16 | SAT | 1 | 1 | 1 | 1 | Stepen zasićenja zemljišta |
| 17 | PR | 2 | 2 | 2 | 2 | Naredba za ispis rezultata |
| 18 | RELIEF | 2 | 2 | 2 | 2 | Visina neravnina na slivu u mm |
| 19 | SPACING | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | Rastojanje između neravnina u mm |
| 20 | KS | 36 | 36 | 36 | 36 | Koeficijent filtracije u mm/h |
| 21 | G | 0 | 0 | 0 | 0 | Kapilarno penjanje |
| 22 | DIST | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | |
| 23 | POR | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | Poroznost zemljišta |
| 24 | ROCK | 0 | 0 | 0 | 0 | Stepen učešća čvrste frakcije |
| 25 | FRACT | 1 | 1 | 1 | 1 | Procenat učešća pojedinih frakcija u uzorku tla |
| 26 | SPLASH | 20000 95000 | 20000 95000 | 20000- 95000 | 20000- 95000 | Erodibilnost zemljišta |
| 27 | COH | 0 | 0 | 0 | 0 | Koeficijent kohezije |

Na osnovu drugog seta merenja (set za kalibraciju i verifikaciju modela) izvršena je kalibracija modela KINEROS2 za površinski oticaj. Parametri kalibracije modela bili su eksponent m u jednačini kinematskog talasa (izraz 2.25) i koeficijent filtracije. Rezultati kalibracije i verifikacije modela prikazani su na slici 6.2. Usvojena vrednost eksponenta m iznosi 1.80.



Slika 6.2. Kalibracioni set za reprodukciju kompletnih hidrograma oticaja

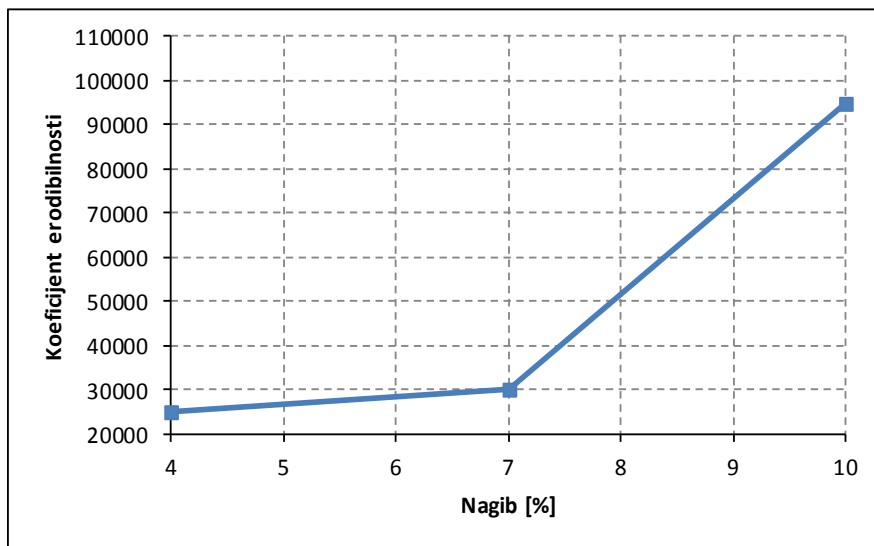
Nakon kalibracije modela KINEROS2 parametrom m za površinski oticaj, izvršena je i kalibracija ovog modela za eroziju pomoću istih kišnih epizoda. Kao parametar kalibracije poslužio je parametar erodibilnosti zemljišta. U jednačinama kojima se u modelu KINEROS2 opisuje erozija, ovaj parametar je vezan za eroziju kišom. Za oba seta podataka, kalibracioni i verifikacioni, parametar ima vrednost 95000. Rezultati verifikacije i kalibracije modela erozije prikazani su na slici 6.3.



Slika 6.3. Kalibracioni set za reprodukciju psamograma

Iako je parametar erodibilnosti za kalibracioni i verifikacioni set imao vrednost 95000, prilikom reprodukcije psamograma se ispostavilo da se sa ovim

parametrom ne mogu kalibrisati i verifikovati svi mereni rezultati. Prilikom kalibracije merenih rezultata ustanovljeno je da za manje nagibe ovaj parametar ima manje vrednosti (slika 6.4.), odnosno da je on u funkciji nagiba.



Slika 6.4. Funkcija promene faktora erodibilnosti zemljišta

Na osnovu dobijenih rezultata kalibracije i verifikacije modela oticaja i erozije izvršena je reprodukcija prvog seta merenja oticaja i erozije. Rezultati su prikazani u prilogima 31 - 40.

Analizom jednačina za pokretanje i transport nanosa koje koristi model KINEROS2 (poglavlje 2.4.1) teško se stiče uvid u način modeliranja pokretanja i transporta nanosa. Sa jedne strane, jednačine predstavljene u literaturi [42] nisu u dimenzionalnom skladu i sadrže prikrivene koeficijente koji utiču na sam proces. Sa druge strane, u ulaznim podacima je potrebno definisati parametre zemljišta (npr. koeficijent kohezije, visinu i raspored neravnina) koji u izvesnoj meri utiču na proces erozije a koji se ne koriste u datim jednačinama. Način na koji model KINEROS2 obračunava uticaj tih parametara nije naveden ni u jednoj literaturi. Sve ovo, rezultiralo je potrebom da se napravi model oticaja i erozije baziran na istim jednačinama koje koristi i model KINEROS2, a da se zatim razmotri i uticaj pojedinih članova na sam proces. Pregled jednačina za proračun oticaja i erozije, koje služe kao osnova modela, dat je u narednom poglavlju..

Poglavlje 7

7. Analiza i prikaz rezultata na osnovu modelisanja fizičkih procesa

7.1. Oticaj

7.1.1. Teorijske osnove

Praktično svi modeli oticaja navedeni u pregledu literature polaze od de St. Venant-ovih jednačina za linijsko neustaljeno tečenje u otvorenim tokovima, koje čine:

- jednačina kontinuiteta:

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A)}{\partial x} = 0 \quad (7.1)$$

- dinamička jednačina:

$$\frac{\partial(\rho u A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 A)}{\partial x} = g \rho A \frac{\partial Z_{dna}}{\partial x} - g \rho A \frac{\partial h}{\partial x} - \bar{\tau} O_b \quad (7.2)$$

gde je:

ρ – gustina fluida (kg/m³),

u – brzina (m/s),

A – površina poprečnog preseka (m²),

t – vreme (s),

x – rastojanje u pravcu toka (m),

g – gravitaciono ubrzanje (m/s²),

Z_{dna} – kota dna (-),

h – dubina (m),

$\bar{\tau}$ – tangencijalni napon (N/m²),

O_b – okvašeni obim (m).

Dinamička jednačina se može predstaviti i u alternativnom obliku koji se dobija tako što se iz razvijenog oblika:

$$\underbrace{\rho A \frac{\partial u}{\partial t}}_1 + \underbrace{u \frac{\partial(\rho A)}{\partial t}}_2 + \underbrace{\rho A u \frac{\partial u}{\partial x}}_3 + \underbrace{u \frac{\partial(\rho u A)}{\partial x}}_4 = \underbrace{g \rho A \frac{\partial Z_{dna}}{\partial x}}_5 - \underbrace{g \rho A \frac{\partial h}{\partial x}}_6 - \underbrace{\bar{\tau} O_b}_7 \quad (7.3)$$

na osnovu jednačine kontinuiteta eliminiše zbir članova (2) i (4), što daje:

$$\underbrace{\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t}}_1 + \underbrace{\frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x}}_2 = \underbrace{\frac{\partial Z_{dna}}{\partial x}}_3 - \underbrace{\frac{\partial h}{\partial x}}_4 - \underbrace{\frac{\bar{\tau}}{g \rho R}}_5 \quad (7.4)$$

Pojednostavljeni oblici dinamičke jednačine (7.4) se dobijaju sukcesivnim zanemarivanjem članova: prvo zanemarenjem neustaljenog člana (1), zatim zanemarenjem advektivnog člana (2) i konačno zanemarenjem člana pritiska (4).

Zanemarenjem neustaljenog člana (1) u jednačini (7.4) dobija se pojednostavljena dinamička jednačina, čija je osnovna pretpostavka da su razlike između otpora trenja za neustaljeno i ustaljeno tečenje zanemarljive:

$$\frac{\bar{\tau}}{\rho g R} = - \frac{\partial}{\partial x} \underbrace{\left(Z_{dna} + h + \frac{u^2}{2g} \right)}_E = S_f \quad (7.5)$$

gde je:

S_f – nagib linije energije (-).

Ako se uz neustaljeni član (1) u dinamičkoj jednačini (6.4) dodatno zanemari i advektivni član (2), dobija se pojednostavljena dinamička jednačina poznata kao jednačina difuzionog talasa:

$$\frac{\bar{\tau}}{\rho g R} = - \frac{\partial}{\partial x} \underbrace{\left(Z_{dna} + h \right)}_Z = S_z \quad (7.6)$$

gde je:

S_z – nagib linije slobodne površine (-).

Ako se, uz dva prethodna pojednostavljenja u dinamičkoj jednačini (7.4) zanemari i član pritiska (4), dobija se pojednostavljeni oblik dinamičke jednačine poznat kao jednačina kinematskog talasa:

$$\frac{\bar{\tau}}{\rho g R} = - \frac{\partial Z_{dna}}{\partial x} = S_0 \quad (7.7)$$

gde je:

S_0 – nagib dna (-).

Prosečni napon trenja, $\bar{\tau}$, za poprečni presek se može izraziti na standardan način, preko prosečne brzine tečenja (u), za poprečni presek i prosečnog koeficijent trenja C_τ odnosno λ za presek:

$$\bar{\tau} = C_\tau \frac{\rho u^2}{2} = \frac{\lambda}{4} \frac{\rho u^2}{2} \quad (7.8)$$

Leva strana jednačina (7.5), (7.6) i (7.7) se onda može izraziti kao:

$$\frac{\bar{\tau}}{\rho g R} = \frac{\frac{\lambda}{4} \frac{\rho u^2}{2}}{\rho g R} = \frac{\frac{\lambda}{8} u^2}{g R} = \frac{\lambda}{8 g R} u^2 \quad (7.9)$$

tako da jednačina (7.7) postaje

$$\frac{\lambda}{8 g R} u^2 = S_0 \quad (7.10)$$

odakle se može dobiti veza srednje brzine u za presek i nagiba, koja uključuje koeficijent trenja i karakteristike strujanja

$$u = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \sqrt{RS_0} \quad (7.11)$$

Slične veze daju i empirijski izrazi koji važe za ustaljeno tečenje kao što su Manning-ov:

$$u = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S_0} \quad (7.12)$$

odnosno Chezy-jev izraz:

$$u = C \sqrt{RS_0} \quad (7.13)$$

Oticaj po jedinici širine površine određuje se kao:

$$q = u \cdot h \quad (7.14)$$

gde je:

q – oticaj po jedinici širine ($m^2/(s \cdot m')$),

u – brzina (m/s),

h – dubina vode u preseku (m).

Pošto se većina modela oticaja zasniva na jednačini kinematskog talasa, to je usvojeno i u ovom radu. Na primer, model KINEROS2 kao rudimentarni oblik dinamičke jednačine koristi ili Manning-ov ili Chezy-jev izraz (7.12) i (7.13), dok je jednačina kontinuiteta (7.1), uz pretpostavku da su gustina fluida i širina elementa oticaja konstantne, iskazana kao:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i - f \quad (7.15)$$

gde su na desnoj strani dodati članovi kojima se definiše intenzitet padavina (i) i infiltracija (f), a gde je:

h – dubina vode u preseku (m),

t – vreme (s),

q – oticaj po jedinici širine ($m^2/(s \cdot m')$),

x – rastojanje (m),

i – intenzitet bruto kiše (m/s),

f – intenzitet infiltracije (m/s).

KINEROS2 nadalje prikazuje i Manning-ov i Chezy-jev izraz preko opšteg oblika:

$$q = \alpha h^m \quad (7.16)$$

Ako se krene od Manning-ove formule:

$$u = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S_0} = \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} \sqrt{S_0} \rightarrow q = \frac{\sqrt{S_0}}{n} h^{\frac{5}{3}} \quad (7.17)$$

odnosno ako se krene od Chezy-jeve formule:

$$u = C \sqrt{S_0} h^{\frac{1}{2}} \rightarrow q = C \sqrt{S_0} h^{\frac{3}{2}} \quad (7.18)$$

$\alpha = \frac{\sqrt{S_0}}{n}$, $m=5/3$ – za otpore trenja računati po Manning-ovoj formuli,

$\alpha = C \sqrt{S_0}$, $m=3/2$ – za otpore trenja računati po Chezy-jevoj formuli,

u – brzina tečenja vode (m/s),
n – Manning-ov koeficijent hrapavosti ($m^{-1/3}s$),
R – hidraulički radijus (m),
 S_0 – nagib dna,
h – dubina vode u preseku (m),
C – Chezy-jev koeficijent ($m^{-1/2}/s$),
q – oticaj po jedinici širine ($m^2/(s\ m)$).

Obe formule su zapravo dobijene za turbulentni režim tečenja, tako da koeficijenti trenja iz ovih formula, ako se određuju prema preporukama iz literature, mogu dati nerealne vrednosti. Ukoliko se, kod konkretnog primera, usvoji da je visina neravnina jednaka prosečnom prečniku zrna peska ugrađenog u instalaciju $d_{50}=0.0001$ m, tada se na osnovu izraza koji daje vezu između Manning-ovog koeficijenta hrapavosti i visine neravnina $n = d^{1/6}/26$ [50] dobija vrednost $n=0.0083$ $m^{-1/3}s$. Ova vrednost je daleko ispod karakterističnih vrednosti za peščane materijale od $n=0.016 - 0.020$ $m^{-1/3}s$.

Čest je slučaj da se u izrazu (7.16) članovi α i m kalibrišu na osnovu merenja [4]. Na ovaj način se može doći do tačnih (merenih) vrednosti oticaja, međutim problem se javlja pri određivanju dubine odnosno brzine vode što kasnije ima posledice na proračun pokretanja i transporta nanosa.

Zbog svega prethodnog, razmatrane su i druge mogućnosti, odnosno definisanje otpora trenja na osnovu analitičkih rešenja za laminarno tečenje, odnosno teorijskih logaritamskih rasporeda brzina za turbulentno tečenje.

Za laminarno tečenje između dve paralelne ploče koeficijent trenja se dobija na osnovu analitičkih rešenja:

$$\lambda = \frac{24}{Re} \quad (7.19)$$

gde je:

λ – koeficijent trenja (-),
Re – Reynolds-ov broj (-).

Za turbulentno tečenje između dve paralelne ploče, koeficijent trenja se dobija na osnovu teorijsko-eksperimentalnih zakonitosti za logaritamski raspored brzina, i to za tzv. gladak zid u obliku:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 2.5 \ln \left(\text{Re} \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \right) + 3 \quad (7.20)$$

a za hrapav zid u obliku:

$$\frac{8}{\sqrt{\lambda}} = 2.5 \ln \left(\frac{h}{k} \right) + 6 \quad (7.21)$$

gde je:

h – dubina (m),

k – apsolutna hrapavost (m).

Izraz (7.19) se može preraditi kao:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 2.5 \ln \left[\ln \left(\text{Re} \sqrt{\lambda} \right) + \ln \frac{1}{\sqrt{8}} \right] + 3 \quad (7.22)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2.5}{\sqrt{8}} \ln \left(\text{Re} \sqrt{\lambda} \right) + \frac{2.5 \ln \frac{1}{\sqrt{8}} + 3}{\sqrt{8}} \quad (7.23)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0.88 \ln \left(\text{Re} \sqrt{\lambda} \right) + 0.14 \quad (7.24)$$

$$\ln x = 2.03 \log x \quad (7.25)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.03 \log \left(\text{Re} \sqrt{\lambda} \right) + 0.14 \quad (7.26)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.03 \log \left(1.17 \text{Re} \sqrt{\lambda} \right) \quad (7.27)$$

gde je:

λ – koeficijent trenja (-),

Re – Reynolds-ov broj (-).

a izraz (7.20) kao:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{2.5}{\sqrt{8}} \ln\left(\frac{h}{k}\right) + \frac{6}{\sqrt{8}} \quad (7.28)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0.88 \ln\left(\frac{h}{k}\right) + 2.12 \quad (7.29)$$

$$\ln x = 2.03 \log x \quad (7.30)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.03 \log\left(\frac{h}{k}\right) + 2.12 \quad (7.31)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.03 \log\left(\frac{11.07h}{k}\right) \quad (7.32)$$

gde je:

λ – koeficijent trenja (-),

h – dubina (m),

k – apsolutna hrapavost (m).

Kombinacijom izraza (7.27) i (7.32) može se dobiti objedinjena zavisnost za turbulentno tečenje (i gladak i hrapav zid):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.03 \log\left(\frac{0.85}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{11.07h}\right) \quad (7.33)$$

gde je:

λ – koeficijent trenja (-),

h – dubina (m),

k – apsolutna hrapavost (m).

Ovako dobijeni izrazi za koeficijent trenja, u zavisnosti od režima tečenja, mogu se uvrstiti u jednačinu (7.11). Za slučaj laminarnog tečenja:

$$u = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \sqrt{S_0 R} = \sqrt{\frac{8gS_0}{\lambda}} h^{\frac{1}{2}} \quad (7.34)$$

i za laminarno tečenje:

$$\lambda = \frac{24}{\text{Re}} = \frac{24\nu}{uh} \quad (7.35)$$

Sledi:

$$u = \sqrt{\frac{8gS_0uh}{24\nu}} h^{\frac{1}{2}} \rightarrow q = \frac{8gS_0}{24\nu} h^3 \quad (7.36)$$

gde je:

$$\alpha = \frac{8gS_0}{24\nu}, m=3,$$

u – brzina tečenja vode (m/s),

g – gravitaciono ubrzanje (m/s²),

λ – koeficijent trenja (-),

R – hidraulički radijus (m),

S₀ – nagib dna (linije energije),

h – dubina vode u preseku (m),

Re – Reynolds-ov broj (-),

ν – kinematski koeficijent viskoznosti vode (m²/s),

q – oticaj po jedinici širine (m²/(s m')).

Za slučaj turbulentnog tečenja koeficijent trenja se mora računati nekom vrstom iterativnog postupka.

Kada se izraz za brzinu pomnoži sa dubinom h, dobija se izraz za jedinični protok q (7.36), koji se može uvrstiti u jednačinu kontinuiteta (7.15), tako da se dobija:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha \frac{\partial h^m}{\partial x} = (i - f) \quad (7.37)$$

Jednačina (7.37) se rešava primenom numeričkog postupka.

7.1.2. Numeričko rešavanje jednačina kinematskog talasa

Da bi se sistem diferencijalnih jednačina rešio potrebno je izvršiti njihovu diskretizaciju. U nastavku je prikazana Preissmann-ova šema za diskretizaciju

jednačine kinematskog talasa. Preissmann-ova šema predlaže sledeće aproksimacije izvoda funkcije $f(x,t)$ po prostoru i vremenu, kao i aproksimaciju same funkcije f :

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \theta \left(\frac{f_{i+1}^{n+1} - f_i^{n+1}}{\Delta x} \right) + (1-\theta) \left(\frac{f_{i+1}^n - f_i^n}{\Delta x} \right) \quad (7.38)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx \psi \left(\frac{f_i^{n+1} - f_i^n}{\Delta t} \right) + (1-\psi) \left(\frac{f_{i+1}^{n+1} - f_{i+1}^n}{\Delta t} \right) \quad (7.39)$$

$$f \approx \theta \left(\frac{f_{i+1}^{n+1} + f_i^{n+1}}{2} \right) + (1-\theta) \left(\frac{f_{i+1}^n + f_i^n}{2} \right) \quad (7.40)$$

Za rešavanje diferencijalne jednačine kinematskog talasa potrebno je postaviti početne i granične uslove.

Početni uslov: $h_i = 0 \quad i = 1, I$

Granični uslov: $h_{i=1}^n = 0 \quad n = 0, N$

gde je:

I – ukupan broj računskih preseka Δx ,

N – ukupan broj računskih koraka Δt

Preissmann-ova šema primenjena na jednačinu kinematskog talasa (7.37) daje nelinearnu algebarsku jednačinu oblika:

$$\begin{aligned} & \psi \left(\frac{h_i^{n+1} - h_i^n}{\Delta t} \right) + (1-\psi) \left(\frac{h_{i+1}^{n+1} - h_{i+1}^n}{\Delta t} \right) + \theta \left(\frac{\alpha (h^m)_{i+1}^{n+1} - \alpha (h^m)_i^{n+1}}{\Delta x} \right) + \\ & (1-\theta) \left(\frac{\alpha (h^m)_{i+1}^n - \alpha (h^m)_i^n}{\Delta x} \right) = (i-f) \end{aligned} \quad (7.41)$$

U gornjoj jednačini nepoznate su vrednosti dubine $h(i+1,j+1)$ i za rešavanje se koristi Newton-Raphson-ov iterativni postupak. Ukoliko se usvoji da je $\psi = \theta$ funkcija $f^*(h(i+1,j+1))$ je oblika:

$$f^* = h_{i+1}^{j+1} - h_{i+1}^j + h_i^{j+1} - h_i^j +$$

$$\frac{2\Delta t}{\Delta x} \left[\begin{array}{l} \theta \left(\alpha \left(h_{i+1}^{j+1} \right)^m - \alpha \left(h_i^{j+1} \right)^m \right) + \\ (1-\theta) \left(\alpha \left(h_{i+1}^j \right)^m - \alpha \left(h_i^j \right)^m \right) \end{array} \right] - \quad (7.42)$$

$$i2\Delta t + f2\Delta t$$

Izvod funkcije f^* glasi:

$$f^* = 1 + \frac{2\Delta t \theta \alpha m}{\Delta x} \left(h_{i+1}^{j+1} \right)^{m-1} \quad (7.43)$$

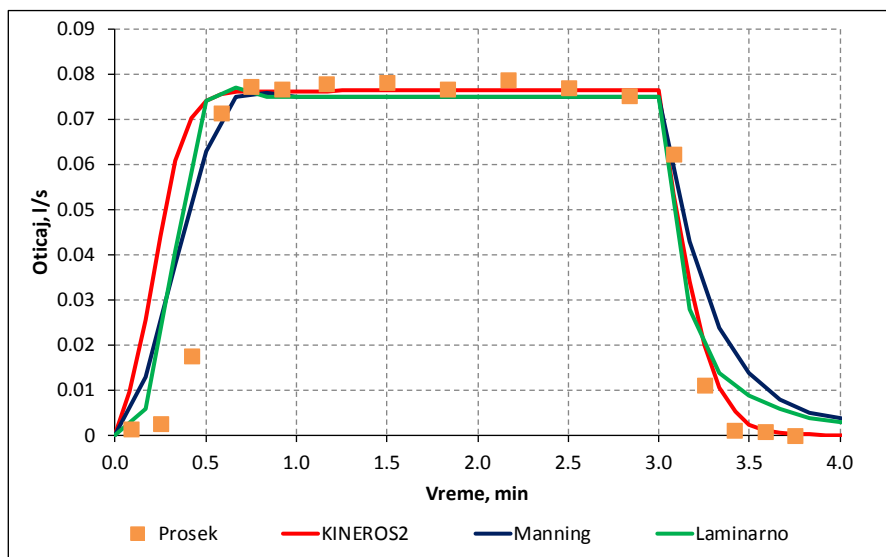
Nepoznata dubina u narednom vremenskom koraku se dobija preko izraza:

$$h_{i+1}^{j+1} = h_{i+1}^{j+1} - \frac{f^*}{f^*} \quad (7.44)$$

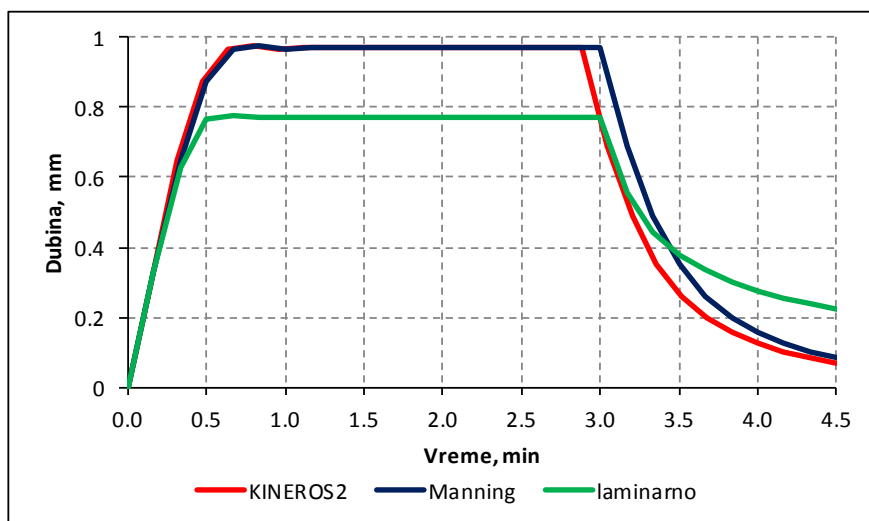
7.1.3. Rezultati modela oticaja

Za simulaciju procesa oticaja sa laboratorijske instalacije napisan je model koji sadrži samo elemente koji se izučavaju (intenzitet kiše, nagib i dužina sliva). U prvom koraku, model je napravljen po direktnom ugledu na KINEROS2 a zatim su uvedene modifikacije u načinu proračuna otpora trenja. Rezultati kalibrisanog modela KINEROS2, modela koji koristi Manning-ov izraz za proračun trenja i modela koji koristi analitički izraz za proračun otpora trenja su upoređeni (slike 7.1 – 7.6).

