

# Dimenzioniranje sustava površinske odvodnje s poljoprivrednog zemljišta

---

**Dobrenić, Josip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Agriculture / Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:846963>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-19**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



# **DIMENZIONIRANJE SUSTAVA POVRŠINSKE ODVODNJE S POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA**

DIPLOMSKI RAD

Josip Dobrenić

Zagreb, listopad, 2020.



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



Diplomski studij:  
Poljoprivredna tehnika-melioracije

# **DIMENZIONIRANJE SUSTAVA POVRŠINSKE ODVODNJE S POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA**

DIPLOMSKI RAD

Josip Dobrenić

Mentor:

doc. dr. sc. Gordon Gilja

Zagreb, listopad, 2020.



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



## IZJAVA STUDENTA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, **Josip Dobrenić**, JMBAG **0178102291**, rođen/a **18.09.1995.** u **Sisku**, izjavljujem da sam samostalno izradila/izradio diplomski rad pod naslovom:

### **DIMENZIONIRANJE SUSTAVA POVRŠINSKE ODVODNJE S POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA**

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedina autorica/jedini autor ovoga diplomskog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj diplomski rad ne sadrži dijelove radova predanih na Agronomskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga diplomskog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznata/upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana 30. 10. 2020.

\_\_\_\_\_  
*Potpis studenta / studentice*



Sveučilište u Zagrebu  
Agronomski fakultet

University of Zagreb  
Faculty of Agriculture



## IZVJEŠĆE

### O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studenta/ice **Josipa Dobrenića**, JMBAG 0178102291, naslova

#### DIMENZIONIRANJE SUSTAVA POVRŠINSKE ODVODNJE S POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA

obranjen je i ocijenjen ocjenom \_\_\_\_\_, dana \_\_\_\_\_.

Povjerenstvo:

potpisi:

1. doc. dr. sc. Gordon Gilja mentor

\_\_\_\_\_

2. dr.sc. Marina Bubalo Kovačić neposredni voditelj

\_\_\_\_\_

3. prof. dr. sc. Ivan Šimunić član

\_\_\_\_\_

4. doc.dr.sc. Ivan Mustać član

\_\_\_\_\_

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1 Cilj rada.....	3
2. Pregled literature.....	3
3. Prikaz i razrada podloga.....	5
4. Materijali i metode.....	6
4.1 Ručni hidrološki proračuni kanalske mreže.....	8
4.2 Hidrološki proračun otjecanja u HEC-HMS-u.....	9
4.3 Hidraulički proračuni tečenja u kanalskoj mreži.....	11
5. Rezultati i rasprava.....	15
6. Zaključak.....	24
7. Popis literature.....	25

## Sažetak

Diplomskog rada studenta **Josipa Dobrenića**, naslova

### **DIMENZIONIRANJE SUSTAVA POVRŠINSKE ODVODNJE S POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA**

Problem koji se javlja prilikom dimenzioniranja sustava površinske odvodnje je određivanje geometrije pojedinih kanala u kanalskoj mreži s optimalnim nagibom i poprečnim presjekom. Ovim radom će se za proračun koristiti softver za modeliranje tečenja u otvorenim vodotocima te se ispitati njegova prikladnost za rješavanje definiranog problema. Izračun otjecanja s pojedinačnih parcela je izračunano u diskretnim točkama na ušćima kanala IV. reda pomoću modela HEC-HMS. Na temelju topografije terena položena je mreža kanala III., II. i I. reda, pri čemu će se okvirno definirati njihov uzdužni nagib. Proračun se provodi promjenom dubine i nagiba kanala III., II. i I. reda sve dok se ne uspostavi tečenje bez uspora, tj. dok se ne optimizira geometrija kanala. Cilj rada je utvrditi da li su rezultati matematičkih modela pouzdani kada se on primijeni na složenu mrežu kanala koji imaju niveletu na različitim visinskim kotama.

**Ključne riječi:** površinska odvodnja, HEC-RAS, HEC-HMS

## Summary

Of the master's thesis – student **Josip Dobrenić**, entitled

### **DIMENSIONING OF THE AGRICULTURAL SURFACE DRAINAGE SYSTEM**

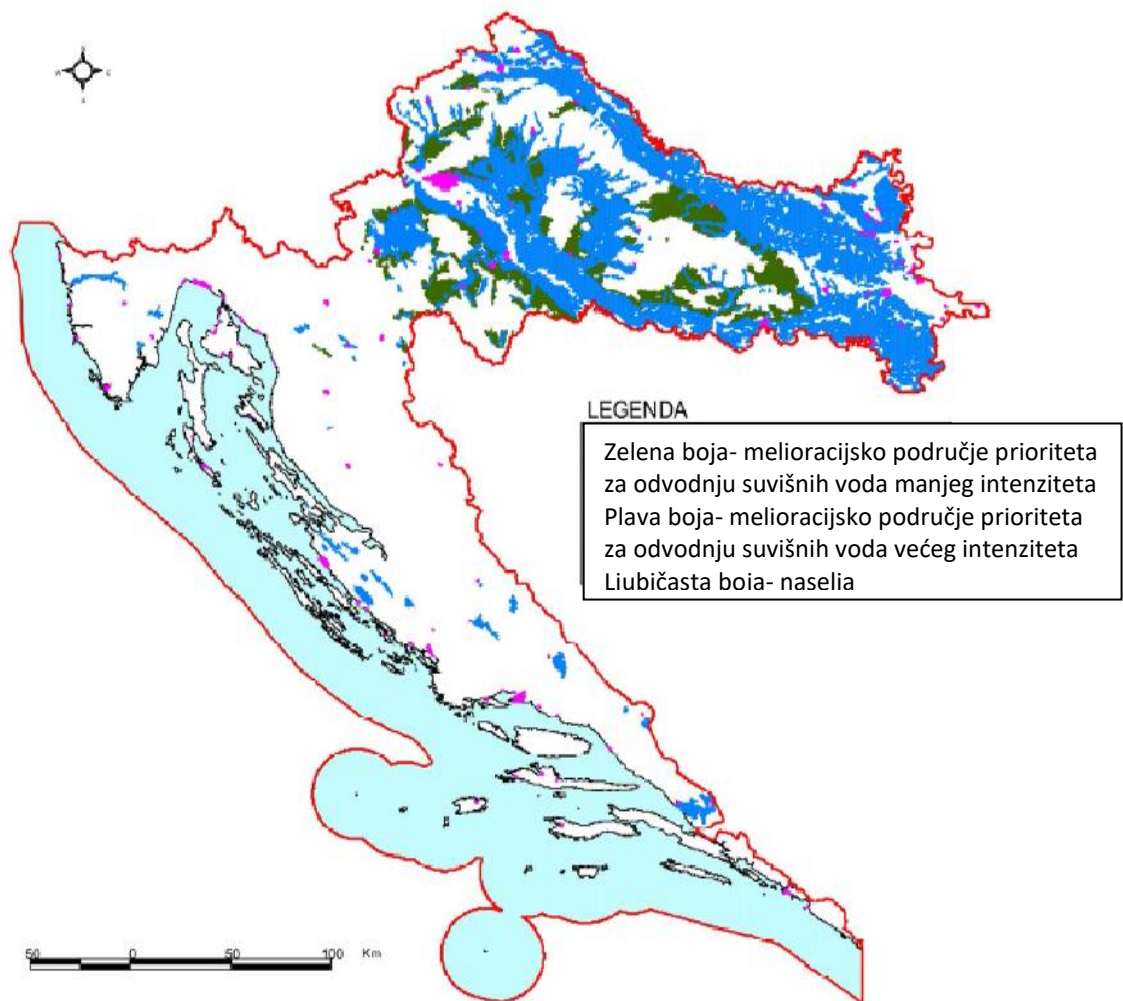
Goal in surface drainage system dimensioning process is to determine the geometry of individual channels in the channel network with an optimal geometry and slope. Flow modeling software for open channels is used for the hydraulic calculations during which its suitability for the defined problem is evaluated. The calculation of runoff from individual plots was calculated at discrete points at the outlets of the detailed channels using the HEC-HMS model. Based on the topography of the terrain, approximate slope of the canals in the network is defined. The flow calculation is performed by adjusting the depth and slope of the channels until a flow without backwater effect is established, i.e. until the channel geometry is optimized. The aim of this paper is to determine whether the results of mathematical models are reliable when applied to a complex network of channels that have a inlets/outlets at different elevations.

**Keywords:** surface drainage, HEC-RAS, HEC-HMS



## 1. Uvod

Tema ovog diplomskog rada će se baviti problematikom i programskim optimaliziranjem dinamike vode u kanalima površinske odvodnje. Površinska odvodnja kao i podzemna ili kombinirana odvodnja se izvode na na hidromorfnim i semiterestričkim tlima koja imaju problem suvišnim oborinskih, podzemnih ili vanjskih voda (poplavne, slivne). Prema Husnjaku (2007), red hidromorfnih i semiterestričkih tala zauzima 1.087.905,40 hektara (ha) što čini 41,99% ukupnih obradivih tala.



Slika 1.1 Rasprostranjenost melioracijskih područja za odvodnju suvišnih voda u Hrvatskoj (Husnjak 2007)

Tolerancija biljnih kultura na prekomjerno vlaženje tla je različita i ovisi o nizu čimbenika, od kojih su najvažniji fenofaza razvoja u kojoj se vlaženje pojavljuje i dužina njegova trajanja. Smanjenje prinosa poljoprivredne kulture je proporcionalno trajanju pojave suvišne vode u tlu, pri čemu se najveće sniženje prinosa očekuje u razdoblju intenzivnog porasta biljaka (Petošić i Tomić 2011, Šimunić, 2013 ).

Tablica 1.1 Utjecaj suvišne vode na sniženje prinosa nekih poljoprivrednih kultura (%)(Petošić i Tomić 2011)

Poljoprivredna kultura	Duljina prekomjernog vlaženja u danima				Kritični mjeseci
	3	7	11	15	
Ozime žitarice	5-20	5-20	10-80	20-100	V-VI
Jare žitarice	10-20	20-50	40-75	20-100	V-VI
Kukuruz	10-20	10-80	20-100	30-100	IV-VI
Suncokret	10	20-40	30-80	50-100	V-VI
Krumpir	30-50	80-100	100	100	VI-VIII
Šećerna repa	10	40-50	90-100	100	III-X
Krmno bilje	10	25-40	20-70	30-70	V-VII
Livade	-	10-20	20-30	10-50	V-VII
Pašnjaci	-	10-20	20-50	10-70	V-VII