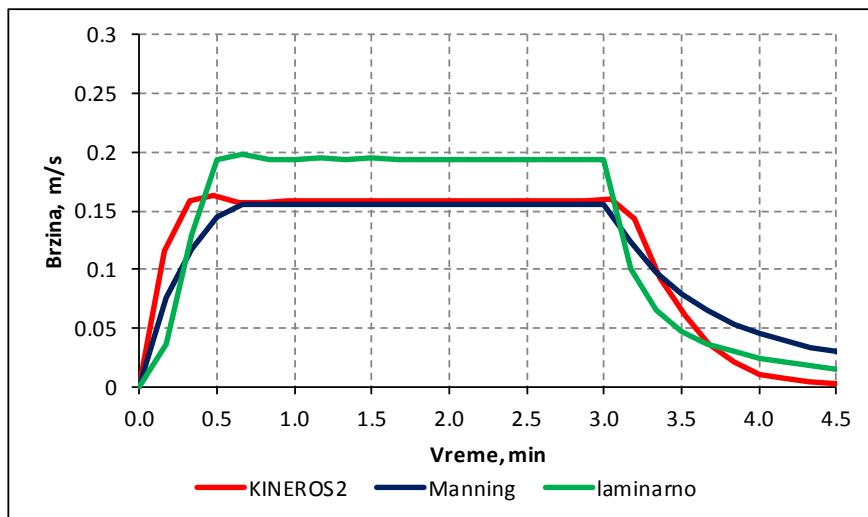
Model KINEROS2 je kalibrisan na osnovu parametra m , koji uzima vrednost od 1.8 i koeficijenta filtracije. Za model koji za proračun otpora koristi Manning-ov izraz zadržana je originalna vrednost parametra m po Manning-ovoj jednačini od $m=5/3$ dok je infiltracija obračunata preko koeficijenta oticaja. Oba modela koriste istu vrednost hrapavosti $n=0.020 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. U modelu koji trenje obračunava preko analitičkog izraza za laminarno tečenje zadržana je originalna vrednost parametra $m=3$ a infiltracija je obračunata preko koeficijenta oticaja.



Slika 7.1. Uporedni prikaz merenih i protoka dobijenih modelom – kalibracioni set

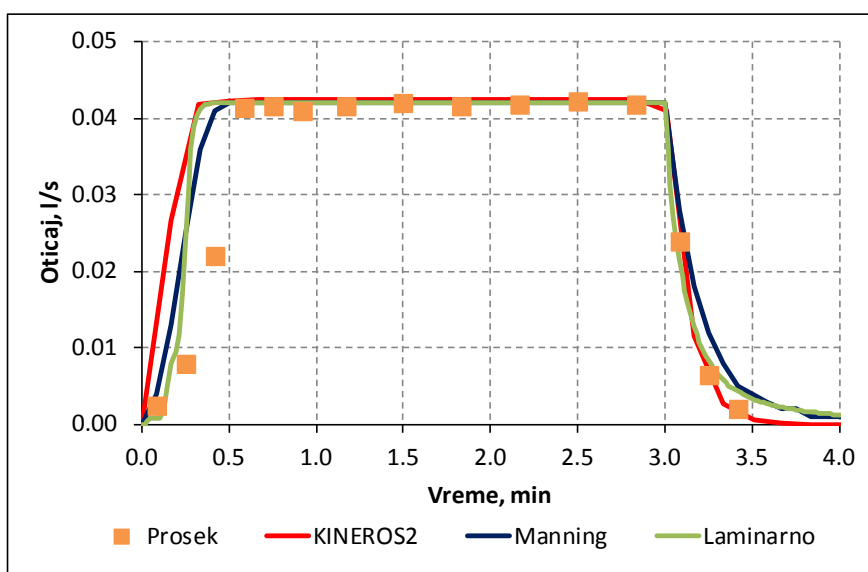


Slika 7.2. Dubine dobijene modelom – kalibracioni set

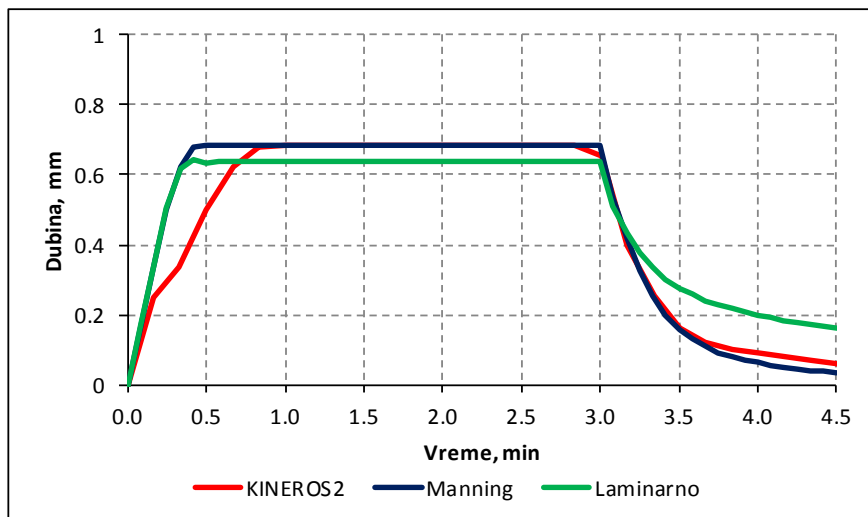


Slika 7.3. Brzine dobijene modelom – kalibracioni set

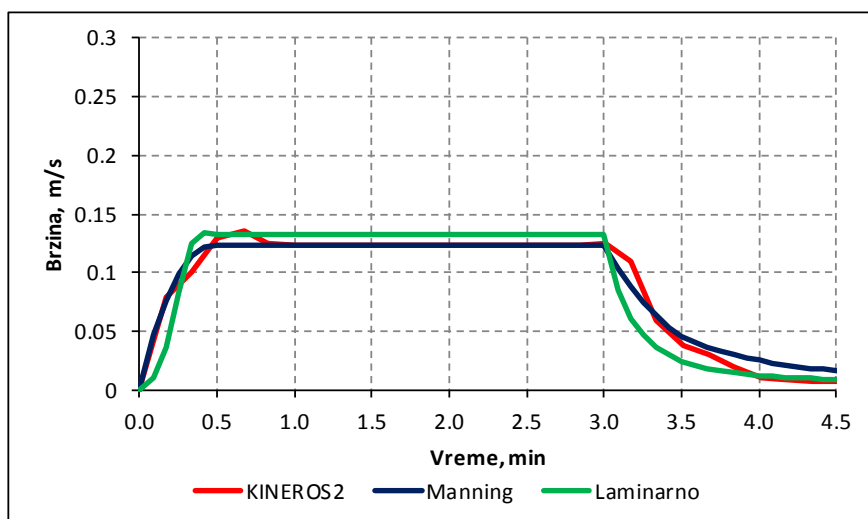
Na osnovu istih parametara kalibracije izvršena je i verifikacija modela oticaja. Rezultati su prikazani na slikama 7.4 – 7.6.



Slika 7.4. Uporedni prikaz merenih i protoka dobijenih modelom – verifikacioni set



Slika 7.5. Dubine dobijene modelom – verifikacioni set



Slika 7.6. Brzine dobijene modelom – verifikacioni

Na osnovu rezultata dobijenih modelom za kalibracioni i verifikacioni set merenja (slika 7.1 i slika 7.4), uočljivo je da sva tri modela daju iste vrednosti maksimalnog protoka. Vreme podizanja i recesiona grana hidrograma u modelu KINEROS2 se može kalibrisati parametrom m . Bez kalibracije parametra m , model KINEROS2 bi dao rezultate kao i model zasnovan na Manning-ovom izrazu za proračun otpora trenja. Takođe je uočljivo da model koji otpore računa preko analitičkog izraza za laminarno tečenje takođe daje rezultate bliske merenim vrednostima. Posmatrajući grane podizanja i opadanja hidrograma uočljivo je da model KINEROS2 i model sa analitičkim izrazom za otpore tečenja daju slične rezultate;

nešto bolje prate merene rezultate od modela zasnovanog na Manning-ovom izrazu.

Razlike u modelima su uočljivije ukoliko se uporede dubine odnosno brzine tečenja. Model KINEROS2 i model zasnovan na Manning-ovoj jednačini daju slične rezultate za dubinu i brzinu tečenja. Modelom sa analitičkim izrazom za otpore trenja za laminarno tečenje dobijaju se manje dubine a veće brzine tečenja vode u odnosu na model sa Manning-ovim izrazom. Navedene razlike u brzinama i dubinama vode direktno utiču i na pronos nanosa pa je zaključak da je, u konkretnom slučaju, za model oticaja bolje koristiti model laminarnog tečenja jer će, bez obzira na iste vrednosti protoka, dati dubinu i brzinu vode na osnovu originalnih, nekalibrisanih, jednačina.

7.2. Eroziija

7.2.1. Teorijske osnove

Većina modela navedena u literaturi, za model erozije, koristi jednačinu održanja mase nanosa u kojoj je difuzioni član zanemaren. U ovom radu, za proračun pokretanja i transporta nanosa, primeniće se jednačina neustaljenog kretanja koju koristi i model KINEROS2. Jednačina održanja mase nanosa je data sledećim izrazom:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} = S_r + S_e - S_d \quad (7.45)$$

gde je:

C – koncentracija sedimenata (-),

Q – protok (m³/s),

A – površina poprečnog preseka (m²),

t – vreme (s),

x – dužina (m),

S_r – erozija kišom (m²/s)

S_e – erozija od suspenzije sa dna (m²/s),

S_d – deponovanje iz suspenzije na dno (m²/s).

- erozija od udara kišne kapi, S_r

Erozija kišom računa se preko izraza:

$$S_r = C_f K(h) i^2 \quad q > 0 \quad (7.46)$$

gde je:

C_f – faktor zavistan od stanja i tipa podloge – parametar kalibracije (1/s)

i – intenzitet bruto kiše (m/s)

$K(h) = e^{(-c_h h)}$ - redukcionni faktor erozije kišom usled povećavanja dubine h (-)

c_h – parametar kalibracije (-).

- članovi izvora i ponora, S_e i S_d

U modelu KINEROS2, članovi S_e i S_d se obračunavaju kao hidraulička erozija (e_s) koja iznosi:

$$e_h = (S_e - S_d) = C_g (C_m - C) B h \quad (7.47)$$

$$C_g = \frac{w_f}{h} \quad (7.48)$$

gde je:

w_f – brzina tonjenja čestice (m/s),

h – dubina (m).

U modelu KINEROS2 brzina tonjenja je računata preko sledećih izraza:

$$w_f^2 = \frac{4g(\rho_s - 1)}{3C_D} d \quad (7.49)$$

$$C_D = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_n}} + 0.34 \quad (7.50)$$

$$R_n = \frac{w_f d}{\nu} \quad (7.51)$$

gde je:

w_f – brzina tonjenja čestice nanosa (m/s),

g – gravitaciono ubrzanje (m/s^2),

ρ_s – bezdimenzionalna gustina zrna (-),

C_D – koeficijent sile otpora (-),

R_n – Reynolds-ov broj čestice (-),

ν – kinematski koeficijent vode (m^2/s).

Ovakav obračun erozije je u skladu sa poznatim pristupom po kom je:

$$D = w_f C \quad (7.52)$$

odnosno:

$$E = w_f C_m \quad (7.53)$$

gde je:

D – tonjenje suspendovanih čestica brzinom w_f na dno (m/s),

w_f – brzina tonjenja čestice (m/s),

C – koncentracija sedimenata (-),

E – podizanje čestica sa dna (m/s),

C_m – ravnotežna koncentracija po kojoj je $E=D$ (-).

Brzina tonjenja se može sračunati i preko empirijskih izraza [50]:

$$w_f = \frac{g \cdot \Delta \cdot d_{sr}^2}{18 \cdot \nu} \quad d_{sr} < 0.0001 mm$$

$$w_f = \frac{10\nu}{d_{sr}} \left[\left(\frac{1 + (0.01 \cdot g \cdot \Delta \cdot d_{sr}^3)}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \quad 0.0001 < d_{sr} < 0.001 \quad (7.54)$$

$$w_f = \sqrt{1.1 \cdot g \cdot \Delta \cdot d_{sr}} \quad d_{sr} > 0.001$$

gde je:

g – konstanta gravitacionog ubrzanja (m/s^2),

Δ – relativna gustina nanosa (-),

ν – kinematski koeficijent viskoznosti vode (m^2/s),

d_{sr} – prosečan prečnik zrna (m).

Ravnotežna koncentracija nanosa se računa po empirijskim obrascima i generalno je u funkciji brzine i dubine toka. Jedan od obrazaca koji se često koristi je i obrazac Engelund-Hansen-a [51]:

$$C_m = \frac{0.5uu_*^3}{g^2 dh(\gamma_s - 1)^2} \quad (7.55)$$

gde je:

u – brzina (m/s),

u_* - brzina trenja (-),

g – gravitaciono ubrzanje (m/s),

d – prečnik zrna sedimenta (m),

h – dubina (m),

γ – specifična težina zrna sedimenta (-).

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{\frac{\rho ghS_0}{\rho}} = \sqrt{ghS_0} \quad (7.56)$$

gde je:

τ – tangencijalni napon (N/m²),

S_0 – nagib dna (-).

Kada se obrazac (7.56) uvrsti u (7.55) dobija se:

$$C_m \frac{0.5u(ghS_0)^{\frac{3}{2}}}{g^2 dh(\gamma_s - 1)^2} = \frac{0.5}{g(\gamma_s - 1)} \sqrt{\frac{hS_0}{g}} uS_0 \quad (7.57)$$

Model KINEROS2 koristi vrlo sličan obrazac. Pozivajući se na rad Govers-a iz 1990. godine jednačina (7.56) je proširena tzv. donjim pragom (kritičnom vrednošću):

$$C_m = \frac{0.5}{g(\gamma_s - 1)^2} \sqrt{\frac{Sh}{g}} (uS_0 - 0.004) \quad (7.58)$$

Dakle, ukoliko je $uS_0 < 0.004$, transportni kapacitet je jednak nuli.

Kako bi se utvrdio uticaj pomenutog člana (donjeg praga) modelisaće se erozija i transport nanosa na osnovu izraza (7.58) i na osnovu izraza (7.57) a rezultati će se međusobno uporediti.

7.2.2. Numeričko rešavanje jednačine transporta nanosa

Paralelno sa proračunom dubina, model računa proticaje i brzine u narednom vremenskom koraku a zatim, koristeći ove veličine, ulazi u proračun pokretanja i transporta nanosa. Kao početni uslov, u trenutku $t=0$, odnosno granični uslov na uzvodnom kraju $x=1$, u modelu su zadate vrednosti koncentracije $C(x,t)=0$.

Jednačina održanja mase nanosa (7.45) se takođe diskretizuje primenom Preissmann-ove šeme i ona glasi:

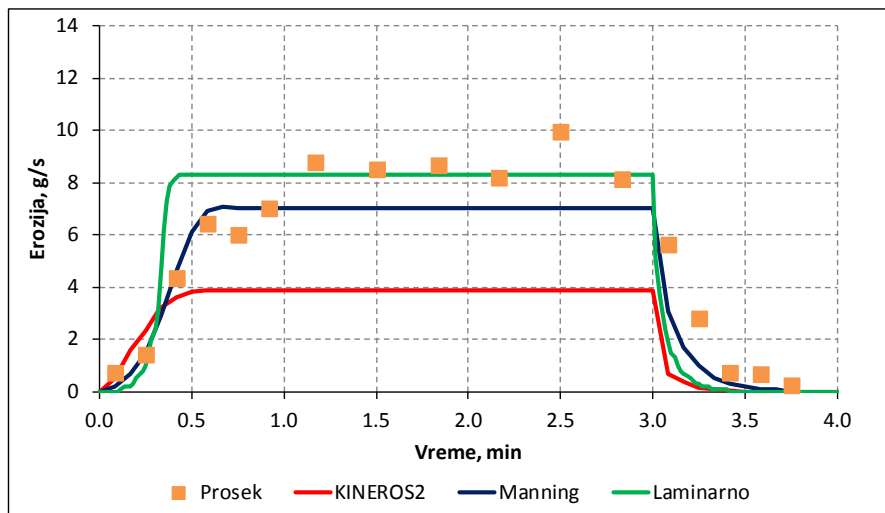
$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2\Delta t} h_{i+1}^{j+1} + \frac{\theta}{\Delta x} u_{i+1}^{j+1} h_{i+1}^{j+1} + \frac{\theta w_f}{2} \right) C_{i+1}^{j+1} = \frac{1}{2\Delta t} h_{i+1}^j C_{i+1}^j - \\ & \frac{1}{2\Delta t} \left(h_i^{j+1} C_i^{j+1} - h_i^j C_i^j \right) + \frac{\theta}{\Delta x} u_i^{j+1} h_i^{j+1} C_i^{j+1} - \\ & \frac{1-\theta}{\Delta x} \left(u_{i+1}^j h_{i+1}^j C_{i+1}^j - u_i^j h_i^j C_i^j \right) + \frac{\theta}{2} \left(\frac{S_{ri+1}^{j+1} + S_{ri}^{j+1}}{B} \right) + \quad (7.59) \\ & \frac{1-\theta}{2} \left(\frac{S_{ri+1}^j + S_{ri}^j}{B} \right) + \frac{\theta}{2} \left(\frac{S_{ei+1}^{j+1} + S_{ei}^{j+1}}{B} \right) + \\ & \frac{1-\theta}{2} \left(\frac{S_{ei+1}^j + S_{ei}^j}{B} \right) - \frac{\theta w_f}{2} C_i^{j+1} - \frac{(1-\theta)w_f}{2} (C_{i+1}^j + C_i^j) \end{aligned}$$

S obzirom da su vrednosti dubina i brzina vode poznati, iz prethodne jednačine se, eksplicitno, može odrediti nepoznata vrednost koncentracije nanosa.

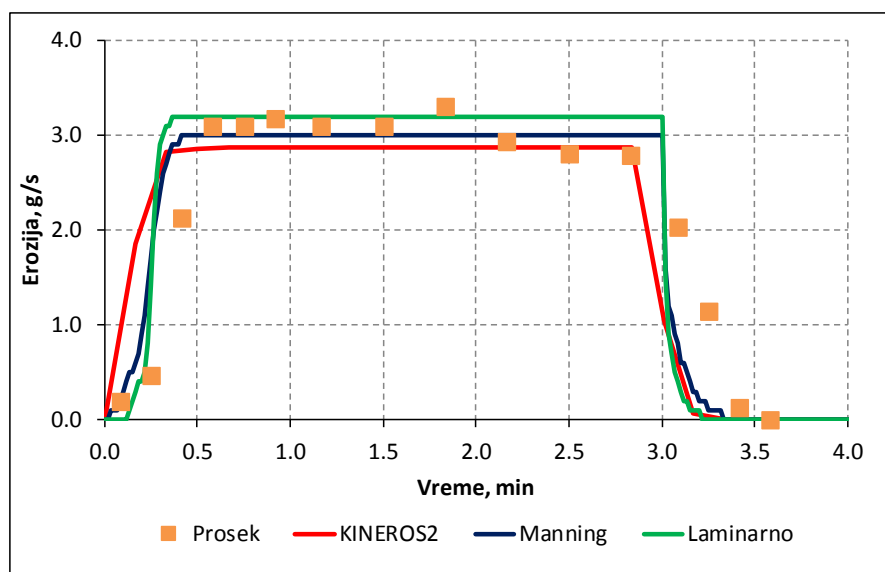
Kao parametri kalibracije modela erozije poslužili su parametri c_f i c_h u jednačini (7.46). Vrednost parametra c_h je preuzeta iz samog programskog koda modela KINEROS2 i iznosi 656, dok je parametar c_f podešavan dok se merene i modelisane vrednosti nisu složile.

7.2.3. Rezultati modela erozije

Kao faktor kalibracije modela erozije poslužio je faktor erodibilnosti zemljišta, c_f , sa vrednošću od 70000. Rezultati kalibracije i verifikacije modela prikazani su na slikama 7.7 i 7.8.



Slika 7.7. Uporedni prikaz merenog i pronosa nanosa dobijenog modelima – kalibracioni set

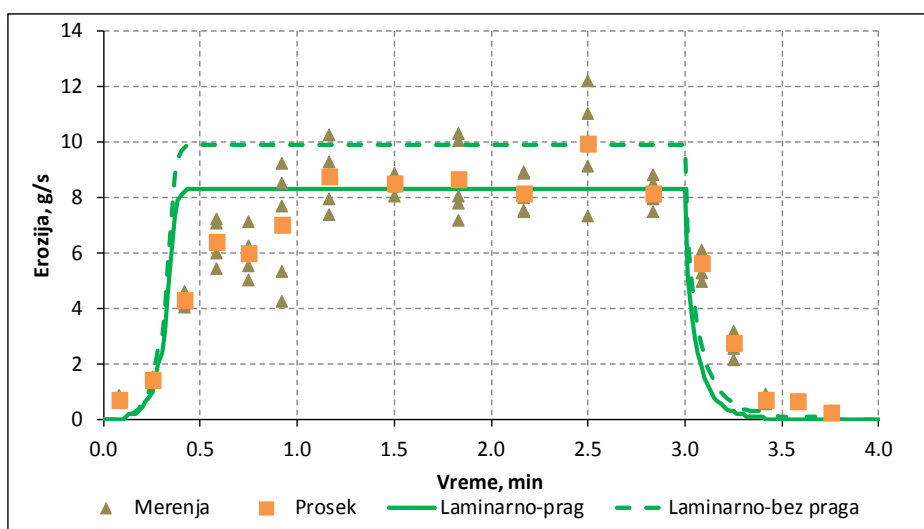


Slika 7.8. Uporedni prikaz merenog i pronosa nanosa dobijenog modelima – verifikacioni set

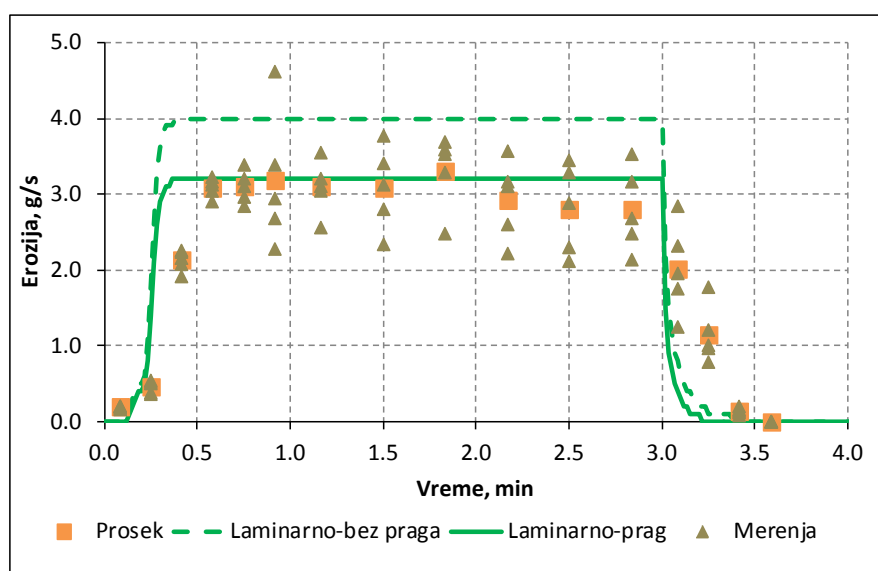
Model sa laminarnom pretpostavkom daje najveće vrednosti erozije za oba seta merenja. Ovo je, s obzirom na činjenicu da taj model daje najveće brzine, bilo očekivano o čemu se pisalo u poglavlju 7.1.3. Preostala dva modela zahtevaju dodatnu kalibraciju kako bi se dobila ista količina erozije kao kod navedenog

modela. Sva tri modela koriste izraz 6.58 za obračun transportnog kapaciteta po kom, ukoliko je $u_{S0} < 0.004$ nema transporta nanosa. U nastavku rada će se analizirati isključivo rezultati dobijeni modelom koji otpore obračunava analitičkim izrazom za laminarno tečenje po površini terena.

Poređenje rezultata modela koji koriste različite izraze za transportni kapacitet dato je na slikama 7.9 i 7.10. Poredi se obrazac (7.58), koji se koristi i u KINEROS-u, i obrazac (7.57) koji nema tzv. donji prag transporta nanosa.



Slika 7.9. Proračun erozije na osnovu jednačina (6.57) i (6.58) za laminarno tečenje – kalibracioni set



Slika 7.10. Proračun erozije na osnovu jednačina (7.57) i (7.58) za laminarno tečenje – verifikacioni set

Analiza i prikaz rezultata na osnovu modelisanja fizičkih procesa

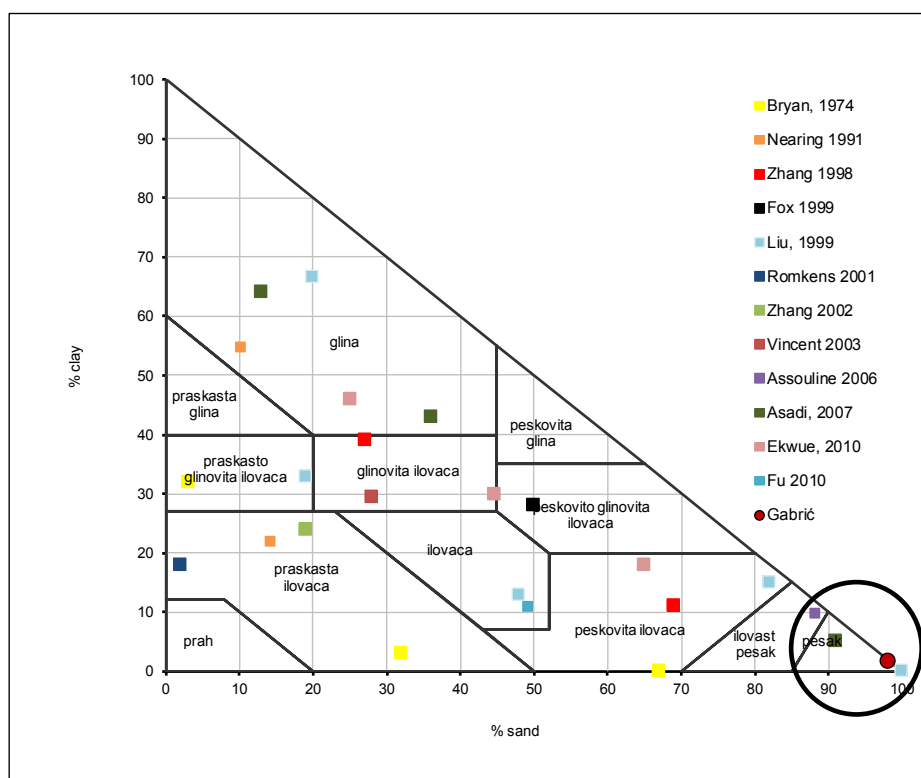
Na osnovu slika 7.9 i 7.10 se može zaključiti da se, s obzirom na „šaranje“ rezultata, oba izraza za transportni kapacitet mogu uspešno koristiti.

Poglavlje 8

8. Diskusija i zaključci

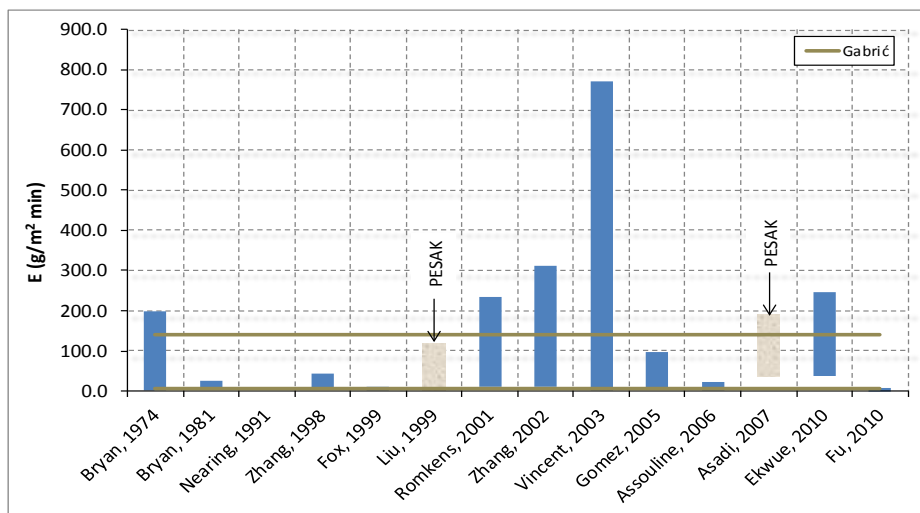
Eksperimentalne površine za izučavanje erozije u ovom radu kreću se u opsegu od 0.75-2.25 m², odnosno one su dužine 1.5-4.5 metara a širine 0.5 m. Po površini one spadaju u grupu ispitivanih instalacija na kojima se zbog male dužine instalacije, kraće od 9 metara, ne formiraju brazde. Rezultati eksperimenata u ovom radu su potvrdili ovo zapažanje literature.

U ovom radu izučavana je erozija sa peskovitog zemljišta (Slika 8.1).



Slika 8.1. Izučavana zemljišta

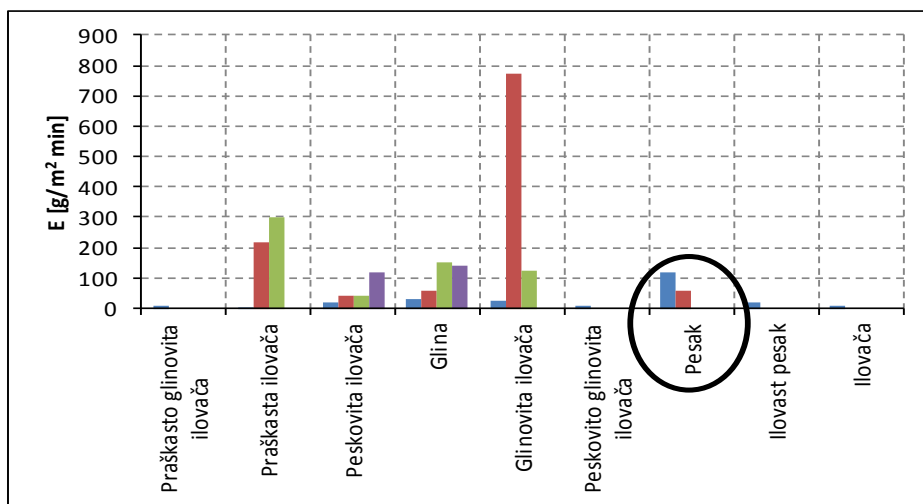
Eroziju sa ovakvog zemljišta su izučavali Liu [8] i Asadi [30], dok je najveći broj autora ispitivao zemljišta sa primesama gline.



Slika 8.2 Dijapazoni rezultata erozije za sve vrste izučavanih zemljišta

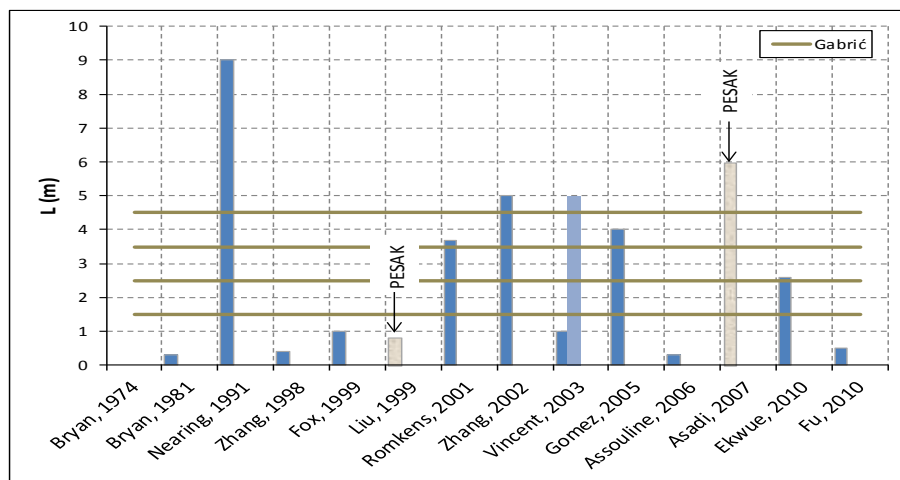
Dijapazoni rezultata erozije (težina po jedinici površine u jedinici vremena) za peskovito zemljište se delimično poklapaju sa rezultatima literature (Slika 8.2).

Do sada izvršena izučavanja erozije, za različite tipove zemljišta, nisu vršena pod istim uslovima, te uticaj vrste zemljišta na eroziju ne može jednoznačno da se utvrdi (Slika 8.3). Iako su naponi u koherentim zemljištima veći od napona u nekoherentnim zemljištima [12] na slici 8.3 je uočljivo da erozija nekoherentnih, peskovitih, zemljišta može biti manja od erozije koherentnih zemljišta.



Slika 8.3. Maksimalne vrednosti erozije u zavisnosti od tipa zemljišta

Uticaj dužine slivne površine na eroziju u ovom radu je istraživana na instalaciji dužine 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 metara (Slika 8.4).



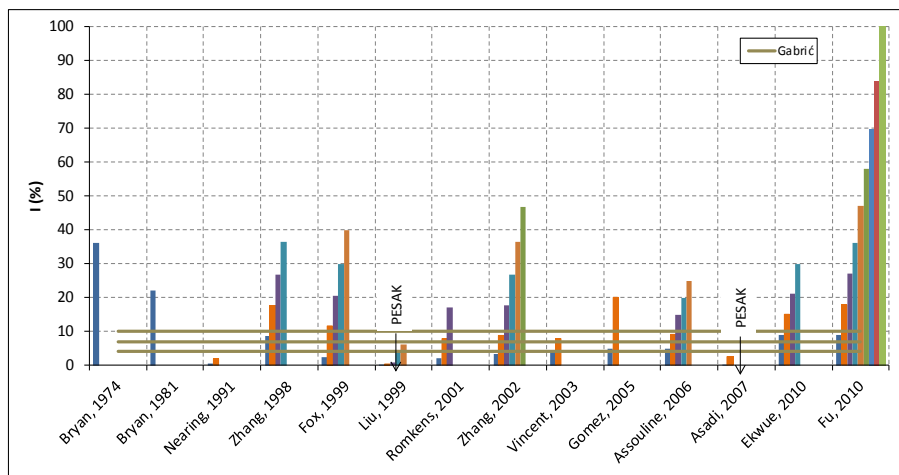
Slika 8.4. Izučavane dužine slivnih površina

Ove dužine su u opsegu dužina instalacija na kojima se izučavala erozija sa peskovitog zemljišta [8], [30].

Od svih autora čiji su radovi bili dostupni, jedino je Vincent [26] izučavao eroziju na različitim dužinama slivne površine – sa glinovite ilovače. Njegovi rezultati sa instalacije dužine 1 i 5 metara, pri intenzitetima kiše od 1.3 – 30 mm/h, ukazuju na postojanje zavisnosti između dužine slivne površine i erozije. Rezultati ovog rada su potvrdili njegov zaključak uz dodatak da je ova veza linearna.

Za svaki analizirani intenzitet kiše i nagib, ukupna erozija sa svih površina linearno raste. Visoki intenziteti kiše uzrokovali su jak površinski oticaj čiji je transportni kapacitet bio dovoljan da ne dozvoli taloženje erodovanog materijala na slivnoj površini. Međusobnim poređenjem rezultata, prikazanih po jedinici površine (g/m^2) i sprovođenjem testa homogenosti utvrđeno je da su rezultati homogeni, odnosno da je za analizirane intenzitete kiše, nagibe i dužine slivnih površina produkcija nanosa konstantna. U dostupnoj literaturi nisu pronađene slične analize.

Eksperimenti u ovom radu sprovedeni su pri nagibima slivnih površina od 4, 7 i 10% (Slika 8.5).



Slika 8.5. Izučavani nagibi

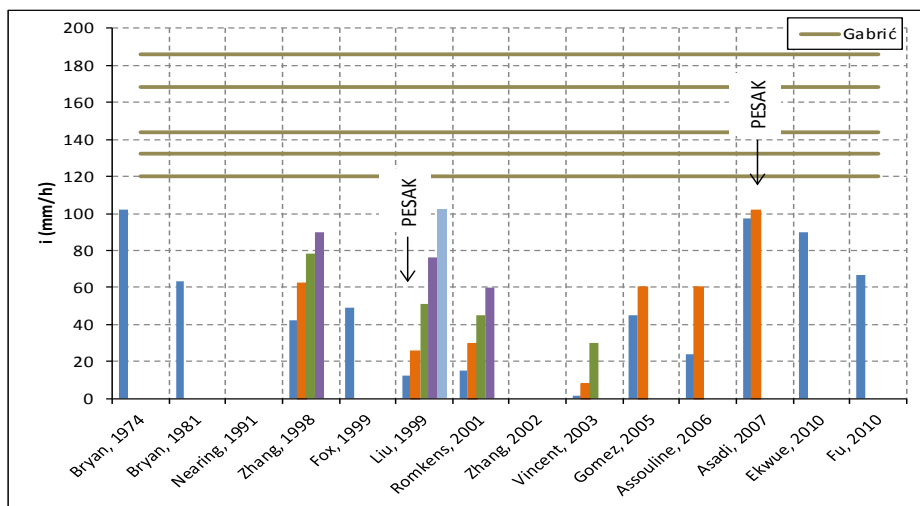
Navedeni nagibi su veći od izučavanih nagiba za peskovita zemljišta ali su u opsegu nagiba pri kojima su vršena ostala istraživanja.

Za nepeskovita zemljišta veza između nagiba slivne površine i erozije je eksponencijalna ([22], [25]) odnosno linearna ([23], [31]). U nekim slučajevima [29], pri manjim intenzitetima kiše, erozija je u linearnoj vezi sa nagibom dok je pri većim intenzitetima kiše ova veza eksponencijalna.

Za peskovita zemljišta vrsta veze nije definisana (za dužinu instalacije od 5 metara) odnosno ne postoji (za dužine od 0.81 i 1 metar) ([26], [30]).

Rezultati ovog rada potvrdili su da linearna veza najbolje prikazuje odnos između nagiba slivne površine i erozije. Primetno je veće rasipanje rezultata merenja pri nagibima od 10%.

Intenziteti kiše u ovom radu variraju od 120-186 mm/h i oni su veći od intenziteta navedenih u literaturi (Slika 8.6).



Slika 8.6. Izučavani intenziteti kiša

Stručna literatura naglašava da se povećanjem intenziteta kiše povećava i ukupna erozija. Većina dostupne literature upućuje na linearnu vezu između erozije i intenziteta kiše ([8], [22], [26], [29]), dok manji broj ([29]) upućuje i na eksponencijalnu vezu. Merenja u ovom radu su potvrdila linearnu vezu erozije i intenziteta kiše.

Prema rezultatu ovih eksperimenata, erozija je funkcija intenziteta kiše, dužine i nagiba slivne površine. Na ovo ukazuju rezultati višestruke regresije koja je sprovedena kako za ukupnu eroziju tako i za eroziju iskazanu po jedinici površine. Koeficijent determinacije R^2 za ukupnu eroziju iznosi 0.69, dok za eroziju iskazanu po jedinici površine ovaj koeficijent iznosi 0.74. Oba koeficijenta su veća od koeficijenata dobijenih zasebno analizom intenziteta kiše, nagiba i dužine slivne površine.

Istovremeni uticaj na eroziju intenziteta kiše, dužine i nagiba slivne površine ispitan je numeričkim modelom oticaja i erozije KINEROS2.

Na osnovu rezultata laboratorijskih opita izvršena je kalibracija i verifikacija numeričkog modela KINEROS2. Ovim modelom erozija je računata sa površina pod nagibom 4, 7 i 10%, dužinama od 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 i širine 0.5 metara. Kao parametar kalibracije poslužio je koeficijent erodibilnosti zemljišta.

Prema navodima literature, faktor erodibilnosti zemljišta, kao parametar kalibracije, ima veće vrednosti od preporučenih [45]. Rezultati ovog rada su potvrdili ovo zapažanje. Razloge za visoke faktore erodibilnosti analiziranog

zemljišta treba tražiti u činjenici da su na instalaciji korišćeni poremećeni uzorci znatno manje zbijenosti od prirodnog, neporemećenog zemljišta.

Merenje erozije sa peskovitog, vodom zasićenog zemljišta vršeno je pomoću dva seta merenja. Prvi set merenja bio je namenjen za obradu podataka statističkim metodama. Na instalaciju pod nagibom od 10, 7 i 4% aplicirane su kiše intenziteta 3.1, 2.8, 2.4, 2.2 i 2.0 mm/min. Opiti su se sprovodili na instalaciji veličine 6x1 metar, podeljene na četiri table dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 metara, širine 0.5 metara. Kiša je aplicirana uz pomoć simulatora kiše konstruisanog za potrebe ovog rada. Trajanje kiše iznosilo je 15 minuta. Izvršeno je ukupno 75 opita.

Drugi set merenja poslužio je za kalibraciju i verifikaciju modela oticaja. Sastojao se od merenja izvršenih na tablama dužine 4.5 metara (kalibracioni set) i 2.5 metara (verifikacioni set) pod nagibom od 10% i kiši intenziteta 3.1 mm/min.

Na osnovu rezultata merenja dobijeni su sledeći zaključci:

- rezultati merenja oticaja ukazuju da laboratorijske instalacije mogu uspešno reprodukovati kompletne hidrograme oticaja,
- problem pri izučavanju oticaja i erozije sa instalacija sa vodopropusnim tlom je variranje oticaja pri istim uslovima izvođenja eksperimenta što naročito utiče i na produkciju i pronos nanosa,
- simulator kiše sa oscilirajućom mlaznicom i površinu dimenzija 1x6 m² ima Christiansen-ov koeficijent ravnomernosti $u=0.8$. Najveća vrednost ovog koeficijenta iznosi 0.9 za površinu širine 0.1 metar,
- za stacionarnu mlaznicu vrednost Christiansen-ovog koeficijenta iznosi 0.46,
- na dužinama instalacija od 1.5-4.5 metara se ne javljaju brazde,
- dužina slivne površine od 1.5-4.5 metra linearno utiče na povećanje ukupne količine erozije,
- iskazano po jedinici površine, dužine površine od 1.5-4.5 metara širene 0.5 metara imaju istu produkciju nanosa po jedinici površine. Na ovo ukazuju rezultati dobijeni Kruskal-Wallis-ovim testom homogenosti,
- zavisnost između nagiba slivne površine i erozije najbolje se opisuje linearnom vezom. Odstupanje merenih rezultata od srednje vrednosti je najuočljivije kod nagiba od 10% i u korelaciji je sa intenzitetom kiše,

odnosno veći intenzitet kiše daje veće odstupanje. Iz ovog se zaključuje da erozija osim nagiba zavisi i od intenziteta kiše. Koeficijent determinacije, kao mera linearnosti, iznosi 0.41 za ukupnu, odnosno 0.55 za eroziju izraženu po jedinici površine.

- između intenziteta kiše i erozije rezultati upućuju na linearno povećanje erozije povećanjem intenziteta kiše. Za nagibe od 10% odstupanje od srednje vrednosti rezultata erozije je veće nego za nagibe od 4% i 7%. Ovim se potvrđuje prethodni zaključak da se uticaji nagiba i intenziteta padavina ne mogu posmatrati odvojeno. Koeficijent determinacije za ukupnu eroziju iznosi 0.13 a za eroziju iskazanu po jedinici površine 0.2,
- metodom višestruke regresije je dobijena linearna veza između erozije i uticaja intenziteta kiše, nagiba i dužine slivne površine. Koeficijent determinacije za ukupnu eroziju iznosi 0.69 a za eroziju izraženu po jedinici površine 0.74. Ovim je još jednom potvrđen zaključak da se erozija mora posmatrati kao složeni proces na koju utiče intenzitet kiše, nagib i dužina slivne površine,
- proširene merne nesigurnosti intenziteta kiše variraju u granicama od ± 0.74 mm/min do ± 0.095 mm/min. Na ukupne vrednosti erozije, u zavisnosti od intenziteta kiše, nagiba i dužine slivne površine merna nesigurnost utiče sa ± 4.7 do $\pm 15\%$,
- primenom jednačina kinematskog talasa moguće je vršiti simulaciju erozije uz prethodno kalibrisanje modela,
- vrednosti kalibrisanog parametra erodibilnosti zemljišta u modelu KINEROS2 prevazilaze preporučene vrednosti ovog parametra navedene u uputstvu za korišćenje programa [41], što potvrđuje i literatura [45],
- parametar erodibilnosti zemljišta je u funkciji nagiba slivne površine,
- analizom jednačina za proračun koeficijenta trenja i poređenjem rezultata numeričkog modela sa merenjima, zaključeno je da model koji koristi analitički obrazac laminarnog tečenja za proračun otpora trenja daje najbolje slaganje sa merenim rezultatima oticaja,

- u jednačinama za proračun pokretanja i transporta nanosa, erozija kišom predstavlja nepoznanicu u pogledu načina određivanja pa se stoga kalibracija vrši parametrima koji nemaju fizičkog značenja.

Prethodni zaključci važe isključivo za uslove pri kojima su se vršili opiti te bi istraživanja trebalo nastaviti u sledećim pravcima:

- merenja vršiti na manjim instalacijama, odnosno na instalacijama sa jednim mernim mestom,
- merenja vršiti na sloju tla veće debljine,
- vršiti uzorkovanje kako površinskog tako i potpovršinskog oticaja,
- tokom opita meriti promenu vlažnosti zemljišta,
- ispitati eroziju usled kiša slabijih intenziteta,
- detaljnije se posvetiti ispitivanju erozije kišom,
- model površinskog oticaja i erozije dopuniti modelom infiltracije,
- jednačine kinematskog talasa proširiti jednačinama difuzionog ili punog dinamičkog talasa,
- linijski model površinskog oticaja prošiti na ravanski model.

Literatura

- [1] S. Kostadinov, *Bujični tokovi i erozija*. Šumarski fakultet, 2008.
- [2] Z. Radić, "Istraživanja procesa oticaja na bazi podataka sa laboratorijskih slivova," *Vodoprivreda*, vol. 24, no. 137–140, p. 13, 1992.
- [3] Z. Radić, "Modeliranje oticaja od uniformnih i neuniformnih kiša na bazi podataka sa laboratorijskih slivova," Beograd, Beograd, 1988.
- [4] S. Jovanović, *Hidrologija*. Beograd: Naučna knjiga, 1990.
- [5] W. H. Wischmeier and D. D. Smith, *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: guide for selection of practices for soil and water conservation*. Agricultural Research Service, U. S. Dept of Agriculture in cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station, 1965.
- [6] R. P. C. Morgan, *Soil erosion and conservation*. John Wiley & Sons, 2009.
- [7] R. B. Bryan, "Water erosion by splash and wash and the erodibility of Albertan soils," *Geogr. Ann. Ser. Phys. Geogr.*, pp. 159–181, 1974.
- [8] H. Liu, "Bare soil erosion dependence on soil and rainfall properties," University of Houston, 1999.
- [9] I. Douglas, "Semiarid soil and water conservation, edited by H. J. Finkel. CRC press, Boca raton (Florida) 1986. ISBN 0 8493 6112 5, £52.50 (Hardback), 126 pp," *Land Degrad. Dev.*, vol. 1, no. 1, pp. 74–75, Jul. 1989.
- [10] M. M. Al-Durrah and J. M. Bradford, "The mechanism of raindrop splash on soil surfaces," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 46, no. 5, pp. 1086–1090, 1982.
- [11] M. J. Singer and J. Blackard, "Slope Angle-Interrill Soil Loss Relationships for Slopes up to 50%1," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 46, no. 6, p. 1270, 1982.
- [12] M. A. Nearing, J. M. Bradford, and S. C. Parker, "Soil Detachment by Shallow Flow at Low Slopes," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 55, no. 2, p. 339, 1991.
- [13] C. Yao, T. Lei, W. J. Elliot, D. K. McCool, J. Zhao, and S. Chen, "Critical conditions for rill initiation," *Trans. ASAE Am. Soc. Agric. Eng.*, vol. 51, no. 1, p. 107, 2008.
- [14] N. Hudson, *Field Measurement of Soil Erosion and Runoff*. Food & Agriculture Org., 1993.