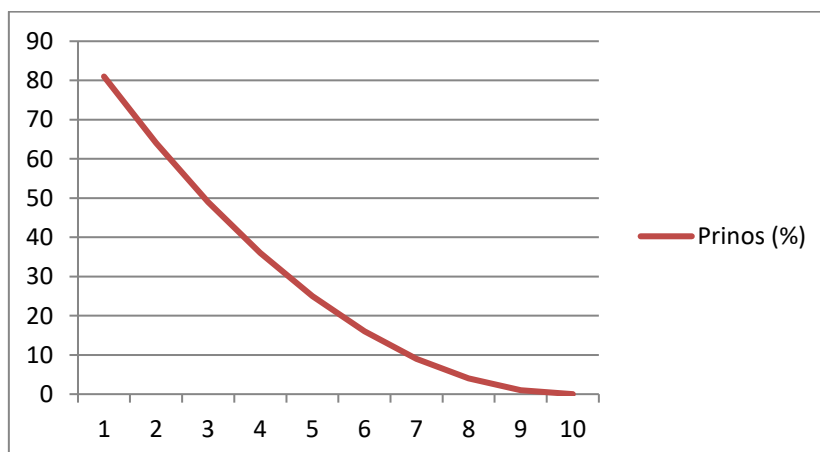
Vrlo je bitno da se voda sa melioracijskog područja evakuira u što kraćem vremenu i iz dubine zakorijenjivanja poljoprivrednih kultura. Kostjakov daje formulu za smanjenje prinosa žitarica zbog prekomjernog vlaženja zone zakorijenjivanja (Vidaček, 1998):

$$Y=(10-T)^2$$

Y= % od očekivanog prinosa

T= trajanje prekomjernog vlaženja u danima

Iz prethodne formule vidimo da već kod prekomjernog vlaženja zone zakorijenjivanja od 2 dana prinos se smanjuje za 36 % što ukazuje na bitnost pravovremenog otjecanja vode sa poljoprivredne površine. Stoga je vrlo bitno izraditi pravilnu kanalsku mrežu na melioracijskom području, točno odrediti klimatske, pedološke i hidrološke faktore područja za pravovremeno otjecanje suvišne vode sa područja. Nakon otjecanja suvišne vode iz tla količina vode u zoni zakorijenjivanja je približna vrijednosti poljskog kapaciteta za vodu (PKV).



Slika 1.2 Slika grafičkog prikaza smanjenja prinosa po danima prekomjernog vlaženja (Petošić i Tomić 2011)

## 1.1. Cilj rada

Cilj rada je provesti proračun otjecanja i tečenja u kanalskoj mreži pomoću matematičkih modela. Potrebno je utvrditi da li su rezultati modela pouzdani kada se on primijeni na složenu mrežu kanala koji imaju niveletu na različitim visinskim kotama. Topografija poljoprivrednog zemljišta će biti digitalizirana u AutoCAD programu gdje će se mjerenjem odrediti karakteristike zemljišta – nagibi, površine i sl. Na temelju ulaznih parametara o terenu i karakteristikama mjerodavne oborine napraviti će se izračun otjecanja s pojedinačnih parcela pomoću modela HEC-HMS. Otjecanje će biti izračunano u diskretnim točkama na ušćima kanala IV. reda. Na temelju topografije terena položiti će se mreža kanala III., II. i I. reda, pri čemu će se okvirno definirati njihov uzdužni nagib. Mreža kanala će poslužiti za izradu geometrije modela tečenja HEC-RAS. Na temelju izlaznih protoka iz modela HEC-HMS i nagiba kanala iz AutoCAD-a napraviti će se proračun tečenja. Proračun će se optimizirati promjenom dubine i nagiba kanala III., II. i I. reda sve dok se ne uspostavi tečenje bez uspora, tj. dok se ne optimizira geometrija kanala. Rezultati proračuna su vodostaji duž kanala koji će poslužiti za ocjenu primjene ovakvog pristupa proračunu otjecanja.

## 2. Pregled Literature

U sklopu ovog rada važno je i prikazati trenutno stanje odvodnje u Hrvatskoj. Marušić (1992., cit. prema Vidačeku, 1998.) navodi kako su ukupne melioracijske površine za odvodnju 1.789.070 ha dok ukupne zasijane površine iznose 1.331.000 ha ili 74,3 % , potpuno sagrađeni hidromelioracijski površinske odvodnje do kraja osamdesetih godina pokrivaju 600.054 ha (33,54%), a nepotpuno sagrađeni sustavi 518.830 ha (29%) . Također navodi kako za 670.186 ha (37,5%) hidromorfni tala, potrebna je gradnja novih sustava površinske odvodnje. Prema podacima HDON-a (Hrvatsko društvo za odvodnju i navodnjavanje) za 2014. godinu hidromelioracijski sustavi površinske odvodnje su u potpunosti izgrađeni na 724 749 ha (43,3 %), dijelom na 324 662 ha (19,4 %), a nisu izgrađeni na 624 381 ha (37,3 %) od ukupnih potreba na 1 673 792 ha melioracijskih površina (100 %) (Vranješ 2014). Obnovljenost melioracijskih kanala za detaljnu odvodnju na prostoru dreniranog poljoprivrednog zemljišta u Republici Hrvatskoj u 2012. godini se kreće na razini od 5.157,08 km odnosno 56,35%. Za daljnju obnovu kanala na razini države ostalo je još oko 3.994,99 km ili 43,65%. Najviše obnovljenih kanala u km, ukupno 1.562,12 km prisutno je u osječko-baranjskoj županiji, a najviše kanala koje treba još obnoviti (1.098,75 km), nalazi se u vukovarsko-srijemskoj županiji. Temeljem prikazanog vidljivo je da veliki dio, oko 40 i više %, detaljne površinske melioracijske odvodnje (kanali III i/ili IV reda) zbog neredovitog održavanja ima ozbiljne probleme u pogledu zadovoljavajuće funkcionalnosti, odnosno odvođenja suvišnih voda (Mustać i sur. 2019). U posljednjih 30-ak godina mnogo je učinjeno na nacionalnoj razini u realizaciji mjera vezanih za reguliranje suvišnih voda ( melioracijsku odvodnju) u agroekosustavima. Međutim, u posljednjih 20-ak godina gospodarenje (održavanje) hidromelioracijskih sustava odvodnje nije na zadovoljavajućoj razini.

Tablica 2.1 Prikaz stanja melioracijskih kanala III./IV. reda (zaključno s 2012.) na površinama dreniranog poljoprivrednog zemljišta po županijama u RH (Mustać i sur. 2019)

ŽUPANIJA		STANJE VODOTOKA I MELIORACIJSKIH KANALA					
		Melioracijski kanali III./IV. reda					
Redni broj	Naziv	Obnovljeni		Neobnovljeni		Ukupno	
		km	%	km	%	km	%
1.	Zagrebačka	886,46	86,19	142,02	13,81	1.028,48	100,00
2.	Krapinsko-zagorska					0,00	
3.	Sisačko-moslavačka	589,95	75,92	187,11	24,08	777,06	100,00
4.	Karlovačka	36,28	88,98	4,04	10,02	40,32	100,00
5.	Varaždinska	5,70	100,00			5,70	100,00
6.	Koprivničko-križevačka	84,04	87,51	11,63	12,49	95,67	100,00
7.	Bjelovarsko-bilogorska	130,21	52,39	118,33	47,61	248,54	100,00
8.	Primorsko-goranska						
9.	Ličko-senjska						
10.	Virovitičko-podravska	366,93	27,33	675,40	72,67	1.042,33	100,00
11.	Požeško-slavonska	78,12	84,30	5,06	15,70	83,18	100,00
12.	Brodsko-posavska	341,51	27,95	880,30	72,05	1.221,81	100,00
13.	Zadarska	59,90	90,82	6,05	9,18	65,95	100,00
14.	Osječko-baranjska	1.562,12	65,47	823,63	34,53	2.385,75	100,00
15.	Šibensko-kninska	14,50	94,95	0,77	5,05	15,27	100,00
16.	Vukovarsko-srijemska	816,70	42,63	1.098,75	57,37	1.915,45	100,00
17.	Splitsko-dalmatinska					0,00	
18.	Istarska županija	82,12	73,86	29,06	26,14	111,18	100,00
19.	Dubrovačko-neretvanska						
20.	Međimurska	80,05	100,00			80,05	100,00
21.	Grad Zagreb	22,49	63,65	12,84	36,35	35,33	100,00
<b>UKUPNO</b>		<b>5.157,08</b>	<b>56,35</b>	<b>3.994,99</b>	<b>43,65</b>	<b>9.152,07</b>	<b>100,00</b>

Prema prikazanim statistikama vidljivo je da su kanali detaljne i osnovne odvodnje od osamdesetih godina do danas sustavno zanemarivani i neodržavani te su stoga i neučinkoviti (pogotovo kanali III. i IV reda).

Dobro je poznata činjenica da je geneza tla u izravnoj vezi s pojavom i količinom viška vode, koja utječe na dinamiku i načine njegovog vlaženja. Prema načinima vlaženja u Hrvatskoj je sačinjena podjela tala agroekosustava u odgovarajuće redove i niže jedinice (Husnjak, 2014). Količina oborina u kombinaciji s geomorfološkim (reljef, stratigrafija) i pedološkim obilježjima znatno utječe na pojavu suvišnih voda agroekosustava. Prema pokazateljima koje navode Tomić (1988), Tomić i Petošić (1989) te Petošić (1993), a koristeći metodu bilance vode po Thornthweitu, vrijednosti godišnjeg viška vode u tlu u ekosustavima Hrvatske kreću se od 150 do 850 mm ( $l/m^2$ ) (Ondrašek i sur., 2015).