- [15] L. D. Meyer and D. L. McCune, "Rainfall simulator for runoff plots," *Agric Eng*, vol. 39, no. 10, pp. 644–648, 1958.
- [16] Norris P. Swanson, "Rotating-Boom Rainfall Simulator," *Trans. ASAE*, vol. 8, no. 1, pp. 0071–0072, 1965.
- [17] R. P Long and K. R. Demars, "Design Considerations for a Prototype Erosion Control Testing Plot," University of Connecticut Dept. of Civil and Environmental Engineering, Final NETCR 56, Dec. 2005.
- [18] M. J. Hall, P. M. Johnston, and H. S. Wheeler, "Evaluation of overland flow models using laboratory catchment data I. An apparatus for laboratory catchment studies," *Hydrol. Sci. J.*, vol. 34, no. 3, pp. 277–288, Jun. 1989.
- [19] R. Lal, *Soil erosion research methods*. CRC Press, 1994.
- [20] R. Bryan, "Soil erosion under simulated rainfall in the field and laboratory: variability of erosion under controlled conditions," presented at the Erosion and Sediment Transport Measurement, 1981, pp. 391–403.
- [21] R. B. Bryan and S.-H. Luk, "Laboratory experiments on the variation of soil erosion under simulated rainfall," *Geoderma*, vol. 26, no. 4, pp. 245–265, Nov. 1981.
- [22] X. C. Zhang, M. A. Nearing, L. D. Norton, W. P. Miller, and L. T. West, "Modeling Interrill Sediment Delivery," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 62, no. 2, p. 438, 1998.
- [23] D. M. Fox and R. B. Bryan, "The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient," *Catena*, vol. 38, no. 3, pp. 211–222, 2000.
- [24] M. J. Römken, K. Helming, and S. N. Prasad, "Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes," *Catena*, vol. 46, no. 2, pp. 103–123, 2002.
- [25] G. H. Zhang, B. Y. Liu, M. A. Nearing, C. H. Huang, and K. L. Zhang, "Technical note: Soil detachment by shallow flow," *Trans. Am. Soc. Agric. Eng. ASAE*, vol. 45, no. 2, pp. 351–357, 2002.
- [26] V. A. Chaplot and Y. Le Bissonnais, "Runoff features for interrill erosion at different rainfall intensities, slope lengths, and gradients in an agricultural loessial hillslope," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 67, no. 3, pp. 844–851, 2003.
- [27] J. Blanquies, M. Scharff, and B. Hallock, "The design and construction of a rainfall simulator," 2003.

- [28] J. A. Gómez and M. A. Nearing, "Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment," *CATENA*, vol. 59, no. 3, pp. 253–266, Jan. 2005.
- [29] S. Assouline and M. Ben-Hur, "Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing," *CATENA*, vol. 66, no. 3, pp. 211–220, Jun. 2006.
- [30] H. Asadi, H. Ghadiri, C. W. Rose, and H. Rouhipour, "Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes," *Earth Surf. Process. Landf.*, vol. 32, no. 5, pp. 711–724, Apr. 2007.
- [31] E. I. Ekwue and A. Harrilal, "Effect of soil type, peat, slope, compaction effort and their interactions on infiltration, runoff and raindrop erosion of some Trinidadian soils," *Biosyst. Eng.*, vol. 105, no. 1, pp. 112–118, Jan. 2010.
- [32] S. Fu, B. Liu, H. Liu, and L. Xu, "The effect of slope on interrill erosion at short slopes," *CATENA*, vol. 84, no. 1–2, pp. 29–34, Jan. 2011.
- [33] Wischmeier, *{Predicting Rainfall Erosion Losses. Agriculture Handbook 537}*. United States Department of Agriculture. Science and Education Administration, 1978.
- [34] K. G. Renard, G. R. Foster, G. A. Weesies, and J. P. Porter, "RUSLE: Revised universal soil loss equation," *J. Soil Water Conserv.*, vol. 46, no. 1, pp. 30–33, Jan. 1991.
- [35] K. G. Renard, G. R. Foster, D. C. Yoder, and D. K. McCool, "RUSLE revisited: Status, questions, answers, and the future," *J. Soil Water Conserv.*, vol. 49, no. 3, pp. 213–220, May 1994.
- [36] H. Wei, M. A. Nearing, J. J. Stone, D. P. Guertin, K. E. Spaeth, F. B. Pierson, M. H. Nichols, and C. A. Moffet, "A New Splash and Sheet Erosion Equation for Rangelands," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 73, no. 4, p. 1386, 2009.
- [37] V. Đukić and S. Petković, "Mogućnosti modeliranja erozionih i transportnih procesa u rečnim slivovima /Review of soil erosion and sediment transport models in river basins," *Vodoprivreda*, 2009.
- [38] V. Đukić, "Hidrauličko-hidrološki model geneze i transporta nanosa u slivu," Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 2010.

- [39] H. Aksoy and M. L. Kavvas, "A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models," *CATENA*, vol. 64, no. 2–3, pp. 247–271, Dec. 2005.
- [40] W. S. Merritt, R. A. Letcher, and A. J. Jakeman, "A review of erosion and sediment transport models," *Environ. Model. Softw.*, vol. 18, no. 8–9, pp. 761–799, Oct. 2003.
- [41] D. A. Woolhiser, R. E. Smith, D. C. Goodrich, and U. S. D. O. A., AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE, *KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1990.
- [42] D. J. Semmens, "KINEROS2 and the AGWA Modeling Framework DJ Semmens, Goodrich, DC 2, Unkrich, CL 2 Smith, RE 3; Woolhiser, DA 3, and Miller, SN 4."
- [43] L. Kalin and M. M. Hantush, "Assessment of two physically-based watershed models based on their performances of simulating water and sediment movement", in *Conference Proceedings, 1st Interagency Conference on Research in the Watersheds (ICRW), Benson, AZ, 2003*, pp. 27–30.
- [44] D. C. Goodrich and D. A. Woolhiser, "Reprinted from Hydraulic Engineering. Proceedings of 1988 National Conference," 1988.
- [45] R. E. Smith, D. C. Goodrich, and C. L. Unkrich, "Simulation of selected events on the Catsop catchment by KINEROS2: a report for the GCTE conference on catchment scale erosion models," *Catena*, vol. 37, no. 3, pp. 457–475, 1999.
- [46] E. Zelenhasić and M. Ruski, *Inženjerska hidrologija*. Naučna knjiga, 1991.
- [47] N. K. Todorović-Vasović and A. Jesenko Rokvić, *Praktikum za eksperimentalne vežbe iz fizike*, 3rd ed. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Farmaceutski fakultet, 2013.
- [48] "Expression of the Uncertainty of Measurements in Calibration." European Co-Operation for Accreditation, Dec-1999.
- [49] D. J. Sheskin, *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures*. crc Press, 2003.
- [50] M. B. Jovanović, *Regulacija reka: rečna hidraulika i morfologija*. Građevinski fakultet, 2002.

- [51] F. A. Engelund and E. Hansen, *Monograph on sediment transport in alluvial streams*. Teknisk forlag, 1967.

Prilozi

Prilog 1. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 3.1 mm/min sa terena u nagibu od 10%

| 1 | Opit | t | 10% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=3.1 mm/min, L= 2.5 m | i=3.1 mm/min, L= 3.5 m | i=3.1 mm/min, L= 4.5 m | i=3.1 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 1 | 3 | 8.25 | 12.25 | 15.00 | 5.50 |
| 5 | | 6 | 9.50 | 13.25 | 17.50 | 6.00 |
| 6 | | 9 | 9.50 | 13.50 | 17.50 | 6.00 |
| 7 | | 12 | 9.50 | 13.50 | 17.50 | 6.00 |
| 8 | | 15 | 10.25 | 15.00 | 18.75 | 6.50 |
| 9 | 2 | 3 | 9.25 | 13.25 | 16.00 | 5.00 |
| 10 | | 6 | 9.75 | 14.00 | 16.75 | 6.00 |
| 11 | | 9 | 10.00 | 14.25 | 16.75 | 6.00 |
| 12 | | 12 | 10.50 | 14.00 | 16.75 | 6.25 |
| 13 | | 15 | 11.25 | 16.50 | 17.50 | 6.50 |
| 14 | 3 | 3 | 9.00 | 12.00 | 15.00 | 5.50 |
| 15 | | 6 | 10.00 | 13.00 | 17.50 | 6.00 |
| 16 | | 9 | 10.00 | 13.25 | 17.50 | 6.00 |
| 17 | | 12 | 10.25 | 13.25 | 17.50 | 6.00 |
| 18 | | 15 | 11.00 | 14.50 | 18.75 | 6.50 |
| 19 | 4 | 3 | 8.25 | 12.25 | 15.00 | 5.50 |
| 20 | | 6 | 9.50 | 13.25 | 17.50 | 6.00 |
| 21 | | 9 | 9.50 | 13.50 | 17.50 | 6.00 |
| 22 | | 12 | 9.50 | 13.50 | 17.50 | 6.00 |
| 23 | | 15 | 10.25 | 15.00 | 18.75 | 6.50 |
| 24 | 5 | 3 | 9.00 | 11.25 | 14.50 | 5.25 |
| 25 | | 6 | 10.00 | 12.00 | 15.50 | 5.50 |
| 26 | | 9 | 10.00 | 12.00 | 15.50 | 5.50 |
| 27 | | 12 | 10.00 | 12.00 | 15.50 | 5.50 |
| 28 | | 15 | 10.25 | 12.50 | 15.75 | 5.75 |

Prilog 2. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.8 mm/min sa terena u nagibu od 10%

| 1 | Opit | t | 10% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=2.8 mm/min, L= 2.5 m | i=2.8 mm/min, L= 3.5 m | i=2.8 mm/min, L= 4.5 m | i=2.8 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 6 | 3 | 7.75 | 11.50 | 14.00 | 4.25 |
| 5 | | 6 | 8.50 | 12.25 | 14.50 | 5.50 |
| 6 | | 9 | 8.75 | 12.50 | 15.25 | 5.50 |
| 7 | | 12 | 8.75 | 12.75 | 15.50 | 5.50 |
| 8 | | 15 | 9.75 | 13.75 | 16.00 | 6.00 |
| 9 | 7 | 3 | 8.50 | 11.75 | 14.50 | 4.00 |
| 10 | | 6 | 7.75 | 12.50 | 15.00 | 5.00 |
| 11 | | 9 | 8.75 | 12.75 | 16.00 | 5.00 |
| 12 | | 12 | 8.75 | 13.00 | 16.25 | 5.00 |
| 13 | | 15 | 9.75 | 14.00 | 16.50 | 5.75 |
| 14 | 8 | 3 | 8.00 | 11.75 | 14.00 | 4.25 |
| 15 | | 6 | 8.50 | 12.50 | 14.50 | 5.25 |
| 16 | | 9 | 8.75 | 12.50 | 15.25 | 5.25 |
| 17 | | 12 | 9.00 | 13.00 | 15.25 | 5.25 |
| 18 | | 15 | 10.00 | 13.75 | 16.00 | 6.00 |
| 19 | 9 | 3 | 7.75 | 12.00 | 14.00 | 4.25 |
| 20 | | 6 | 8.25 | 13.00 | 14.50 | 5.25 |
| 21 | | 9 | 8.50 | 13.00 | 15.25 | 5.25 |
| 22 | | 12 | 8.50 | 13.50 | 15.25 | 5.25 |
| 23 | | 15 | 9.50 | 14.25 | 16.00 | 6.00 |
| 24 | 10 | 3 | 8.25 | 11.50 | 14.00 | 4.25 |
| 25 | | 6 | 8.75 | 12.25 | 14.50 | 5.50 |
| 26 | | 9 | 9.00 | 12.50 | 15.25 | 5.50 |
| 27 | | 12 | 9.25 | 12.75 | 15.25 | 5.50 |
| 28 | | 15 | 10.00 | 13.50 | 16.00 | 6.50 |

Prilog 3. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.4 mm/min sa terena u nagibu od 10%

| 1 | Opit | t | 10% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=2.4 mm/min, L= 2.5 m | i=2.4 mm/min, L= 3.5 m | i=2.4 mm/min, L= 4.5 m | i=2.4 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 11 | 3 | 6.50 | 9.25 | 11.25 | 4.00 |
| 5 | | 6 | 7.25 | 10.00 | 12.25 | 4.50 |
| 6 | | 9 | 7.50 | 10.00 | 12.50 | 4.50 |
| 7 | | 12 | 7.50 | 10.00 | 12.50 | 4.50 |
| 8 | | 15 | 8.25 | 10.25 | 13.25 | 5.25 |
| 9 | 12 | 3 | 7.00 | 9.25 | 12.25 | 3.75 |
| 10 | | 6 | 7.75 | 10.75 | 14.50 | 4.25 |
| 11 | | 9 | 7.75 | 10.75 | 14.50 | 4.25 |
| 12 | | 12 | 7.75 | 10.75 | 14.50 | 4.25 |
| 13 | | 15 | 8.50 | 11.25 | 15.50 | 5.00 |
| 14 | 13 | 3 | 6.75 | 9.50 | 13.25 | 3.75 |
| 15 | | 6 | 7.50 | 10.50 | 14.25 | 4.25 |
| 16 | | 9 | 7.75 | 10.50 | 14.25 | 4.25 |
| 17 | | 12 | 7.75 | 10.50 | 14.50 | 4.25 |
| 18 | | 15 | 8.00 | 11.00 | 15.00 | 4.75 |
| 19 | 14 | 3 | 7.00 | 9.25 | 12.25 | 3.75 |
| 20 | | 6 | 7.75 | 10.75 | 14.50 | 4.25 |
| 21 | | 9 | 7.75 | 10.75 | 14.50 | 4.25 |
| 22 | | 12 | 7.75 | 10.75 | 14.50 | 4.25 |
| 23 | | 15 | 8.50 | 11.25 | 15.50 | 5.00 |
| 24 | 15 | 3 | 6.50 | 9.25 | 11.75 | 3.75 |
| 25 | | 6 | 7.25 | 10.75 | 14.00 | 4.25 |
| 26 | | 9 | 7.25 | 10.75 | 14.00 | 4.25 |
| 27 | | 12 | 7.25 | 10.75 | 14.00 | 4.25 |
| 28 | | 15 | 8.00 | 11.50 | 15.00 | 4.75 |

Prilog 4. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.2 mm/min sa terena u nagibu od 10%

| 1 | Opit | t | 10% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=2.2 mm/min, L= 2.5 m | i=2.2 mm/min, L= 3.5 m | i=2.2 mm/min, L= 4.5 m | i=2.2 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 16 | 3 | 6.25 | 9.50 | 12.50 | 3.75 |
| 5 | | 6 | 7.25 | 10.50 | 13.75 | 4.25 |
| 6 | | 9 | 7.25 | 10.50 | 14.00 | 4.25 |
| 7 | | 12 | 7.25 | 10.50 | 14.00 | 4.25 |
| 8 | | 15 | 8.00 | 10.75 | 14.75 | 4.75 |
| 9 | 17 | 3 | 6.25 | 9.00 | 12.00 | 3.75 |
| 10 | | 6 | 7.00 | 9.75 | 13.25 | 4.50 |
| 11 | | 9 | 7.25 | 9.75 | 13.50 | 4.50 |
| 12 | | 12 | 7.25 | 9.75 | 13.25 | 4.50 |
| 13 | | 15 | 7.75 | 10.25 | 14.00 | 5.00 |
| 14 | 18 | 3 | 5.75 | 9.25 | 11.25 | 3.75 |
| 15 | | 6 | 6.50 | 10.25 | 12.25 | 4.25 |
| 16 | | 9 | 6.75 | 10.25 | 12.50 | 4.25 |
| 17 | | 12 | 6.75 | 10.25 | 12.50 | 4.25 |
| 18 | | 15 | 7.25 | 10.75 | 13.00 | 4.75 |
| 19 | 19 | 3 | 6.00 | 8.75 | 12.00 | 3.50 |
| 20 | | 6 | 6.75 | 9.50 | 13.00 | 4.00 |
| 21 | | 9 | 6.75 | 9.50 | 13.25 | 4.00 |
| 22 | | 12 | 6.75 | 9.50 | 13.25 | 4.00 |
| 23 | | 15 | 7.50 | 9.75 | 14.00 | 4.50 |
| 24 | 20 | 3 | 6.00 | 8.75 | 11.75 | 3.75 |
| 25 | | 6 | 6.75 | 9.50 | 12.75 | 4.25 |
| 26 | | 9 | 6.75 | 9.50 | 13.00 | 4.25 |
| 27 | | 12 | 6.75 | 9.50 | 13.00 | 4.25 |
| 28 | | 15 | 7.50 | 9.75 | 13.50 | 4.75 |

Prilog 5. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.0 mm/min sa terena u nagibu od 10%

| 1 | Opit | t | 10% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=2.0 mm/min, L= 2.5 m | i=2.0 mm/min, L= 3.5 m | i=2.0 mm/min, L= 4.5 m | i=2.0 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 21 | 3 | 5.75 | 7.00 | 9.00 | 3.00 |
| 5 | | 6 | 6.50 | 7.75 | 10.00 | 3.50 |
| 6 | | 9 | 6.50 | 7.75 | 10.00 | 3.50 |
| 7 | | 12 | 6.50 | 7.75 | 10.00 | 3.50 |
| 8 | | 15 | 6.75 | 8.25 | 10.50 | 3.75 |
| 9 | 22 | 3 | 6.75 | 10.00 | 11.00 | 3.75 |
| 10 | | 6 | 7.25 | 9.00 | 12.00 | 4.25 |
| 11 | | 9 | 7.25 | 9.00 | 12.00 | 4.25 |
| 12 | | 12 | 7.25 | 9.00 | 12.00 | 4.25 |
| 13 | | 15 | 7.50 | 9.00 | 12.50 | 4.50 |
| 14 | 23 | 3 | 6.00 | 8.50 | 10.50 | 3.50 |
| 15 | | 6 | 7.00 | 9.50 | 11.50 | 4.00 |
| 16 | | 9 | 7.00 | 9.50 | 11.75 | 4.00 |
| 17 | | 12 | 7.00 | 9.50 | 11.50 | 4.00 |
| 18 | | 15 | 7.25 | 10.00 | 12.25 | 4.25 |
| 19 | 24 | 3 | 5.50 | 8.00 | 10.25 | 3.50 |
| 20 | | 6 | 6.50 | 9.00 | 11.25 | 4.00 |
| 21 | | 9 | 6.50 | 9.00 | 11.25 | 4.00 |
| 22 | | 12 | 6.50 | 9.00 | 11.25 | 4.00 |
| 23 | | 15 | 6.75 | 9.50 | 11.75 | 4.25 |
| 24 | 25 | 3 | 5.75 | 7.50 | 11.00 | 3.25 |
| 25 | | 6 | 6.75 | 8.50 | 12.00 | 3.75 |
| 26 | | 9 | 6.75 | 8.50 | 12.00 | 3.75 |
| 27 | | 12 | 6.75 | 8.50 | 12.00 | 3.75 |
| 28 | | 15 | 7.00 | 9.00 | 12.50 | 4.00 |

Prilog 6. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 3.1 mm/min sa terena u nagibu od 7%

| 1 | Opit | t | 7% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=3.1 mm/min, L= 2.5 m | i=3.1 mm/min, L= 3.5 m | i=3.1 mm/min, L= 4.5 m | i=3.1 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 26 | 3 | 8.00 | 13.00 | 14.00 | 5.25 |
| 5 | | 6 | 8.75 | 13.50 | 15.00 | 5.75 |
| 6 | | 9 | 9.50 | 13.50 | 15.00 | 5.75 |
| 7 | | 12 | 9.50 | 13.50 | 15.00 | 5.75 |
| 8 | | 15 | 10.00 | 14.25 | 16.00 | 6.00 |
| 9 | 27 | 3 | 8.00 | 11.75 | 14.25 | 5.25 |
| 10 | | 6 | 8.75 | 12.00 | 15.00 | 5.50 |
| 11 | | 9 | 9.00 | 12.25 | 15.25 | 5.50 |
| 12 | | 12 | 9.00 | 12.25 | 15.25 | 5.50 |
| 13 | | 15 | 9.25 | 13.25 | 16.00 | 6.00 |
| 14 | 28 | 3 | 8.25 | 11.50 | 14.50 | 5.25 |
| 15 | | 6 | 8.75 | 12.00 | 15.00 | 5.50 |
| 16 | | 9 | 9.00 | 12.00 | 15.00 | 5.50 |
| 17 | | 12 | 9.00 | 12.00 | 15.50 | 5.50 |
| 18 | | 15 | 9.50 | 12.50 | 16.00 | 5.75 |
| 19 | 29 | 3 | 8.50 | 12.00 | 14.50 | 5.00 |
| 20 | | 6 | 8.75 | 12.50 | 15.00 | 5.25 |
| 21 | | 9 | 8.75 | 12.75 | 15.25 | 5.50 |
| 22 | | 12 | 8.75 | 13.00 | 15.25 | 5.75 |
| 23 | | 15 | 9.25 | 14.00 | 16.25 | 6.00 |
| 24 | 30 | 3 | 7.75 | 12.25 | 14.50 | 5.25 |
| 25 | | 6 | 8.00 | 12.75 | 15.25 | 5.75 |
| 26 | | 9 | 8.25 | 12.75 | 15.25 | 5.75 |
| 27 | | 12 | 8.25 | 12.75 | 15.25 | 5.75 |
| 28 | | 15 | 8.75 | 13.25 | 16.25 | 6.25 |

Prilog 7. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.8 mm/min sa terena u nagibu od 7%

| 1 | Opit | t | 7% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=2.8 mm/min, L= 2.5 m | i=2.8 mm/min, L= 3.5 m | i=2.8 mm/min, L= 4.5 m | i=2.8 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 31 | 3 | 8.00 | 12.00 | 13.00 | 4.75 |
| 5 | | 6 | 8.75 | 12.50 | 14.00 | 5.25 |
| 6 | | 9 | 8.75 | 12.50 | 14.00 | 5.25 |
| 7 | | 12 | 8.75 | 12.50 | 14.00 | 5.25 |
| 8 | | 15 | 9.25 | 13.25 | 15.00 | 5.50 |
| 9 | 32 | 3 | 7.00 | 11.75 | 13.75 | 5.25 |
| 10 | | 6 | 7.75 | 12.00 | 14.50 | 5.50 |
| 11 | | 9 | 8.00 | 12.25 | 14.75 | 5.50 |
| 12 | | 12 | 8.00 | 12.25 | 14.75 | 5.50 |
| 13 | | 15 | 8.25 | 13.25 | 15.50 | 6.00 |
| 14 | 33 | 3 | 7.25 | 11.50 | 13.50 | 5.00 |
| 15 | | 6 | 7.75 | 12.00 | 14.00 | 5.25 |
| 16 | | 9 | 8.00 | 12.00 | 14.00 | 5.25 |
| 17 | | 12 | 8.00 | 12.00 | 14.00 | 5.25 |
| 18 | | 15 | 8.50 | 12.50 | 15.00 | 5.75 |
| 19 | 34 | 3 | 7.50 | 11.50 | 13.50 | 5.00 |
| 20 | | 6 | 7.75 | 12.00 | 14.00 | 5.25 |
| 21 | | 9 | 7.75 | 12.25 | 14.25 | 5.25 |
| 22 | | 12 | 7.75 | 12.25 | 14.25 | 5.25 |
| 23 | | 15 | 8.25 | 13.00 | 15.25 | 5.50 |
| 24 | 35 | 3 | 7.75 | 12.25 | 13.00 | 4.50 |
| 25 | | 6 | 8.00 | 12.75 | 13.75 | 4.75 |
| 26 | | 9 | 8.25 | 12.75 | 14.00 | 4.75 |
| 27 | | 12 | 8.25 | 12.75 | 14.00 | 4.75 |
| 28 | | 15 | 8.75 | 13.25 | 15.00 | 5.25 |

Prilog 8. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.4 mm/min sa terena u nagibu od 7%

| 1 | Opit | t | 7% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=2.4 mm/min, L= 2.5 m | i=2.4 mm/min, L= 3.5 m | i=2.4 mm/min, L= 4.5 m | i=2.4 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 36 | 3 | 6.25 | 7.50 | 10.25 | 3.50 |
| 5 | | 6 | 7.00 | 9.25 | 12.00 | 4.00 |
| 6 | | 9 | 7.00 | 9.25 | 12.00 | 4.00 |
| 7 | | 12 | 7.00 | 9.25 | 12.00 | 4.00 |
| 8 | | 15 | 7.75 | 9.75 | 12.75 | 5.25 |
| 9 | 37 | 3 | 6.00 | 9.75 | 13.00 | 6.00 |
| 10 | | 6 | 7.00 | 10.75 | 14.00 | 4.75 |
| 11 | | 9 | 7.25 | 10.75 | 13.75 | 5.00 |
| 12 | | 12 | 7.00 | 10.75 | 13.75 | 5.00 |
| 13 | | 15 | 7.50 | 11.00 | 14.50 | 5.25 |
| 14 | 38 | 3 | 6.75 | 7.75 | 11.75 | 3.75 |
| 15 | | 6 | 7.50 | 10.25 | 14.00 | 4.25 |
| 16 | | 9 | 7.50 | 10.25 | 14.00 | 4.25 |
| 17 | | 12 | 8.00 | 10.25 | 14.00 | 4.25 |
| 18 | | 15 | 8.50 | 10.75 | 15.00 | 5.50 |
| 19 | 39 | 3 | 6.75 | 8.25 | 11.25 | 4.00 |
| 20 | | 6 | 7.50 | 10.75 | 13.25 | 4.50 |
| 21 | | 9 | 7.50 | 10.75 | 13.25 | 4.50 |
| 22 | | 12 | 7.50 | 10.75 | 13.25 | 4.50 |
| 23 | | 15 | 8.50 | 11.25 | 14.25 | 6.00 |
| 24 | 40 | 3 | 6.75 | 8.75 | 11.25 | 4.00 |
| 25 | | 6 | 7.50 | 11.25 | 13.25 | 4.50 |
| 26 | | 9 | 7.50 | 11.25 | 13.25 | 4.50 |
| 27 | | 12 | 7.50 | 11.50 | 13.25 | 4.50 |
| 28 | | 15 | 8.50 | 12.00 | 14.25 | 5.75 |

Prilog 9. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.2 mm/min sa terena u nagibu od 7%

| 1 | Opit | t | 7% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=2.2 mm/min, L= 2.5 m | i=2.2 mm/min, L= 3.5 m | i=2.2 mm/min, L= 4.5 m | i=2.2 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 41 | 3 | 6.50 | 9.25 | 12.00 | 3.75 |
| 5 | | 6 | 7.50 | 10.25 | 13.00 | 4.00 |
| 6 | | 9 | 7.50 | 10.25 | 13.25 | 4.00 |
| 7 | | 12 | 7.50 | 10.25 | 13.25 | 4.00 |
| 8 | | 15 | 8.25 | 10.75 | 14.00 | 4.50 |
| 9 | 42 | 3 | 6.25 | 9.00 | 11.50 | 3.50 |
| 10 | | 6 | 7.00 | 10.00 | 12.50 | 4.00 |
| 11 | | 9 | 7.25 | 10.00 | 12.75 | 4.00 |
| 12 | | 12 | 7.25 | 10.00 | 12.75 | 4.00 |
| 13 | | 15 | 7.75 | 10.25 | 13.50 | 4.50 |
| 14 | 43 | 3 | 6.00 | 9.00 | 11.00 | 3.50 |
| 15 | | 6 | 6.75 | 10.00 | 12.00 | 3.75 |
| 16 | | 9 | 6.75 | 10.00 | 12.25 | 4.00 |
| 17 | | 12 | 6.75 | 10.00 | 12.25 | 4.00 |
| 18 | | 15 | 7.50 | 10.25 | 12.75 | 4.25 |
| 19 | 44 | 3 | 6.25 | 9.00 | 11.50 | 3.75 |
| 20 | | 6 | 7.25 | 9.75 | 12.50 | 4.25 |
| 21 | | 9 | 7.25 | 9.75 | 12.75 | 4.25 |
| 22 | | 12 | 7.25 | 9.75 | 12.75 | 4.25 |
| 23 | | 15 | 8.00 | 10.25 | 13.50 | 4.75 |
| 24 | 45 | 3 | 6.00 | 9.25 | 11.25 | 3.50 |
| 25 | | 6 | 6.75 | 10.25 | 12.25 | 4.00 |
| 26 | | 9 | 6.75 | 10.25 | 12.25 | 4.00 |
| 27 | | 12 | 6.75 | 10.25 | 12.25 | 4.00 |
| 28 | | 15 | 7.50 | 10.75 | 13.00 | 4.50 |

Prilog 10. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.0 mm/min sa terena u nagibu od 7%

| 1 | Opit | t | 7% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=2.0 mm/min, L= 2.5 m | i=2.0 mm/min, L= 3.5 m | i=2.0 mm/min, L= 4.5 m | i=2.0 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 46 | 3 | 5.25 | 7.25 | 9.25 | 3.50 |
| 5 | | 6 | 6.00 | 8.00 | 11.50 | 3.75 |
| 6 | | 9 | 6.00 | 8.00 | 12.00 | 3.75 |
| 7 | | 12 | 6.00 | 8.00 | 12.00 | 4.00 |
| 8 | | 15 | 6.25 | 8.50 | 12.50 | 4.25 |
| 9 | 47 | 3 | 5.75 | 7.00 | 9.00 | 3.75 |
| 10 | | 6 | 7.00 | 10.00 | 12.00 | 4.00 |
| 11 | | 9 | 7.00 | 10.00 | 12.00 | 4.00 |
| 12 | | 12 | 7.00 | 10.00 | 12.00 | 4.00 |
| 13 | | 15 | 7.50 | 10.25 | 12.50 | 4.25 |
| 14 | 48 | 3 | 5.75 | 8.50 | 10.50 | 3.75 |
| 15 | | 6 | 6.50 | 9.50 | 11.50 | 4.25 |
| 16 | | 9 | 6.50 | 9.50 | 11.50 | 4.25 |
| 17 | | 12 | 6.50 | 9.50 | 11.50 | 4.25 |
| 18 | | 15 | 7.00 | 10.00 | 12.25 | 4.50 |
| 19 | 49 | 3 | 5.75 | 8.00 | 10.50 | 3.25 |
| 20 | | 6 | 6.75 | 9.25 | 11.50 | 3.50 |
| 21 | | 9 | 6.75 | 9.25 | 11.50 | 3.75 |
| 22 | | 12 | 6.75 | 9.25 | 11.50 | 3.75 |
| 23 | | 15 | 7.00 | 9.50 | 12.00 | 4.00 |
| 24 | 50 | 3 | 5.50 | 7.75 | 10.75 | 3.25 |
| 25 | | 6 | 6.25 | 8.75 | 11.75 | 3.75 |
| 26 | | 9 | 6.25 | 8.75 | 11.75 | 3.75 |
| 27 | | 12 | 6.25 | 8.75 | 11.75 | 3.75 |
| 28 | | 15 | 6.50 | 9.25 | 12.25 | 4.00 |

Prilog 11. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 3.1 mm/min sa terena u nagibu od 4%

| 1 | Opit | t | 4% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=3.1 mm/min, L= 2.5 m | i=3.1 mm/min, L= 3.5 m | i=3.1 mm/min, L= 4.5 m | i=3.1 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 51 | 3 | 6.75 | 9.75 | 11.25 | 4.50 |
| 5 | | 6 | 7.00 | 10.50 | 13.25 | 5.00 |
| 6 | | 9 | 10.50 | 10.50 | 14.00 | 5.00 |
| 7 | | 12 | 10.50 | 10.50 | 14.00 | 5.00 |
| 8 | | 15 | 11.00 | 11.00 | 15.75 | 5.25 |
| 9 | 52 | 3 | 8.75 | 10.00 | 13.00 | 5.25 |
| 10 | | 6 | 9.50 | 12.00 | 14.25 | 6.25 |
| 11 | | 9 | 9.50 | 12.00 | 14.25 | 6.25 |
| 12 | | 12 | 9.50 | 12.00 | 14.25 | 6.25 |
| 13 | | 15 | 10.00 | 13.00 | 15.00 | 7.00 |
| 14 | 53 | 3 | 8.75 | 10.50 | 13.50 | 5.75 |
| 15 | | 6 | 9.25 | 12.25 | 13.75 | 6.50 |
| 16 | | 9 | 9.25 | 12.50 | 13.75 | 6.50 |
| 17 | | 12 | 9.25 | 13.00 | 13.75 | 6.50 |
| 18 | | 15 | 9.75 | 13.50 | 14.50 | 6.75 |
| 19 | 54 | 3 | 7.50 | 12.00 | 13.75 | 5.25 |
| 20 | | 6 | 8.00 | 12.50 | 14.00 | 5.75 |
| 21 | | 9 | 8.00 | 12.50 | 14.00 | 5.75 |
| 22 | | 12 | 8.00 | 12.50 | 14.00 | 5.75 |
| 23 | | 15 | 9.00 | 13.25 | 14.25 | 6.25 |
| 24 | 55 | 3 | 7.00 | 12.25 | 14.50 | 5.25 |
| 25 | | 6 | 7.25 | 12.75 | 15.00 | 5.75 |
| 26 | | 9 | 7.50 | 12.75 | 15.25 | 5.75 |
| 27 | | 12 | 7.50 | 13.00 | 15.25 | 5.75 |
| 28 | | 15 | 8.00 | 14.00 | 16.00 | 6.25 |

Prilog 12. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.8 mm/min sa terena u nagibu od 4%

| 1 | Opit | t | 4% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=2.8 mm/min, L= 2.5 m | i=2.8 mm/min, L= 3.5 m | i=2.8 mm/min, L= 4.5 m | i=2.8 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 56 | 3 | 8.00 | 11.25 | 12.25 | 4.25 |
| 5 | | 6 | 8.50 | 12.00 | 13.00 | 5.25 |
| 6 | | 9 | 8.75 | 12.25 | 13.75 | 5.25 |
| 7 | | 12 | 9.00 | 12.50 | 13.75 | 5.25 |
| 8 | | 15 | 10.00 | 13.50 | 14.50 | 6.00 |
| 9 | 57 | 3 | 7.75 | 11.25 | 12.75 | 4.25 |
| 10 | | 6 | 8.25 | 12.00 | 13.50 | 5.50 |
| 11 | | 9 | 8.50 | 12.00 | 14.25 | 5.50 |
| 12 | | 12 | 8.75 | 12.25 | 14.25 | 5.50 |
| 13 | | 15 | 9.50 | 13.25 | 15.00 | 6.00 |
| 14 | 58 | 3 | 7.75 | 10.75 | 12.50 | 4.25 |
| 15 | | 6 | 8.25 | 11.50 | 13.25 | 5.25 |
| 16 | | 9 | 8.50 | 11.50 | 14.00 | 5.25 |
| 17 | | 12 | 8.75 | 12.00 | 14.00 | 5.25 |
| 18 | | 15 | 9.50 | 12.75 | 14.75 | 5.75 |
| 19 | 59 | 3 | 7.75 | 11.00 | 13.25 | 4.00 |
| 20 | | 6 | 8.25 | 11.75 | 13.75 | 5.00 |
| 21 | | 9 | 8.75 | 12.00 | 14.50 | 5.00 |
| 22 | | 12 | 8.75 | 12.25 | 14.50 | 5.00 |
| 23 | | 15 | 9.75 | 13.00 | 15.25 | 5.50 |
| 24 | 60 | 3 | 8.00 | 11.00 | 12.75 | 4.50 |
| 25 | | 6 | 8.50 | 11.75 | 13.50 | 5.50 |
| 26 | | 9 | 8.75 | 12.00 | 14.25 | 5.50 |
| 27 | | 12 | 9.00 | 12.25 | 14.25 | 5.50 |
| 28 | | 15 | 9.75 | 13.25 | 15.00 | 6.25 |

Prilog 13. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.4 mm/min sa terena u nagibu od 4%

| 1 | Opit | t | 4% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=2.4 mm/min, L= 2.5 m | i=2.4 mm/min, L= 3.5 m | i=2.4 mm/min, L= 4.5 m | i=2.4 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 61 | 3 | 6.25 | 8.00 | 8.50 | 4.25 |
| 5 | | 6 | 7.50 | 8.25 | 10.50 | 4.50 |
| 6 | | 9 | 7.50 | 8.25 | 10.50 | 4.50 |
| 7 | | 12 | 7.50 | 8.25 | 11.00 | 4.50 |
| 8 | | 15 | 7.75 | 8.75 | 11.75 | 4.75 |
| 9 | 62 | 3 | 7.25 | 10.00 | 13.75 | 4.00 |
| 10 | | 6 | 8.00 | 11.25 | 14.75 | 4.50 |
| 11 | | 9 | 8.00 | 11.25 | 14.75 | 4.75 |
| 12 | | 12 | 8.00 | 11.25 | 14.75 | 4.75 |
| 13 | | 15 | 8.50 | 12.00 | 15.00 | 5.00 |
| 14 | 63 | 3 | 6.00 | 10.00 | 10.00 | 4.25 |
| 15 | | 6 | 7.00 | 10.00 | 12.50 | 4.50 |
| 16 | | 9 | 7.00 | 10.00 | 12.25 | 4.50 |
| 17 | | 12 | 7.00 | 10.00 | 12.75 | 4.50 |
| 18 | | 15 | 7.25 | 10.75 | 13.75 | 4.75 |
| 19 | 64 | 3 | 7.00 | 8.75 | 11.75 | 4.00 |
| 20 | | 6 | 7.75 | 11.25 | 14.00 | 4.50 |
| 21 | | 9 | 7.75 | 11.25 | 14.00 | 4.50 |
| 22 | | 12 | 7.75 | 11.25 | 14.00 | 4.50 |
| 23 | | 15 | 8.50 | 11.75 | 15.00 | 4.75 |
| 24 | 65 | 3 | 6.50 | 8.25 | 11.75 | 3.75 |
| 25 | | 6 | 7.25 | 10.75 | 14.00 | 4.25 |
| 26 | | 9 | 7.25 | 10.75 | 14.00 | 4.25 |
| 27 | | 12 | 7.25 | 10.75 | 14.00 | 4.25 |
| 28 | | 15 | 8.25 | 11.50 | 15.00 | 4.75 |

Prilog 14. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.2 mm/min sa terena u nagibu od 4%

| 1 | Opit | t | 4% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=2.2 mm/min, L= 2.5 m | i=2.2 mm/min, L= 3.5 m | i=2.2 mm/min, L= 4.5 m | i=2.2 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 66 | 3 | 6.25 | 9.25 | 11.75 | 3.75 |
| 5 | | 6 | 7.00 | 10.25 | 13.00 | 4.25 |
| 6 | | 9 | 7.00 | 10.25 | 13.00 | 4.25 |
| 7 | | 12 | 7.00 | 10.25 | 13.00 | 4.25 |
| 8 | | 15 | 7.75 | 10.75 | 13.75 | 4.75 |
| 9 | 67 | 3 | 6.25 | 9.25 | 11.75 | 3.75 |
| 10 | | 6 | 7.00 | 10.25 | 13.00 | 4.25 |
| 11 | | 9 | 7.25 | 10.25 | 13.00 | 4.25 |
| 12 | | 12 | 7.25 | 10.25 | 13.00 | 4.25 |
| 13 | | 15 | 7.75 | 10.75 | 13.75 | 4.75 |
| 14 | 68 | 3 | 6.00 | 9.25 | 12.25 | 3.50 |
| 15 | | 6 | 6.75 | 10.00 | 13.25 | 4.00 |
| 16 | | 9 | 6.75 | 10.00 | 13.50 | 4.00 |
| 17 | | 12 | 6.75 | 10.00 | 13.50 | 4.00 |
| 18 | | 15 | 7.50 | 10.50 | 14.25 | 4.50 |
| 19 | 69 | 3 | 6.25 | 9.25 | 12.00 | 3.50 |
| 20 | | 6 | 7.00 | 10.00 | 13.00 | 4.00 |
| 21 | | 9 | 7.25 | 10.00 | 13.25 | 4.00 |
| 22 | | 12 | 7.25 | 10.00 | 13.25 | 4.00 |
| 23 | | 15 | 7.75 | 10.50 | 14.00 | 4.50 |
| 24 | 70 | 3 | 6.25 | 9.00 | 11.00 | 3.75 |
| 25 | | 6 | 7.25 | 9.75 | 12.00 | 4.25 |
| 26 | | 9 | 7.25 | 9.75 | 12.25 | 4.25 |
| 27 | | 12 | 7.25 | 9.75 | 12.25 | 4.25 |
| 28 | | 15 | 8.00 | 10.25 | 12.75 | 4.75 |

Prilog 15. Merene zapremine vode usled kiše intenziteta 2.0 mm/min sa terena u nagibu od 4%

| 1 | Opit | t | 4% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | litara | | | |
| 3 | | | i=2.0 mm/min, L= 2.5 m | i=2.0 mm/min, L= 3.5 m | i=2.0 mm/min, L= 4.5 m | i=2.0 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 71 | 3 | 6.00 | 8.00 | 10.50 | 3.75 |
| 5 | | 6 | 6.50 | 8.50 | 11.75 | 4.00 |
| 6 | | 9 | 6.50 | 8.00 | 12.00 | 4.00 |
| 7 | | 12 | 6.50 | 8.00 | 12.00 | 4.00 |
| 8 | | 15 | 7.00 | 8.00 | 13.00 | 4.25 |
| 9 | 72 | 3 | 6.25 | 9.50 | 10.25 | 3.75 |
| 10 | | 6 | 7.00 | 10.00 | 11.75 | 3.75 |
| 11 | | 9 | 7.00 | 9.50 | 11.75 | 3.75 |
| 12 | | 12 | 7.00 | 9.50 | 12.75 | 3.75 |
| 13 | | 15 | 7.25 | 9.50 | 13.00 | 4.00 |
| 14 | 73 | 3 | 5.50 | 7.75 | 10.00 | 3.50 |
| 15 | | 6 | 6.25 | 8.75 | 11.00 | 4.00 |
| 16 | | 9 | 6.25 | 8.75 | 11.00 | 4.00 |
| 17 | | 12 | 6.25 | 8.75 | 11.00 | 4.00 |
| 18 | | 15 | 6.75 | 9.25 | 11.50 | 4.25 |
| 19 | 74 | 3 | 5.75 | 7.50 | 10.25 | 3.50 |
| 20 | | 6 | 6.75 | 8.50 | 11.25 | 4.00 |
| 21 | | 9 | 6.75 | 8.50 | 11.50 | 4.00 |
| 22 | | 12 | 6.75 | 8.50 | 11.25 | 4.00 |
| 23 | | 15 | 7.00 | 9.00 | 11.75 | 4.25 |
| 24 | 75 | 3 | 5.75 | 8.50 | 11.00 | 3.50 |
| 25 | | 6 | 6.50 | 9.50 | 12.00 | 4.00 |
| 26 | | 9 | 6.50 | 9.50 | 12.00 | 4.00 |
| 27 | | 12 | 6.50 | 9.50 | 12.00 | 4.00 |
| 28 | | 15 | 7.00 | 9.75 | 12.25 | 4.50 |

Prilog 16. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 3.1 mm/min sa terena u nagibu od 10%

| 1 | Opit | t | 10% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=3.1 mm/min, L= 2.5 m | i=3.1 mm/min, L= 3.5 m | i=3.1 mm/min, L= 4.5 m | i=3.1 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 1 | 3 | 650 | 940 | 973 | 300 |
| 5 | | 6 | 628 | 850 | 910 | 277 |
| 6 | | 9 | 467 | 696 | 885 | 214 |
| 7 | | 12 | 492 | 681 | 878 | 245 |
| 8 | | 15 | 507 | 666 | 872 | 275 |
| 9 | 2 | 3 | 530 | 700 | 940 | 340 |
| 10 | | 6 | 510 | 690 | 960 | 350 |
| 11 | | 9 | 440 | 670 | 910 | 300 |
| 12 | | 12 | 460 | 640 | 940 | 320 |
| 13 | | 15 | 420 | 620 | 920 | 310 |
| 14 | 3 | 3 | 430 | 763 | 916 | 324 |
| 15 | | 6 | 600 | 748 | 952 | 265 |
| 16 | | 9 | 490 | 693 | 833 | 241 |
| 17 | | 12 | 520 | 650 | 828 | 282 |
| 18 | | 15 | 440 | 699 | 837 | 321 |
| 19 | 4 | 3 | 555 | 838 | 971 | 348 |
| 20 | | 6 | 601 | 723 | 1023 | 311 |
| 21 | | 9 | 479 | 722 | 837 | 300 |
| 22 | | 12 | 493 | 592 | 839 | 255 |
| 23 | | 15 | 435 | 657 | 845 | 295 |
| 24 | 5 | 3 | 650 | 940 | 973 | 300 |
| 25 | | 6 | 628 | 850 | 910 | 277 |
| 26 | | 9 | 467 | 696 | 885 | 214 |
| 27 | | 12 | 492 | 681 | 878 | 245 |
| 28 | | 15 | 507 | 666 | 872 | 275 |

Prilog 17. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.8 mm/min sa terena u nagibu od 10%

| 1 | Opit | t | 10% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=2.8 mm/min, L= 2.5 m | i=2.8 mm/min, L= 3.5 m | i=2.8 mm/min, L= 4.5 m | i=2.8 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 6 | 3 | 402 | 501 | 652 | 260 |
| 5 | | 6 | 388 | 478 | 625 | 238 |
| 6 | | 9 | 345 | 446 | 603 | 215 |
| 7 | | 12 | 322 | 426 | 622 | 202 |
| 8 | | 15 | 369 | 406 | 640 | 189 |
| 9 | 7 | 3 | 366 | 502 | 678 | 280 |
| 10 | | 6 | 389 | 499 | 654 | 244 |
| 11 | | 9 | 318 | 485 | 614 | 233 |
| 12 | | 12 | 333 | 441 | 624 | 224 |
| 13 | | 15 | 303 | 463 | 605 | 193 |
| 14 | 8 | 3 | 381 | 560 | 780 | 218 |
| 15 | | 6 | 389 | 570 | 800 | 259 |
| 16 | | 9 | 328 | 477 | 670 | 198 |
| 17 | | 12 | 319 | 460 | 595 | 224 |
| 18 | | 15 | 318 | 460 | 665 | 192 |
| 19 | 9 | 3 | 402 | 500 | 625 | 256 |
| 20 | | 6 | 422 | 465 | 588 | 268 |
| 21 | | 9 | 371 | 438 | 490 | 225 |
| 22 | | 12 | 385 | 440 | 566 | 196 |
| 23 | | 15 | 359 | 436 | 540 | 226 |
| 24 | 10 | 3 | 325 | 525 | 693 | 218 |
| 25 | | 6 | 415 | 558 | 685 | 258 |
| 26 | | 9 | 295 | 477 | 630 | 198 |
| 27 | | 12 | 361 | 485 | 596 | 224 |
| 28 | | 15 | 333 | 555 | 665 | 172 |