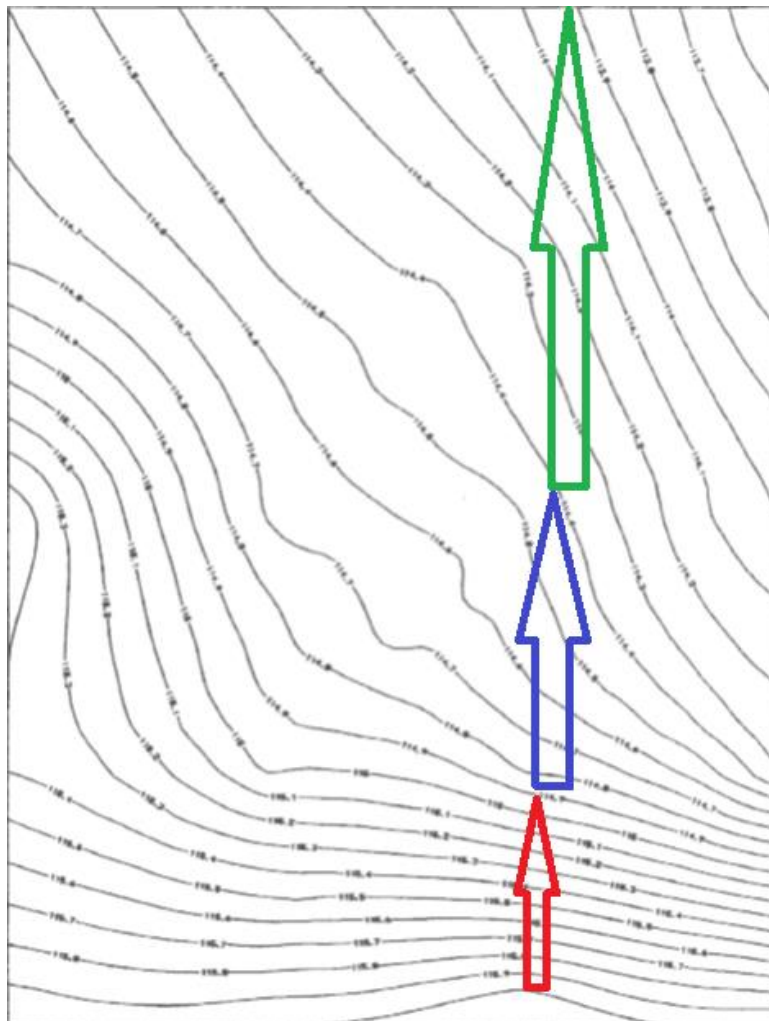
### 3. Prikaz i razrada podloga

Osnovna podloga za rad je topografska karta nekog područja kao podloga te podaci o kiši i pedološki podaci kako bi mogli raditi izračune. Na slici 2.1 je prikazana topografska karta mjerila 1:10000 za područje na kojem smo radili izračune za veličine kanala.

Površina je veličine 930 ha te mu je najviša nadmorska visina 116 m.n.m, a najniža 113.6 m.n.m što znači da je relativan pad na cjelokupnom području (od najviše do najniže točke) 0.042% ili 0.42‰. 116-114.9 m.n.m pad terena je 0.16% ili 1.6‰ (označeno crvenom strelicom na slici 2.1), 114.9-114.4 m.n.m pad terena je 0.037% ili 0.37‰ (označeno plavom strelicom na slici 2.1) te od 114.4-113.6 m.n.m pad terena je 0.057% ili 0.57‰ (označeno zelenom strelicom na slici 2.1) što nam prikazuje da teren reljefno nije homogen.

Za zadano područje su nam poznati podaci:

- 1) Koeficijent mjerodavne oborine  $a=23$  sa eksponentom  $n=0.33$
- 2) Mjerodavno trajanje kiše  $t_k=22h$
- 3) Vrijeme otjecanja po prestanku kiše  $t_o= 18h$
- 4) Koeficijent otjecanja  $\sigma= 0.27$  mm/s
- 5) Koeficijent obrade terena  $\gamma= 2.80$
- 6) Infiltracija  $K_f=0.23$  mm/s



Slika 3.1 Topografska karta melioracijskog područja

## 4. Materijali i metode

Za početak je potrebno izračunati razmak između kanala IV. reda. Razmak između kanala IV. reda određen je prema izrazu A. N. Kostjakova:

$$l = \frac{0,5 \cdot c \cdot t_0^2 \cdot [(\sigma \cdot i)^{0.75} + 4 \cdot K_i]^2}{\sigma \cdot i}$$

$l$  – razmak MK-IV [m]

$c$  – koeficijent obrade terena,  $c = \alpha \cdot \sqrt{I}$ ,  $\alpha = \frac{87}{\gamma}$

$I$  – pad terena (parcele) [m/m],  $I = \frac{\Delta H}{\Delta L}$

$\gamma$  – koeficijent površinske hrapavosti brazda (koef. obrađenosti terena) [1]

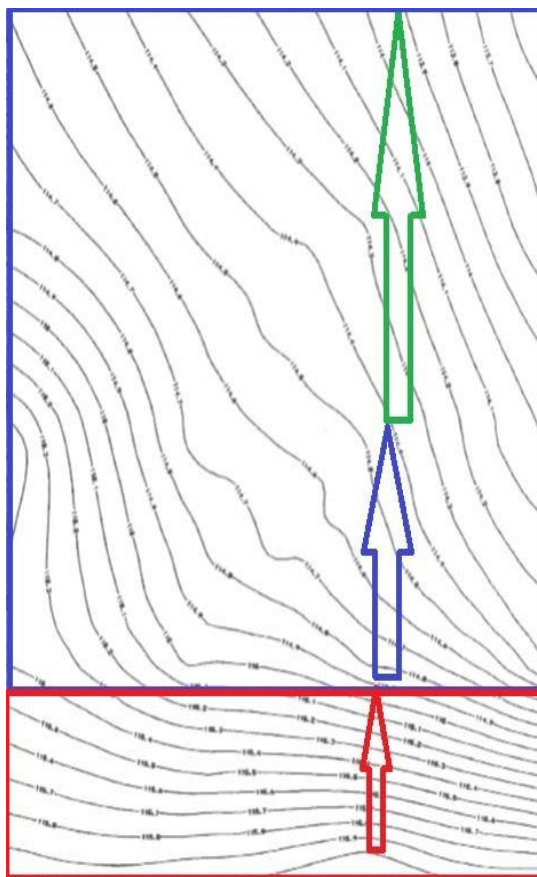
$t_0$  – mjerodavno vrijeme otjecanja suvišne vode [h]

$\sigma$  – koeficijent površinskog otjecanja [1]

$i$  – intenzitet oborine [mm/h],  $i = \frac{h}{t_k}$ , ( $h$  - visina oborine, [mm];  $t_k$  – trajanje oborine, [h])

$K_i$  – koeficijent infiltracije [mm/h]

Zbog većeg nagiba na južnom dijelu melioracijskog područja, područje je podijeljeno na dva dijela zbog efektivnosti kanala.



Slika 4.1 Melioracijsko područje podijeljeno u 2 podpodručja

Na slici 3.1 podpodručje omeđeno crvenim pravokutnikom je područje većeg nagiba od juga prema sjeveru a podpodručje omeđeno plavim pravokutnikom područje manjeg nagiba.

Ulazni podaci:

Tablica 4.1 Ulazni klimatski podaci

Podaci	1	2
$\sigma =$	0.27	0.27
$t_0$ [sat] =	18	18
$i$ [mm/sat]=	2.9	2.9
$K_i$ [mm/sat]=	0.23	0.23
$C =$	0.684	0.684
$l =$	0.000495	0.0004849
$l_{SR} =$	0.00048995	
$\gamma =$	2.8	2.8
$h_k =$	63.79	63.79
$t_k =$	22	22
$a =$	23	23
$n =$	0.33	0.33

Izračunani maksimalni razmaci kanala IV reda:

Tablica 4.2 Razmaci između kanala IV reda

	razmaci	
L <sub>1</sub> =	220	[m]
L <sub>2</sub> =	415	[m]

Hidrološkim i hidrauličkim proračunom površinske odvodnje izračunati će se protoci i visine vode u pojedinim kanalima. Radi što ekonomičnijeg rješenja sa što manje iskopa, uzdužni pad kanala određen je na način da bude paralelan sa padom terena uz uvjet da ne prelazi minimalne i maksimalne vrijednosti od 0.3‰ do 3‰.

#### 4.1 Ručni hidrološki proračuni kanalske umreže

Hidrološki proračun kanalske mreže podrazumijeva određivanje mjerodavnog protoka na svakom kontrolnom profilu i vrijednost ukupnog protoka na izlaznom profilu kao glavni izlazni podatak. Proračun je proveden ručno u Excel-u te je uspostavljen i HEC-HMS model za simulaciju hidroloških uvjeta na slivu. Rezultat ručnog proračuna je vršni protok za odabrani kišni događaj, dok je rezultat proračun HEC-HMS-om kompletan vodni val nastao površinskim otjecanjem na svakom profilu. Napravljena je usporedba dobivenih rezultata za maksimalne protoke iz oba načina proračuna.

Tablični hidrološki proračun:

Mjerodavni protok na svakom profilu dobiven je prema sljedećim izrazima:

$$Q_{i-i} = q_{i-i} \cdot F_{i-i}, \text{ [l/s ili m}^3\text{/s]}$$

$q_{i-i}$  - specifični protok na i-tom profilu [l/s/ha]

$F_{i-i}$  - pripadna površina sliva [ha]

$$q_{i-i} = 2.8 \cdot \frac{\sigma \cdot h}{t_k} \cdot \frac{K}{A_{i-i}}, \text{ [l/s/ha]}$$

$\sigma$  - koeficijent površinskog otjecanja [1]

$h$  - mjerodavna visina oborina [mm]

$t_k$  - mjerodavno trajanje oborina [h]

$K$  - ovisi o obliku hidrograma otjecanja,  $k=2$  za trokutasti oblik hidrograma

$A_{i-i}$  - koeficijent koji ovisi o terenskim uvjetima otjecanja, tj. suvišne vode od najudaljenije točke slivne površine do mjerodavnog profila melioracijskog kanala,



$$A_{i-i} = \frac{t_k \cdot t_{c,i-i}}{t_k} [1]$$

$t_{c,i-i}$  - vrijeme koncentracije i-tog profila [h]

Vrijeme koncentracije u svakom kontrolnom profilu ovisi o vremenima koncentracije kanala koji imaju utjecaj na protok navedenog profila te iznositi:

$$t_c^{i-i} = t_0 + t_{IV}^{i-i} + t_{III}^{i-i} + t_{II}^{i-i} + t_I^{i-i}, [h]$$

$t_c$  [sati] - vrijeme koncentracije

$t_0 = 15$  [sati] - vrijeme otjecanja po prestanku kiše po terenu

$t_k = 15$  [sati] - mjerodavno trajanje kiše

$t_{IV} = \frac{\lambda^{IV}}{v^{IV}}$  [sati] - vrijeme tečenja po MK-IV kanalu

$t_{III} = \frac{\lambda^{III}}{v^{III}}$  [sati] - vrijeme tečenja po MK-III kanalu

$t_{II} = \frac{\lambda^{II}}{v^{II}}$  [sati] - vrijeme tečenja po MK-II kanalu

gdje vrijeme koncentracije kanala svakog reda posebno ovisi o pretpostavljenim mjerodavnim brzinama u svakom kanalu. U tablici 4.3 prikazane su pretpostavljene brzine u kanalima koje služe za vremensku transformaciju vodnog vala.