Prilog 18. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.4 mm/min sa terena u nagibu od 10%

| 1 | Opit | t | 10% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=2.4 mm/min, L= 2.5 m | i=2.4 mm/min, L= 3.5 m | i=2.4 mm/min, L= 4.5 m | i=2.4 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 11 | 3 | 180 | 400 | 400 | 170 |
| 5 | | 6 | 170 | 380 | 390 | 170 |
| 6 | | 9 | 160 | 310 | 350 | 110 |
| 7 | | 12 | 160 | 330 | 340 | 120 |
| 8 | | 15 | 170 | 350 | 320 | 130 |
| 9 | 12 | 3 | 224 | 325 | 415 | 176 |
| 10 | | 6 | 242 | 355 | 412 | 144 |
| 11 | | 9 | 203 | 295 | 377 | 160 |
| 12 | | 12 | 210 | 309 | 359 | 125 |
| 13 | | 15 | 196 | 286 | 395 | 136 |
| 14 | 13 | 3 | 315 | 420 | 600 | 250 |
| 15 | | 6 | 300 | 325 | 520 | 156 |
| 16 | | 9 | 214 | 300 | 385 | 89 |
| 17 | | 12 | 202 | 319 | 350 | 111 |
| 18 | | 15 | 185 | 342 | 421 | 132 |
| 19 | 14 | 3 | 224 | 325 | 415 | 176 |
| 20 | | 6 | 242 | 355 | 412 | 144 |
| 21 | | 9 | 203 | 295 | 377 | 160 |
| 22 | | 12 | 210 | 309 | 359 | 125 |
| 23 | | 15 | 196 | 286 | 395 | 136 |
| 24 | 15 | 3 | 298 | 373 | 415 | 180 |
| 25 | | 6 | 271 | 360 | 360 | 161 |
| 26 | | 9 | 257 | 321 | 358 | 155 |
| 27 | | 12 | 222 | 295 | 295 | 132 |
| 28 | | 15 | 188 | 270 | 421 | 105 |

Prilog 19. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.2 mm/min sa terena u nagibu od 10%

| 1 | Opit | t | 10% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=2.2 mm/min, L= 2.5 m | i=2.2 mm/min, L= 3.5 m | i=2.2 mm/min, L= 4.5 m | i=2.2 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 16 | 3 | 129 | 320 | 282 | 116 |
| 5 | | 6 | 117 | 310 | 291 | 120 |
| 6 | | 9 | 136 | 290 | 281 | 96 |
| 7 | | 12 | 116 | 300 | 311 | 96 |
| 8 | | 15 | 108 | 280 | 252 | 97 |
| 9 | 17 | 3 | 206 | 301 | 412 | 148 |
| 10 | | 6 | 219 | 270 | 448 | 163 |
| 11 | | 9 | 173 | 290 | 372 | 121 |
| 12 | | 12 | 166 | 277 | 389 | 131 |
| 13 | | 15 | 158 | 290 | 334 | 111 |
| 14 | 18 | 3 | 305 | 288 | 359 | 188 |
| 15 | | 6 | 272 | 310 | 312 | 155 |
| 16 | | 9 | 248 | 280 | 301 | 130 |
| 17 | | 12 | 246 | 250 | 341 | 137 |
| 18 | | 15 | 222 | 270 | 272 | 123 |
| 19 | 19 | 3 | 187 | 280 | 321 | 113 |
| 20 | | 6 | 196 | 300 | 331 | 110 |
| 21 | | 9 | 170 | 260 | 371 | 103 |
| 22 | | 12 | 176 | 260 | 271 | 95 |
| 23 | | 15 | 179 | 250 | 319 | 86 |
| 24 | 20 | 3 | 214 | 270 | 381 | 145 |
| 25 | | 6 | 217 | 300 | 420 | 151 |
| 26 | | 9 | 185 | 280 | 360 | 141 |
| 27 | | 12 | 179 | 250 | 350 | 131 |
| 28 | | 15 | 161 | 280 | 312 | 120 |

Prilog 20. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.0 mm/min sa terena u nagibu od 10%

| 1 | Opit | t | 10% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=2.0 mm/min, L= 2.5 m | i=2.0 mm/min, L= 3.5 m | i=2.0 mm/min, L= 4.5 m | i=2.0 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 21 | 3 | 449 | 354 | 463 | 317 |
| 5 | | 6 | 304 | 292 | 349 | 187 |
| 6 | | 9 | 182 | 327 | 348 | 64 |
| 7 | | 12 | 189 | 309 | 364 | 41 |
| 8 | | 15 | 175 | 335 | 361 | 23 |
| 9 | 22 | 3 | 300 | 405 | 563 | 387 |
| 10 | | 6 | 288 | 322 | 447 | 259 |
| 11 | | 9 | 234 | 360 | 451 | 132 |
| 12 | | 12 | 228 | 329 | 456 | 111 |
| 13 | | 15 | 270 | 355 | 459 | 93 |
| 14 | 23 | 3 | 160 | 340 | 450 | 220 |
| 15 | | 6 | 140 | 270 | 320 | 180 |
| 16 | | 9 | 100 | 260 | 290 | 120 |
| 17 | | 12 | 90 | 230 | 300 | 120 |
| 18 | | 15 | 90 | 200 | 290 | 110 |
| 19 | 24 | 3 | 159 | 254 | 259 | 107 |
| 20 | | 6 | 178 | 254 | 262 | 121 |
| 21 | | 9 | 144 | 231 | 236 | 97 |
| 22 | | 12 | 155 | 221 | 228 | 106 |
| 23 | | 15 | 134 | 240 | 243 | 88 |
| 24 | 25 | 3 | 151 | 264 | 296 | 89 |
| 25 | | 6 | 168 | 288 | 305 | 101 |
| 26 | | 9 | 130 | 228 | 255 | 76 |
| 27 | | 12 | 138 | 236 | 249 | 83 |
| 28 | | 15 | 122 | 216 | 260 | 70 |

Prilog 21. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 3.1 mm/min sa terena u nagibu od 7%

| 1 | Opit | t | 7% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=3.1 mm/min, L= 2.5 m | i=3.1 mm/min, L= 3.5 m | i=3.1 mm/min, L= 4.5 m | i=3.1 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 26 | 3 | 140 | 107 | 340 | 44 |
| 5 | | 6 | 131 | 121 | 331 | 50 |
| 6 | | 9 | 103 | 150 | 302 | 60 |
| 7 | | 12 | 100 | 158 | 304 | 47 |
| 8 | | 15 | 101 | 170 | 332 | 43 |
| 9 | 27 | 3 | 205 | 283 | 190 | 65 |
| 10 | | 6 | 155 | 418 | 232 | 55 |
| 11 | | 9 | 135 | 204 | 285 | 88 |
| 12 | | 12 | 134 | 205 | 228 | 98 |
| 13 | | 15 | 138 | 206 | 251 | 107 |
| 14 | 28 | 3 | 200 | 220 | 300 | 130 |
| 15 | | 6 | 170 | 180 | 290 | 160 |
| 16 | | 9 | 150 | 170 | 230 | 100 |
| 17 | | 12 | 160 | 200 | 270 | 90 |
| 18 | | 15 | 170 | 150 | 200 | 90 |
| 19 | 29 | 3 | 157 | 258 | 275 | 103 |
| 20 | | 6 | 183 | 249 | 279 | 79 |
| 21 | | 9 | 135 | 223 | 237 | 89 |
| 22 | | 12 | 150 | 204 | 228 | 65 |
| 23 | | 15 | 165 | 205 | 246 | 71 |
| 24 | 30 | 3 | 141 | 222 | 258 | 107 |
| 25 | | 6 | 163 | 254 | 304 | 106 |
| 26 | | 9 | 123 | 193 | 225 | 93 |
| 27 | | 12 | 136 | 212 | 254 | 88 |
| 28 | | 15 | 176 | 227 | 279 | 65 |

Prilog 22. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.8 mm/min sa terena u nagibu od 7%

| 1 | Opit | t | 7% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=2.8 mm/min, L= 2.5 m | i=2.8 mm/min, L= 3.5 m | i=2.8 mm/min, L= 4.5 m | i=2.8 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 31 | 3 | 180 | 181 | 210 | 90 |
| 5 | | 6 | 140 | 155 | 198 | 92 |
| 6 | | 9 | 120 | 152 | 189 | 69 |
| 7 | | 12 | 100 | 148 | 155 | 60 |
| 8 | | 15 | 130 | 144 | 175 | 50 |
| 9 | 32 | 3 | 110 | 231 | 309 | 107 |
| 10 | | 6 | 180 | 222 | 300 | 108 |
| 11 | | 9 | 100 | 201 | 280 | 94 |
| 12 | | 12 | 150 | 185 | 241 | 90 |
| 13 | | 15 | 140 | 198 | 150 | 67 |
| 14 | 33 | 3 | 160 | 201 | 325 | 110 |
| 15 | | 6 | 180 | 182 | 303 | 55 |
| 16 | | 9 | 120 | 189 | 255 | 50 |
| 17 | | 12 | 130 | 186 | 263 | 40 |
| 18 | | 15 | 101 | 195 | 272 | 66 |
| 19 | 34 | 3 | 150 | 205 | 266 | 77 |
| 20 | | 6 | 100 | 255 | 226 | 99 |
| 21 | | 9 | 120 | 171 | 222 | 65 |
| 22 | | 12 | 80 | 204 | 181 | 79 |
| 23 | | 15 | 110 | 138 | 266 | 95 |
| 24 | 35 | 3 | 200 | 205 | 342 | 90 |
| 25 | | 6 | 170 | 238 | 318 | 70 |
| 26 | | 9 | 120 | 185 | 301 | 70 |
| 27 | | 12 | 100 | 170 | 275 | 50 |
| 28 | | 15 | 150 | 178 | 245 | 53 |

Prilog 23. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.4 mm/min sa terena u nagibu od 7%

| 1 | Opit | t | 7% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=2.4 mm/min, L= 2.5 m | i=2.4 mm/min, L= 3.5 m | i=2.4 mm/min, L= 4.5 m | i=2.4 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 36 | 3 | 150 | 216 | 169 | 51 |
| 5 | | 6 | 185 | 159 | 268 | 50 |
| 6 | | 9 | 80 | 140 | 141 | 100 |
| 7 | | 12 | 81 | 130 | 119 | 33 |
| 8 | | 15 | 81 | 156 | 135 | 47 |
| 9 | 37 | 3 | 104 | 125 | 149 | 96 |
| 10 | | 6 | 107 | 140 | 163 | 89 |
| 11 | | 9 | 78 | 110 | 153 | 61 |
| 12 | | 12 | 85 | 120 | 157 | 48 |
| 13 | | 15 | 72 | 122 | 152 | 35 |
| 14 | 38 | 3 | 110 | 190 | 200 | 120 |
| 15 | | 6 | 90 | 160 | 170 | 80 |
| 16 | | 9 | 70 | 120 | 170 | 70 |
| 17 | | 12 | 70 | 140 | 150 | 50 |
| 18 | | 15 | 80 | 150 | 120 | 50 |
| 19 | 39 | 3 | 97 | 160 | 179 | 66 |
| 20 | | 6 | 126 | 121 | 235 | 54 |
| 21 | | 9 | 85 | 139 | 156 | 57 |
| 22 | | 12 | 105 | 101 | 195 | 45 |
| 23 | | 15 | 64 | 161 | 158 | 70 |
| 24 | 40 | 3 | 109 | 139 | 208 | 61 |
| 25 | | 6 | 113 | 161 | 236 | 76 |
| 26 | | 9 | 94 | 121 | 179 | 52 |
| 27 | | 12 | 92 | 132 | 193 | 62 |
| 28 | | 15 | 87 | 139 | 175 | 44 |

Prilog 24. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.2 mm/min sa terena u nagibu od 7%

| 1 | Opit | t | 7% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=2.2 mm/min, L= 2.5 m | i=2.2 mm/min, L= 3.5 m | i=2.2 mm/min, L= 4.5 m | i=2.2 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 41 | 3 | 96 | 138 | 201 | 89 |
| 5 | | 6 | 75 | 144 | 189 | 69 |
| 6 | | 9 | 69 | 110 | 140 | 50 |
| 7 | | 12 | 70 | 127 | 144 | 55 |
| 8 | | 15 | 66 | 144 | 137 | 60 |
| 9 | 42 | 3 | 100 | 200 | 169 | 89 |
| 10 | | 6 | 131 | 181 | 152 | 72 |
| 11 | | 9 | 55 | 137 | 137 | 46 |
| 12 | | 12 | 66 | 140 | 102 | 64 |
| 13 | | 15 | 44 | 133 | 128 | 32 |
| 14 | 43 | 3 | 158 | 233 | 222 | 94 |
| 15 | | 6 | 93 | 179 | 149 | 100 |
| 16 | | 9 | 78 | 144 | 177 | 74 |
| 17 | | 12 | 76 | 127 | 166 | 54 |
| 18 | | 15 | 55 | 111 | 134 | 39 |
| 19 | 44 | 3 | 107 | 137 | 180 | 67 |
| 20 | | 6 | 90 | 132 | 239 | 75 |
| 21 | | 9 | 93 | 119 | 157 | 58 |
| 22 | | 12 | 75 | 110 | 200 | 62 |
| 23 | | 15 | 101 | 128 | 178 | 42 |
| 24 | 45 | 3 | 112 | 129 | 153 | 40 |
| 25 | | 6 | 141 | 163 | 130 | 53 |
| 26 | | 9 | 97 | 111 | 132 | 35 |
| 27 | | 12 | 116 | 134 | 107 | 43 |
| 28 | | 15 | 78 | 90 | 158 | 51 |

Prilog 25. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.0 mm/min sa terena u nagibu od 7%

| 1 | Opit | t | 7% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=2.0 mm/min, L= 2.5 m | i=2.0 mm/min, L= 3.5 m | i=2.0 mm/min, L= 4.5 m | i=2.0 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 46 | 3 | 81 | 138 | 93 | 9 |
| 5 | | 6 | 73 | 96 | 192 | 63 |
| 6 | | 9 | 46 | 70 | 74 | 43 |
| 7 | | 12 | 52 | 53 | 52 | 22 |
| 8 | | 15 | 54 | 90 | 71 | 40 |
| 9 | 47 | 3 | 134 | 249 | 180 | 97 |
| 10 | | 6 | 111 | 213 | 110 | 64 |
| 11 | | 9 | 110 | 127 | 240 | 38 |
| 12 | | 12 | 97 | 114 | 180 | 36 |
| 13 | | 15 | 102 | 107 | 195 | 34 |
| 14 | 48 | 3 | 100 | 190 | 190 | 80 |
| 15 | | 6 | 70 | 160 | 170 | 70 |
| 16 | | 9 | 50 | 100 | 120 | 60 |
| 17 | | 12 | 70 | 120 | 150 | 60 |
| 18 | | 15 | 60 | 140 | 160 | 50 |
| 19 | 49 | 3 | 129 | 178 | 154 | 86 |
| 20 | | 6 | 95 | 158 | 242 | 71 |
| 21 | | 9 | 112 | 155 | 133 | 75 |
| 22 | | 12 | 79 | 132 | 201 | 59 |
| 23 | | 15 | 95 | 109 | 177 | 32 |
| 24 | 50 | 3 | 96 | 143 | 180 | 43 |
| 25 | | 6 | 121 | 180 | 150 | 56 |
| 26 | | 9 | 83 | 123 | 145 | 37 |
| 27 | | 12 | 99 | 148 | 130 | 46 |
| 28 | | 15 | 67 | 100 | 174 | 55 |

Prilog 26. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 3.1 mm/min sa terena u nagibu od 4%

| 1 | Opit | t | 4% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=3.1 mm/min, L= 2.5 m | i=3.1 mm/min, L= 3.5 m | i=3.1 mm/min, L= 4.5 m | i=3.1 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 51 | 3 | 100 | 90 | 150 | 30 |
| 5 | | 6 | 90 | 130 | 110 | 20 |
| 6 | | 9 | 90 | 150 | 90 | 20 |
| 7 | | 12 | 80 | 120 | 90 | 30 |
| 8 | | 15 | 80 | 60 | 110 | 40 |
| 9 | 52 | 3 | 120 | 150 | 210 | 100 |
| 10 | | 6 | 140 | 120 | 180 | 70 |
| 11 | | 9 | 110 | 140 | 150 | 60 |
| 12 | | 12 | 130 | 130 | 130 | 50 |
| 13 | | 15 | 150 | 50 | 140 | 60 |
| 14 | 53 | 3 | 120 | 120 | 160 | 80 |
| 15 | | 6 | 100 | 100 | 140 | 60 |
| 16 | | 9 | 90 | 110 | 130 | 60 |
| 17 | | 12 | 70 | 80 | 120 | 60 |
| 18 | | 15 | 50 | 70 | 100 | 70 |
| 19 | 54 | 3 | 117 | 150 | 225 | 55 |
| 20 | | 6 | 106 | 160 | 208 | 93 |
| 21 | | 9 | 102 | 156 | 195 | 48 |
| 22 | | 12 | 88 | 130 | 174 | 77 |
| 23 | | 15 | 86 | 132 | 150 | 45 |
| 24 | 55 | 3 | 106 | 130 | 227 | 62 |
| 25 | | 6 | 133 | 150 | 191 | 80 |
| 26 | | 9 | 88 | 120 | 189 | 52 |
| 27 | | 12 | 106 | 120 | 153 | 64 |
| 28 | | 15 | 72 | 120 | 227 | 77 |

Prilog 27. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.8 mm/min sa terena u nagibu od 4%

| 1 | Opit | t | 4% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=2.8 mm/min, L= 2.5 m | i=2.8 mm/min, L= 3.5 m | i=2.8 mm/min, L= 4.5 m | i=2.8 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 56 | 3 | 125 | 177 | 177 | 112 |
| 5 | | 6 | 100 | 120 | 160 | 100 |
| 6 | | 9 | 88 | 129 | 156 | 64 |
| 7 | | 12 | 61 | 114 | 167 | 71 |
| 8 | | 15 | 72 | 144 | 179 | 55 |
| 9 | 57 | 3 | 99 | 141 | 166 | 40 |
| 10 | | 6 | 90 | 133 | 144 | 56 |
| 11 | | 9 | 86 | 123 | 144 | 35 |
| 12 | | 12 | 75 | 111 | 120 | 47 |
| 13 | | 15 | 98 | 99 | 169 | 59 |
| 14 | 58 | 3 | 94 | 120 | 184 | 43 |
| 15 | | 6 | 117 | 150 | 154 | 55 |
| 16 | | 9 | 78 | 100 | 153 | 36 |
| 17 | | 12 | 94 | 120 | 123 | 44 |
| 18 | | 15 | 63 | 80 | 183 | 53 |
| 19 | 59 | 3 | 85 | 147 | 152 | 100 |
| 20 | | 6 | 99 | 118 | 139 | 85 |
| 21 | | 9 | 62 | 127 | 137 | 74 |
| 22 | | 12 | 55 | 102 | 120 | 70 |
| 23 | | 15 | 48 | 99 | 115 | 55 |
| 24 | 60 | 3 | 120 | 155 | 258 | 65 |
| 25 | | 6 | 131 | 164 | 180 | 77 |
| 26 | | 9 | 94 | 116 | 170 | 48 |
| 27 | | 12 | 83 | 130 | 155 | 30 |
| 28 | | 15 | 72 | 102 | 158 | 22 |

Prilog 28. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.4 mm/min sa terena u nagibu od 4%

| 1 | Opit | t | 4% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=2.4 mm/min, L= 2.5 m | i=2.4 mm/min, L= 3.5 m | i=2.4 mm/min, L= 4.5 m | i=2.4 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 61 | 3 | 130 | 120 | 150 | 34 |
| 5 | | 6 | 106 | 77 | 120 | 28 |
| 6 | | 9 | 53 | 74 | 100 | 40 |
| 7 | | 12 | 51 | 51 | 100 | 33 |
| 8 | | 15 | 53 | 71 | 86 | 31 |
| 9 | 62 | 3 | 73 | 108 | 122 | 50 |
| 10 | | 6 | 65 | 100 | 114 | 41 |
| 11 | | 9 | 54 | 80 | 101 | 31 |
| 12 | | 12 | 55 | 70 | 98 | 25 |
| 13 | | 15 | 55 | 60 | 95 | 37 |
| 14 | 63 | 3 | 90 | 100 | 130 | 40 |
| 15 | | 6 | 70 | 80 | 120 | 40 |
| 16 | | 9 | 60 | 80 | 100 | 30 |
| 17 | | 12 | 60 | 80 | 100 | 30 |
| 18 | | 15 | 50 | 80 | 90 | 30 |
| 19 | 64 | 3 | 110 | 101 | 167 | 47 |
| 20 | | 6 | 94 | 120 | 119 | 27 |
| 21 | | 9 | 95 | 88 | 145 | 41 |
| 22 | | 12 | 78 | 99 | 99 | 23 |
| 23 | | 15 | 42 | 76 | 136 | 60 |
| 24 | 65 | 3 | 95 | 117 | 141 | 37 |
| 25 | | 6 | 66 | 146 | 119 | 48 |
| 26 | | 9 | 79 | 97 | 118 | 31 |
| 27 | | 12 | 53 | 117 | 95 | 38 |
| 28 | | 15 | 65 | 79 | 141 | 46 |

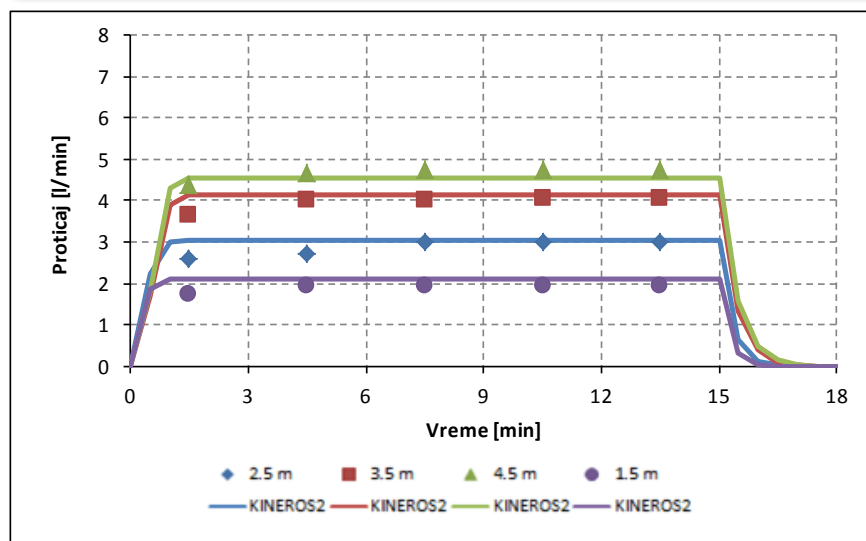
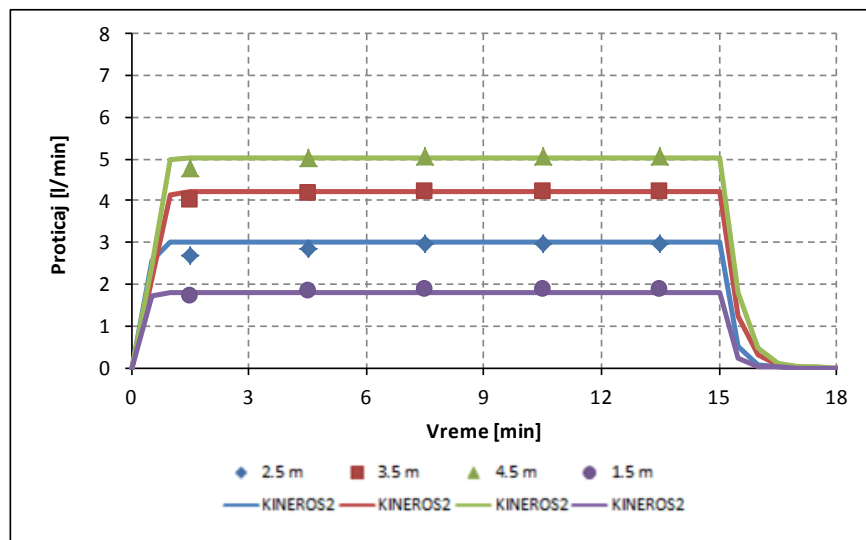
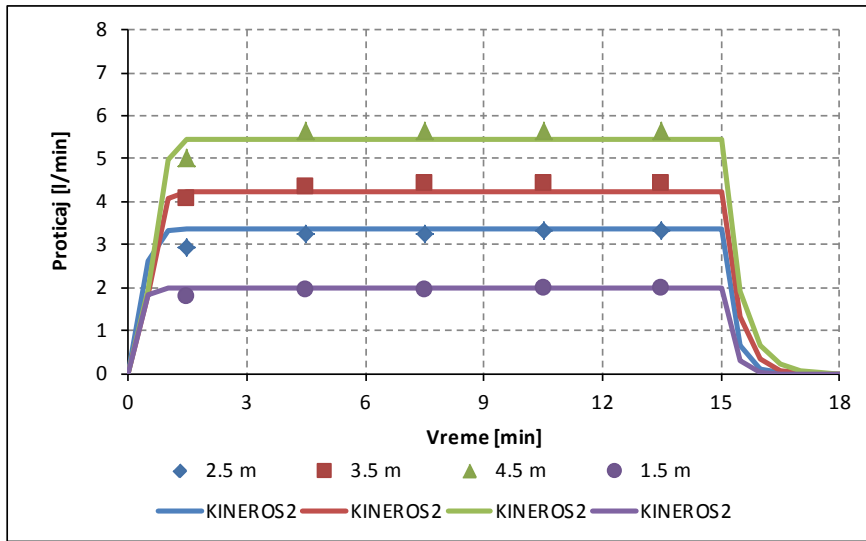
Prilog 29. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.2 mm/min sa terena u nagibu od 4%

| 1 | Opit | t | 4% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=2.2 mm/min, L= 2.5 m | i=2.2 mm/min, L= 3.5 m | i=2.2 mm/min, L= 4.5 m | i=2.2 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 66 | 3 | 131 | 85 | 145 | 57 |
| 5 | | 6 | 92 | 72 | 112 | 28 |
| 6 | | 9 | 80 | 66 | 103 | 25 |
| 7 | | 12 | 59 | 55 | 100 | 24 |
| 8 | | 15 | 44 | 58 | 96 | 36 |
| 9 | 67 | 3 | 95 | 122 | 156 | 88 |
| 10 | | 6 | 77 | 100 | 110 | 98 |
| 11 | | 9 | 44 | 84 | 96 | 21 |
| 12 | | 12 | 57 | 60 | 104 | 33 |
| 13 | | 15 | 31 | 72 | 110 | 41 |
| 14 | 68 | 3 | 114 | 123 | 155 | 60 |
| 15 | | 6 | 102 | 115 | 126 | 71 |
| 16 | | 9 | 85 | 103 | 132 | 46 |
| 17 | | 12 | 67 | 89 | 128 | 42 |
| 18 | | 15 | 58 | 76 | 122 | 38 |
| 19 | 69 | 3 | 69 | 108 | 150 | 52 |
| 20 | | 6 | 82 | 108 | 120 | 40 |
| 21 | | 9 | 60 | 94 | 120 | 45 |
| 22 | | 12 | 68 | 89 | 100 | 33 |
| 23 | | 15 | 52 | 86 | 96 | 22 |
| 24 | 70 | 3 | 67 | 109 | 116 | 31 |
| 25 | | 6 | 84 | 136 | 98 | 40 |
| 26 | | 9 | 56 | 91 | 97 | 26 |
| 27 | | 12 | 67 | 109 | 78 | 32 |
| 28 | | 15 | 45 | 74 | 116 | 39 |