Tablica 4.3 Pretpostavljene brzine u kanalima

Pretpostavka brzine toka po kanalima:	
RED KANALA	v(m/s)
IV	0.2
III	0.4
II	0.8
I	0.8

## 4.2 Hidrološki proračun otjecanja u HEC-HMS-u

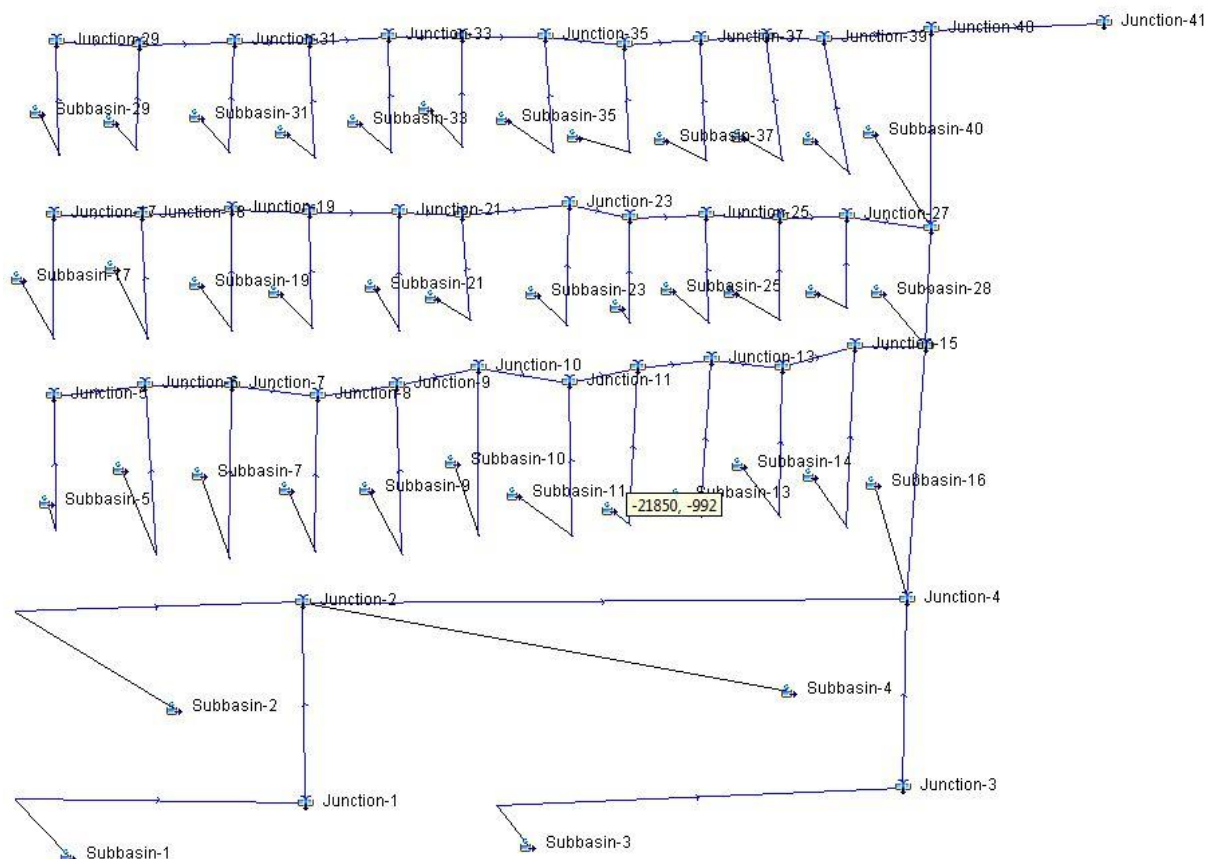
HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) je program dizajniran od stručnjaka iz vojske SAD-a za potrebe simulacije otjecanja vode sa terena i nekih drugih procesa i čimbenika (otapanje snijega, sadržaj vlage u tlu, evapotranspiracija nekog područja, erozija tla, sedimentiranje unutar kanala). U programu su mogući razni modeli otjecanja. Program se može preuzeti na web stranici hidrološkog tehničkog centra vojske SAD-a <https://www.hec.usace.army.mil/>. Bitno je napomenuti da prije početka rada je potrebno podesiti postavke računala na vrijeme i zonu kao i u SAD-u te također podesiti računalo da prepozna točku kao decimalno mjesto jer u suprotnom programski paketi HEC-HMS i HEC-RAS neće moći prepoznati unesene vrijednosti protoka, padalina, itd. Izrada

kontinuiranih hidroloških modela je veoma značajna zato što se ovi modeli koriste za hidrološke prognoze i za potrebe analiza rada vodoprivrednih sistema i analiza utjecaja klimatskih promjena na vodne resurse. Softverski paket HEC-HMS se često koristi u hidrološkom modeliranju jer je besplatan. Ovaj model je prethodno namijenjen modeliranju otjecanja od izoliranih epizoda kao što su računске kiše, ali omogućava i kontinuirane hidrološke simulacije. Sastoji se iz više komponenata namijenjenih modeliranju efektivnih padalina, direktnog i baznog otjecanja i predviđanju valova u vodotocima. U okviru svake od komponenata postoji nekoliko modela, što omogućava da se HEC-HMS prilagodi dostupnim podacima i potrebama izrade modela. HEC-HMS sadrži nekoliko komponenata namijenjenih modeliranju:

- 1) efektivnih padalina
- 2) direktnog otjecanja
- 3) baznog otjecanja
- 4) predviđanja valova duž vodotoka.