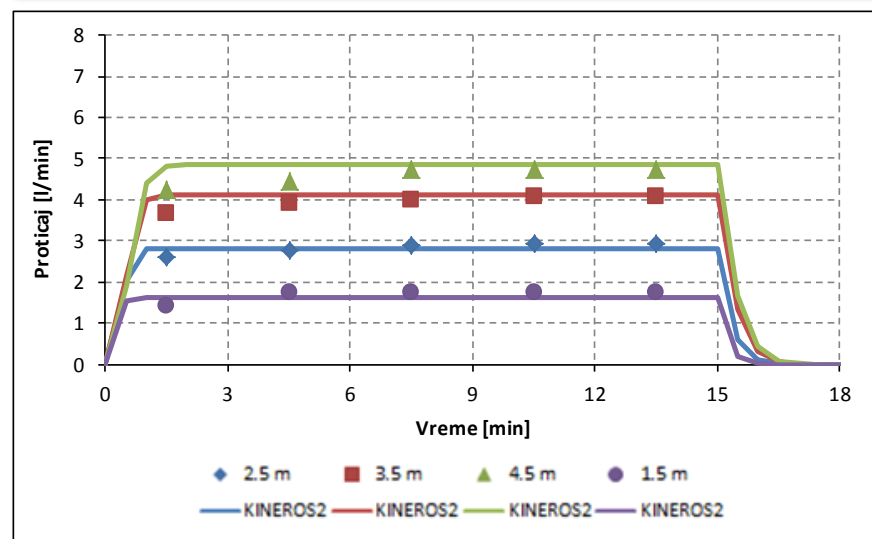
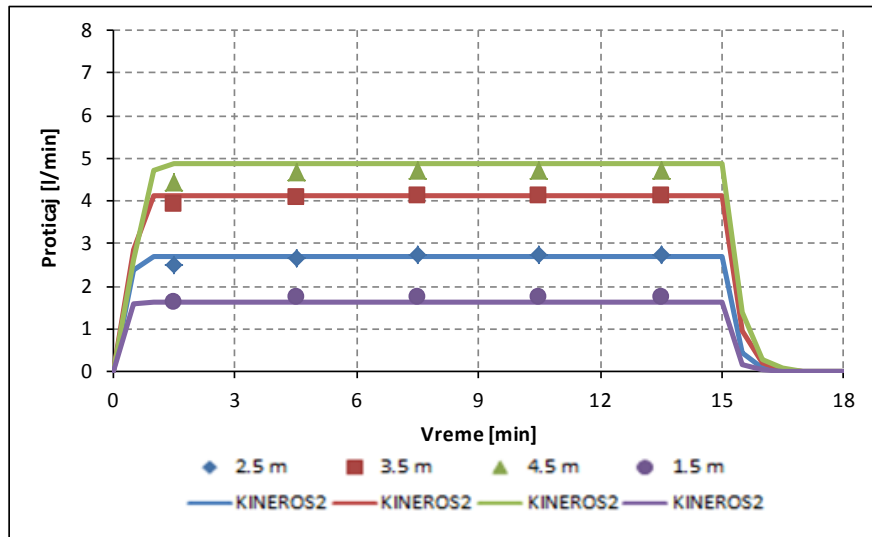
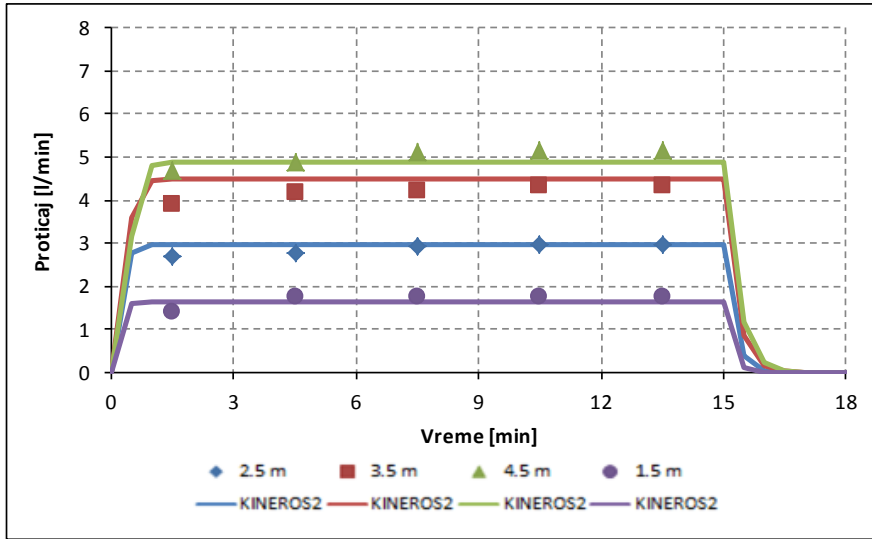
Prilog 30. Merene težine nanosa usled kiše intenziteta 2.0 mm/min sa terena u nagibu od 4%

| 1 | Opit | t | 4% | | | |
|----|--------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2 | r. br. | min | gram | | | |
| 3 | | | i=2.0 mm/min, L= 2.5 m | i=2.0 mm/min, L= 3.5 m | i=2.0 mm/min, L= 4.5 m | i=2.0 mm/min, L= 1.5 m |
| 4 | 71 | 3 | 100 | 147 | 103 | 36 |
| 5 | | 6 | 40 | 75 | 98 | 34 |
| 6 | | 9 | 32 | 79 | 76 | 55 |
| 7 | | 12 | 42 | 50 | 67 | 37 |
| 8 | | 15 | 52 | 74 | 67 | 30 |
| 9 | 72 | 3 | 50 | 100 | 110 | 30 |
| 10 | | 6 | 40 | 100 | 80 | 30 |
| 11 | | 9 | 40 | 90 | 70 | 20 |
| 12 | | 12 | 50 | 80 | 80 | 20 |
| 13 | | 15 | 40 | 90 | 70 | 20 |
| 14 | 73 | 3 | 61 | 102 | 96 | 53 |
| 15 | | 6 | 73 | 69 | 121 | 39 |
| 16 | | 9 | 53 | 88 | 83 | 46 |
| 17 | | 12 | 61 | 57 | 101 | 32 |
| 18 | | 15 | 45 | 56 | 92 | 18 |
| 19 | 74 | 3 | 71 | 88 | 124 | 31 |
| 20 | | 6 | 49 | 110 | 104 | 39 |
| 21 | | 9 | 59 | 74 | 103 | 26 |
| 22 | | 12 | 39 | 88 | 83 | 32 |
| 23 | | 15 | 49 | 60 | 123 | 38 |
| 24 | 75 | 3 | 83 | 101 | 65 | 46 |
| 25 | | 6 | 75 | 93 | 76 | 56 |
| 26 | | 9 | 60 | 75 | 70 | 39 |
| 27 | | 12 | 57 | 69 | 88 | 25 |
| 28 | | 15 | 53 | 63 | 53 | 32 |

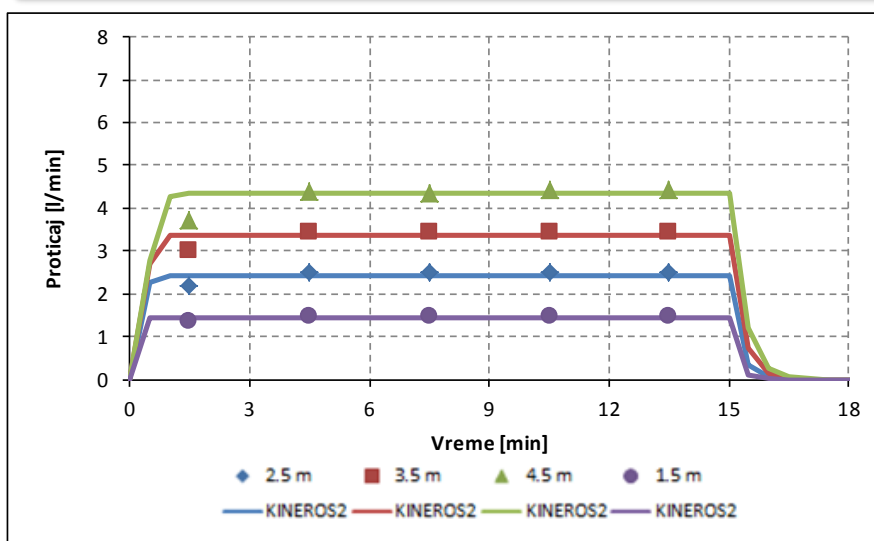
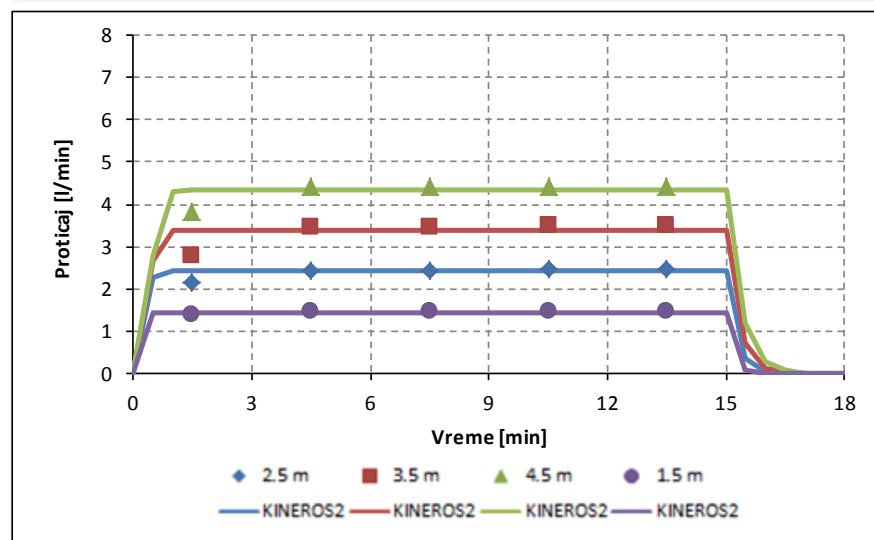
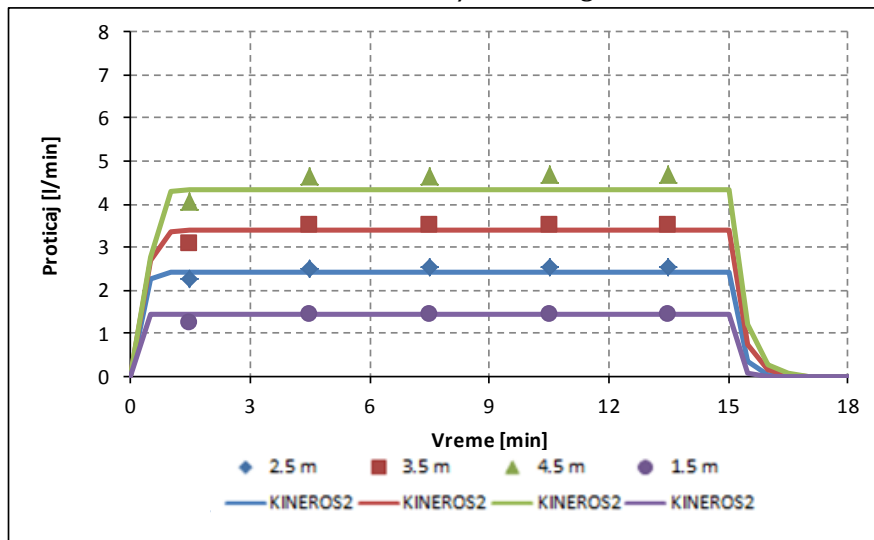
Prilog 31. Oticaj sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 3.1 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%



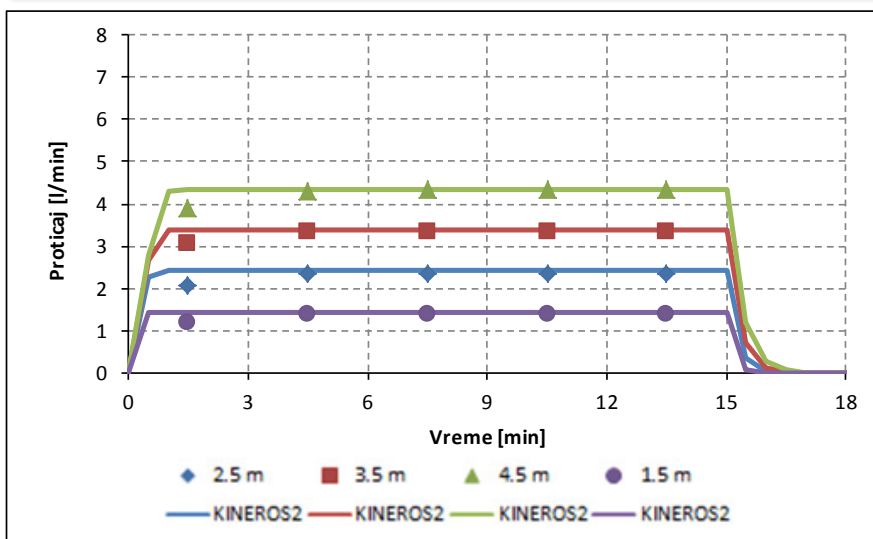
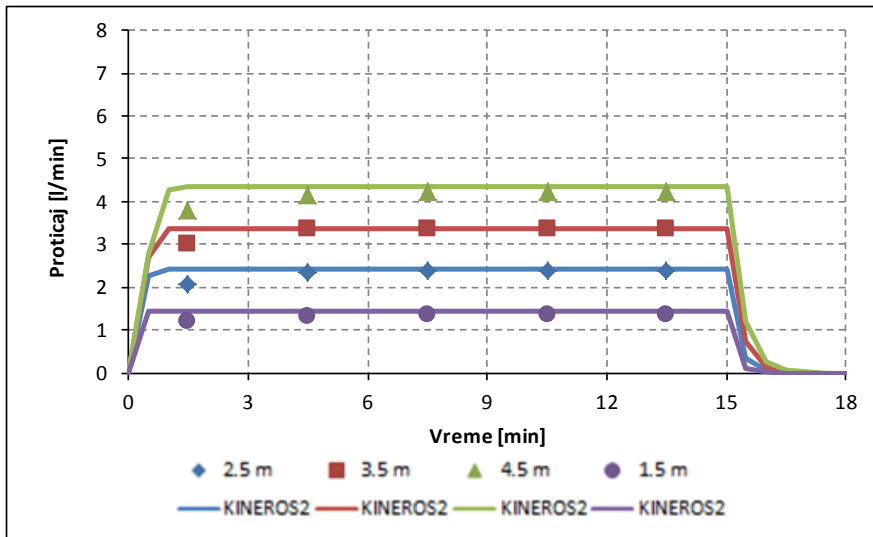
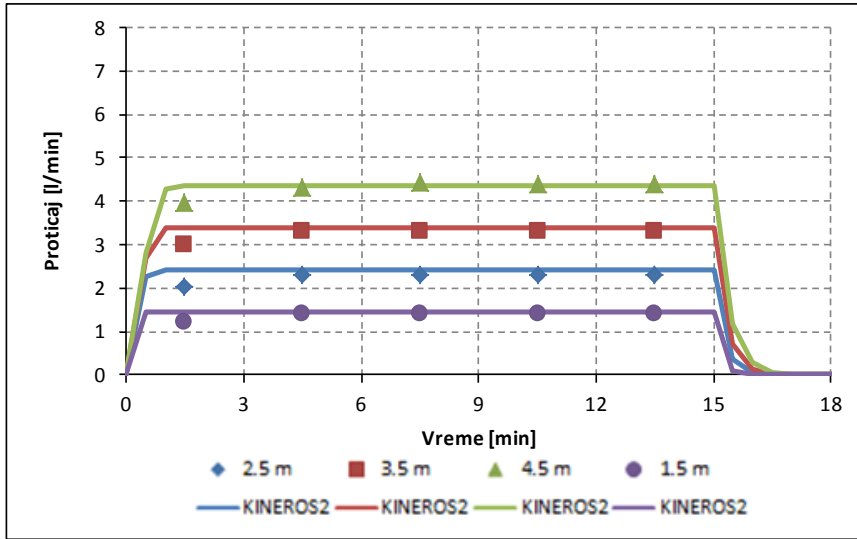
Prilog 32. Oticaaj sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 2.8 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%



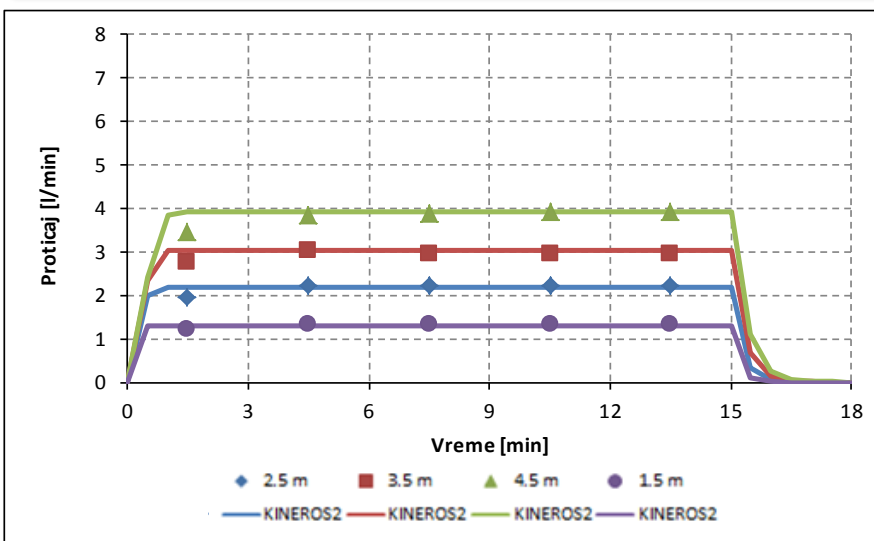
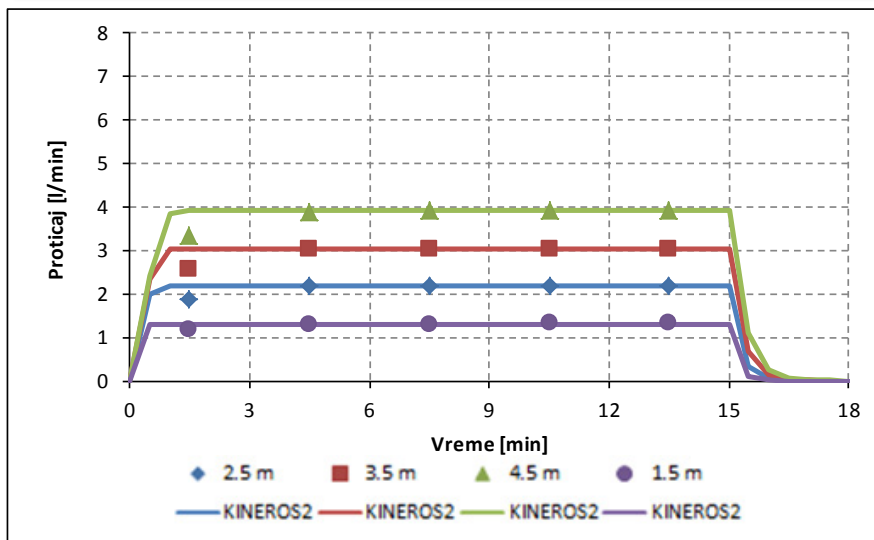
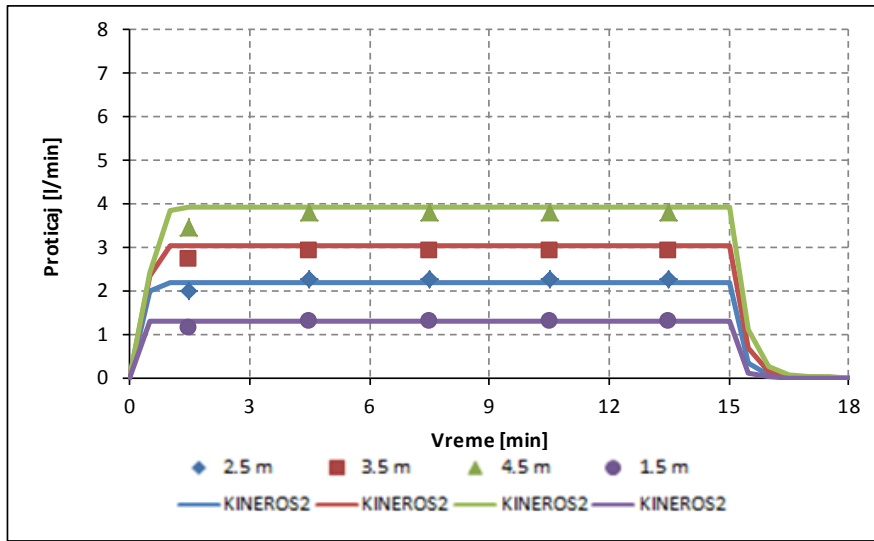
Prilog 33. Oticaaj sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 2.4 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%



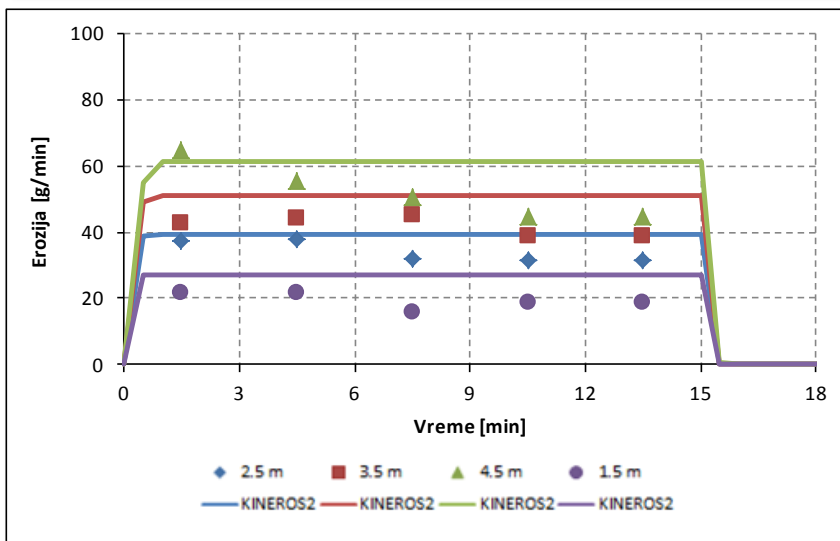
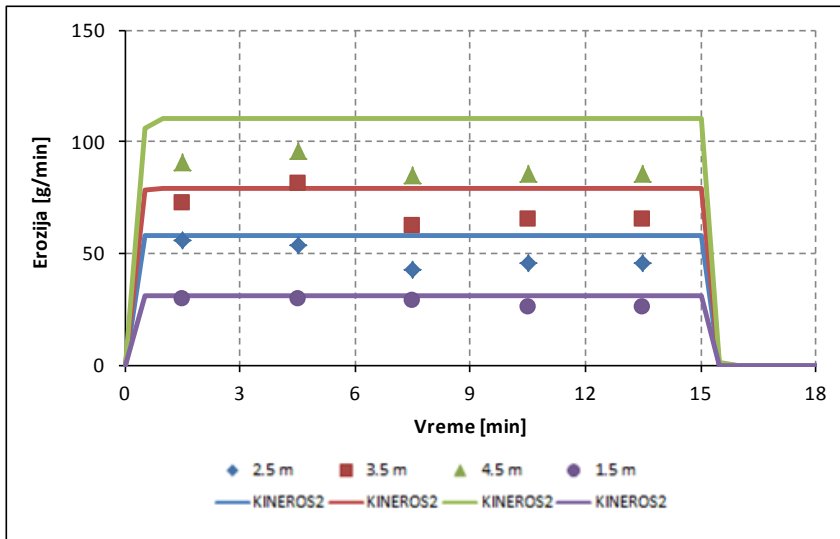
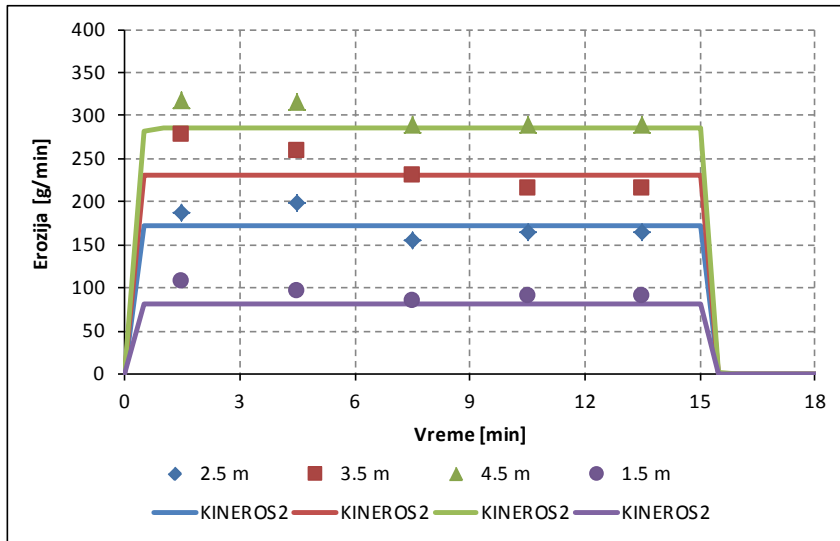
Prilog 34. Oticaaj sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 2.2 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%



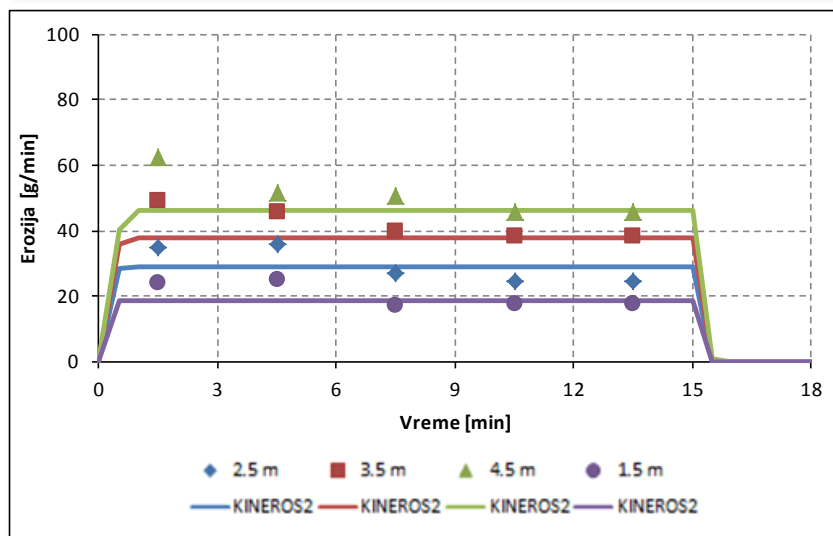
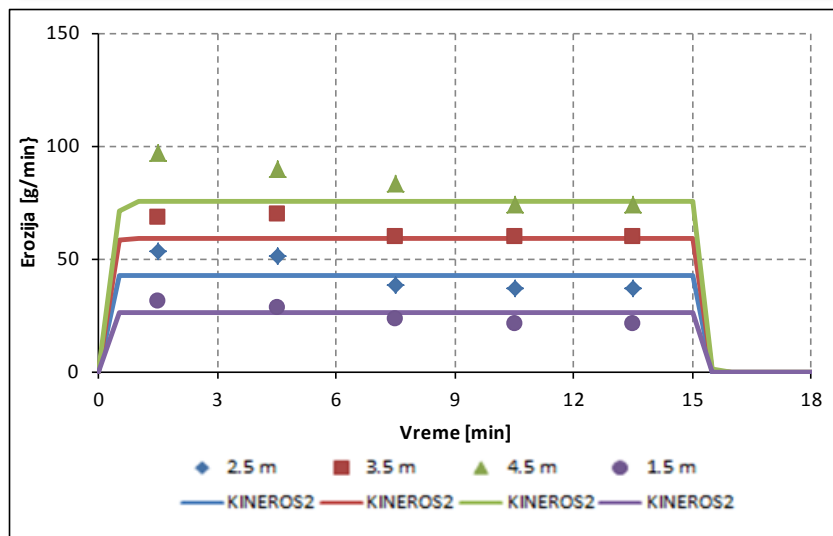
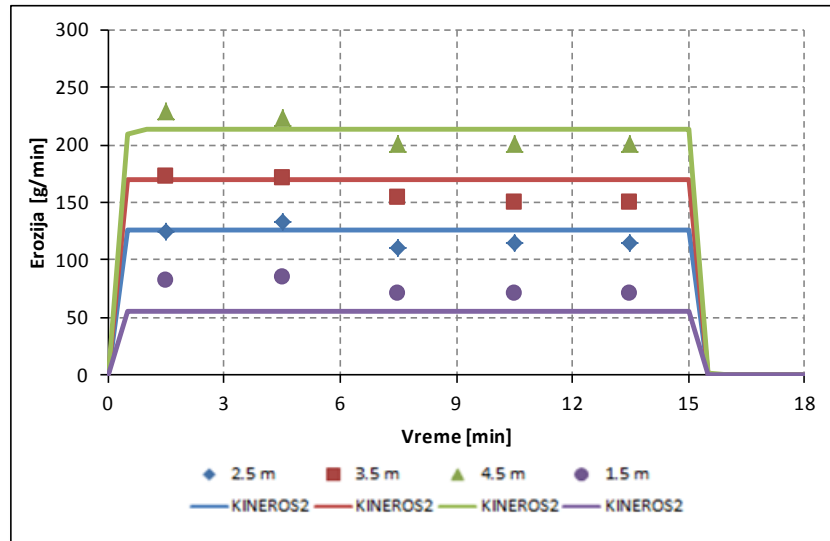
Prilog 35. Oticaaj sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 2.0 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%



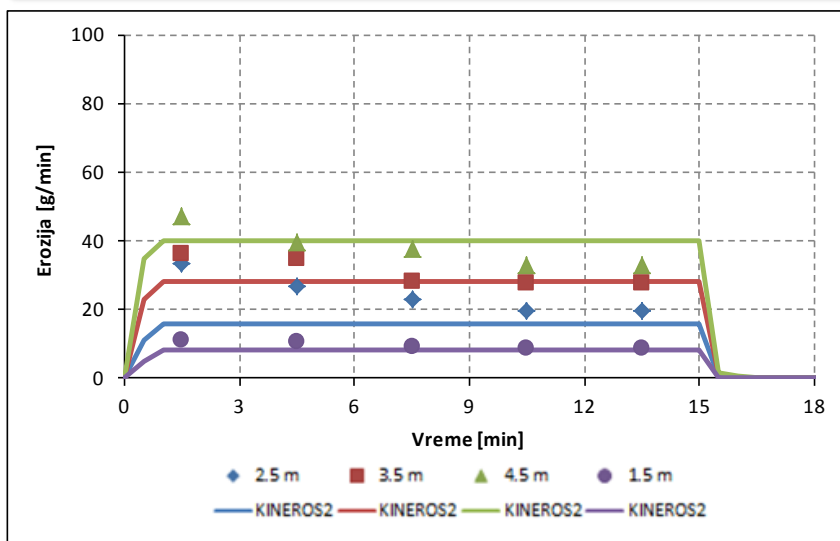
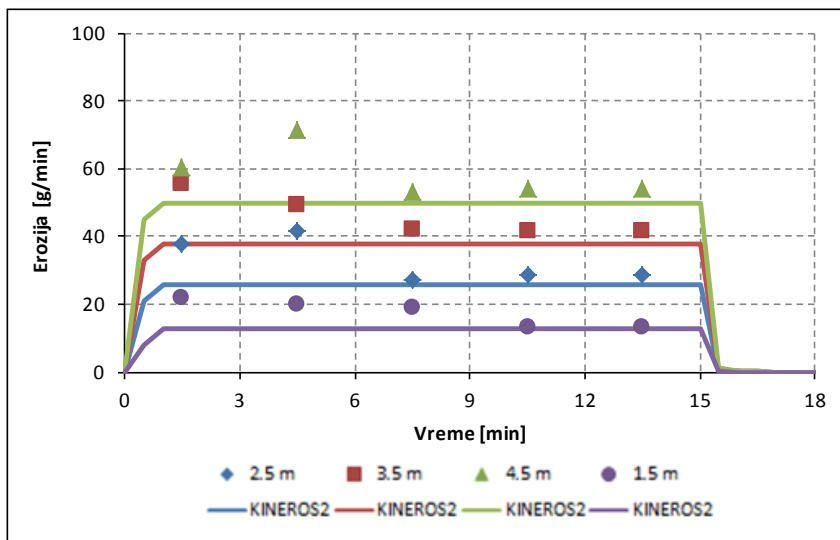
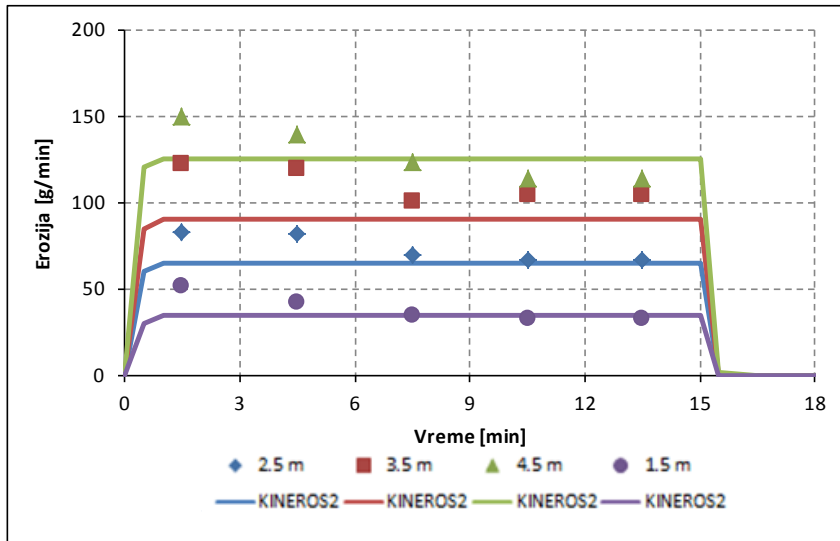
Prilog 36. Erozija sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 3.1 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%



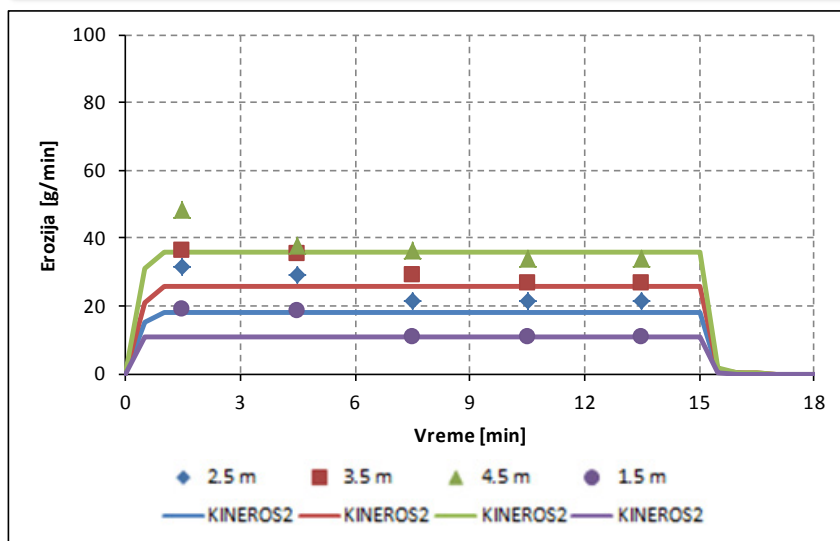
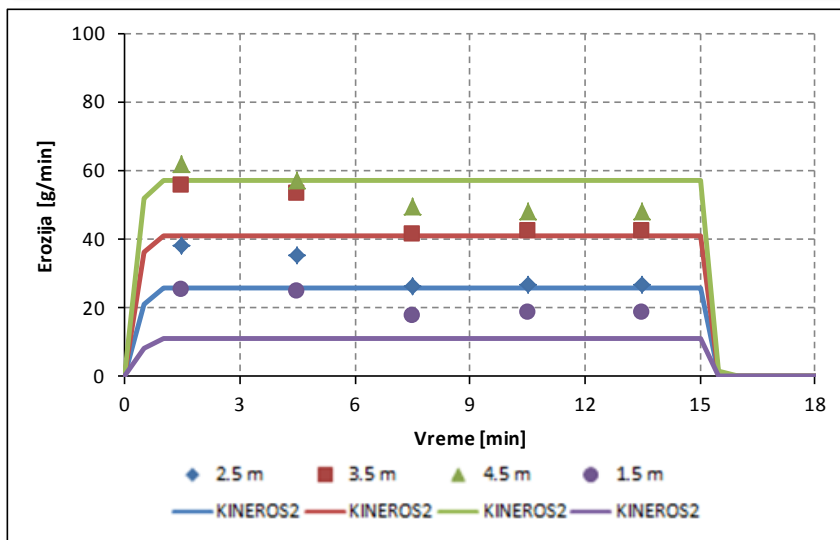
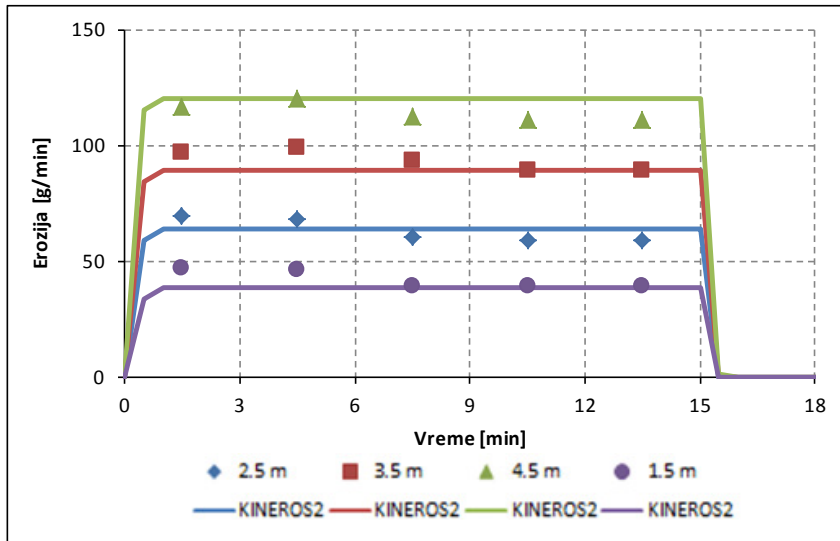
Prilog 37. Erozija sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 2.8 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%



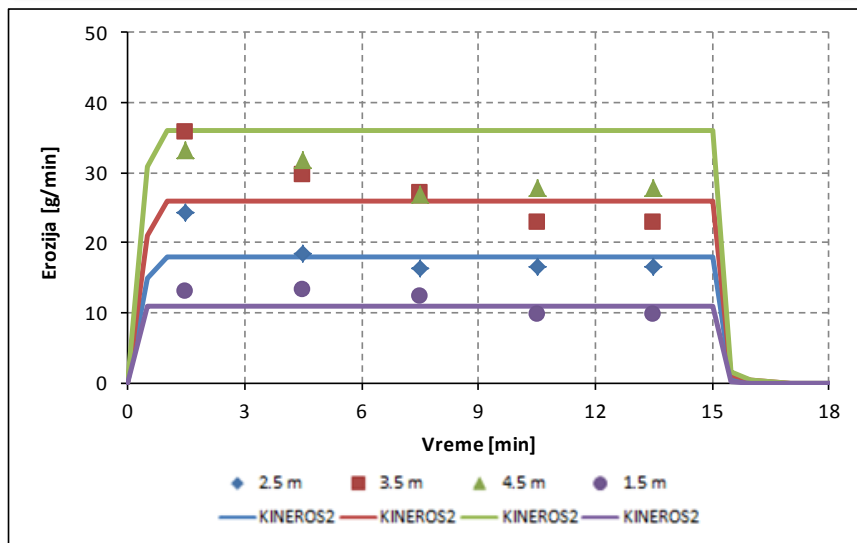
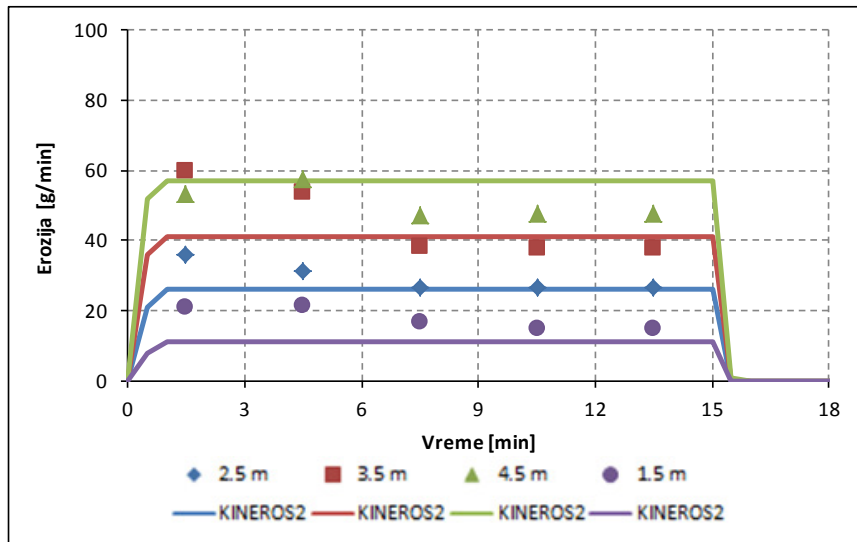
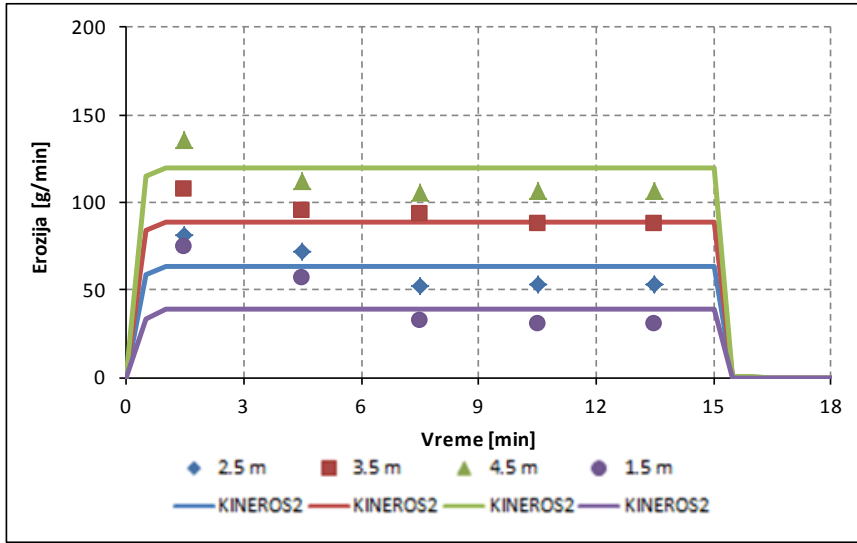
Prilog 38. Erozijske površine dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 2.4 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%



Prilog 39 Erozija sa slivnih površina dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 2.2 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%



Prilog 40. Erozijske površine dužina 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m usled kiše intenziteta 2.0 mm/min i nagiba 10%, 7% i 4%





Prilog 41. Eksperimentalna instalacija



Prilog 42. Posude za zasićivanje zemljišta



Prilog 43. Izliv i slavine za ispust vode nakon zasićenja zemljišta



Prilog 44. Pumpa i rezervoar za vodu



Prilog 45. Upravljački mehanizam



Prilog 46. Mlaznica VeeJet 80100



Prilog 47. Kutija za ograničavanje dometa mlaza i oluci za povrat viška vode iz kutije u rezervoar

Прилог 0.

Електронска верзија докторске дисертације:

Електронска верзија докторске дисертације предаје се у облику фајла чији је садржај идентичан штампаној дисертацији у PDF формату која је била на увиду јавности.

У фајл су обавезно укључене и скениране попуњене и потписане изјаве дате као Прилог 1, 2 и 3.

Назив фајла је име Презиме докторанда исписано енглеским алфабетом.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани/а ОГЊЕН ГАБРИЉ
(име и презиме кандидата)

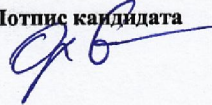
Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ ПРОЦЕСА НА СЛИВУ: ПАДАВИНЕ, ОТИЦАЈ И ЕРОЗИЈА ТЛ

- резултат спостведеног истраживачког рада,
- да предложена дисертација ни у целини, ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис кандидата



У Новом Саду,
дана 24.02.2016

Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада
и дозвола за објављивање личних података**

Име и презиме аутора ОГЊЕН ГАБРИЋ

Студијски програм ХИДРОТЕХНИКА

Наслов рада ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ ПРОЦЕСА НА СЛИВУ: ПАДАВИНЕ, ОТИКАЈ И ЕРОЗИЈА ТЛА

Ментор ДР ЈАСНА ПЛАВШИЋ И ДР МИРОСЛАВ СПАСОЈЕВИЋ

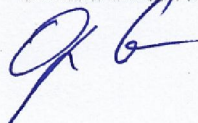
Потписани/а

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за постављање на увид јавности на порталу Дигитална библиотека докторских дисертација Универзитета у Новом Саду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада. Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама Дигиталне библиотеке дисертација Универзитета у Новом Саду, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Новом Саду, као и у Националном репозиторијуму докторских дисертација одбрањених у Србији (НарДуС).

У Новом Саду,
дана 24.02.2016.

Потпис кандидата



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Библиотеку Факултета или Центра _____ и Централну библиотеку Универзитета у Новом Саду да у Дигиталну библиотеку докторских дисертација Универзитета у Новом Саду унесу моју докторску дисертацију под насловом:

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ ПРОЦЕСА НА СЛИЉУ: ПАДАВИНЕ, ОТИЦАЈ И ЕРОЗИЈА ТЛА

_____, која ће потом бити преснимљена у Национални репозиторијум докторских дисертација одбрањених у Србији (НарДуС).

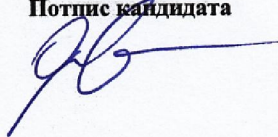
Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталну библиотеку дисертација Универзитета у Новом Саду и у НарДуС могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа.)

Потпис кандидата



У Новом Саду,
дана 24.02.2016.