Kvaliteta hidrološkog modela određena je slaganjem rezultata simulacija i promatranih veličina, najčešće hidrograma otjecanja. Slaganje modeliranih i promatranih hidrograma kvantificira se različitim pokazateljima (npr. koeficijentom korelacije, Nash-Suttcliffe-ovim koeficijentom efikasnosti – NSE, itd.). Uloga pokazatelja slaganja je da ukažu na sistematske greške (konstantno precjenjivanje ili podcjenjivanje protoka) i dinamičke greške (npr. kašnjenje vrha hidrograma, brzina padanja recesijskih grana hidrograma, itd.) [6, 7]. Kvaliteta modela ocjenjuje se i tokom tzv. validacije modela, koja podrazumijeva primjenu (kalibriranog) modela za simulaciju otjecanja tokom perioda različitog od kalibracijskog. U općem slučaju, pokazatelji slaganja imaju lošije vrijednosti u periodu validacije u odnosu na period kalibracije.

Ovaj model otjecanja u HEC-HMS-u određen je metodom SCS jediničnog hidrograma. Ulazni podaci za metodu su sljedeći: vrijeme koncentracije  $t_c = 20$  h, vrijeme zakašnjenja  $t_{lag} = 0,6 * t_c = 720$  min, CN broj 30. Tečenje u kanalima modelira se metodom kinematičkog vala. Čvorovi se nalaze na mjestu kontrolnih profila u tabličnom proračunu radi usporedbe dobivenih rezultata.



Slika 4.2 Prikaz situacije u HEC-HMS programu

Za simulaciju je stavljeno da mjerenje traje od 4. veljače 2020 7:00 sati do 8 veljače 2020 5:00 sati sa intervalom mjerenja svakih sat vremena. Trajanje kiše iznosi 22 sata znači od 4 veljače u 7:00 sati do 5 veljače u 5:00.

### 4.3 Hidraulički proračuni tečenja u kanalskoj mreži

Tečenje u kanalima je pretpostavljeno kao stacionarno, jednoliko, konzervativno, turbulentno, jednodimenzionalno, u prizmatičnim koritima te je hrapavost korita kanala konstantna. Problem proračuna vodnih lica svodi se na određivanje konsumpcijskih odnosa za odabran poprečni profil kanala (širina dna i nagib pokosa kanala), odabran uzdužni pad dna kanala ( $I$ ), odabranu hrapavost ( $n$ ). Potrebno je izračunati optimalnu brzinu vode u kanalu da ne bi došlo do zastoja u kanalima. Brzina vode se izračunava Manningovom formulom:

$$V = 1/n \times R^{2/3} \times I^{1/2}$$

- V = Brzina toka vode u kanalu (m/s)
- n = Manningov koeficijent hrapavosti
- R = Hidraulički radijus kanala (m)
- I = Uzdužni pad dna kanala (m/m)

Također potrebno je optimizirati dubinu vode u kanalima prema izračunatim protocima. Dubina se računa prema sljedećim formulama:

$$Q = V \times F$$

$$F = h \times (b + m \times h)$$

$$O = b + 2h \times \sqrt{1 + m^2}$$

$$R = F/O$$

Q = Protok (m<sup>3</sup>/s)

V = Brzina toka vode u kanalu (m/s)

R = Hidraulički radijus kanala (m)

F = Površina poprečnog presjeka od dna kanala do vodnog lica (m<sup>2</sup>)

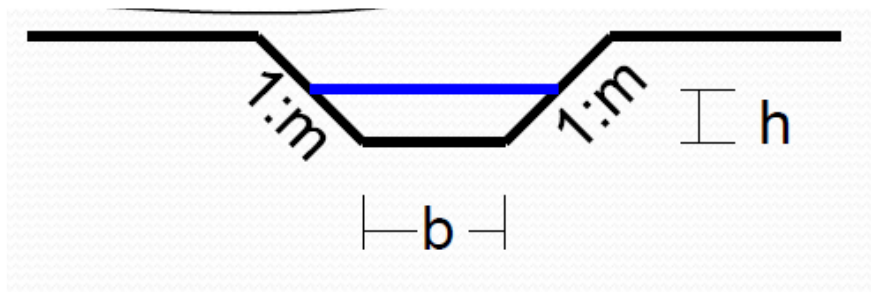
O = Opseg trapeza koji predstavlja visinu vode u kanalu (m)

h = Visina vode u kanalu od dna kanala do vodnog lica (m)

m = Nagib pokosa kanala

b = Širina dna kanala

Poprečni presjek kanala je trapeznog oblika stoga su i formule za izračun površine i opsega formule za trapez. Optimalizacijom hidrološkog proračuna dobivamo situaciju kanala na terenu na kojoj u kanalima 3. i 4. reda nema uspora toka vode te se voda pravovremeno evakuira sa melioracijskog područja. Na slici 4.3 su prikazani elementi, plava linija označava vodno lice.

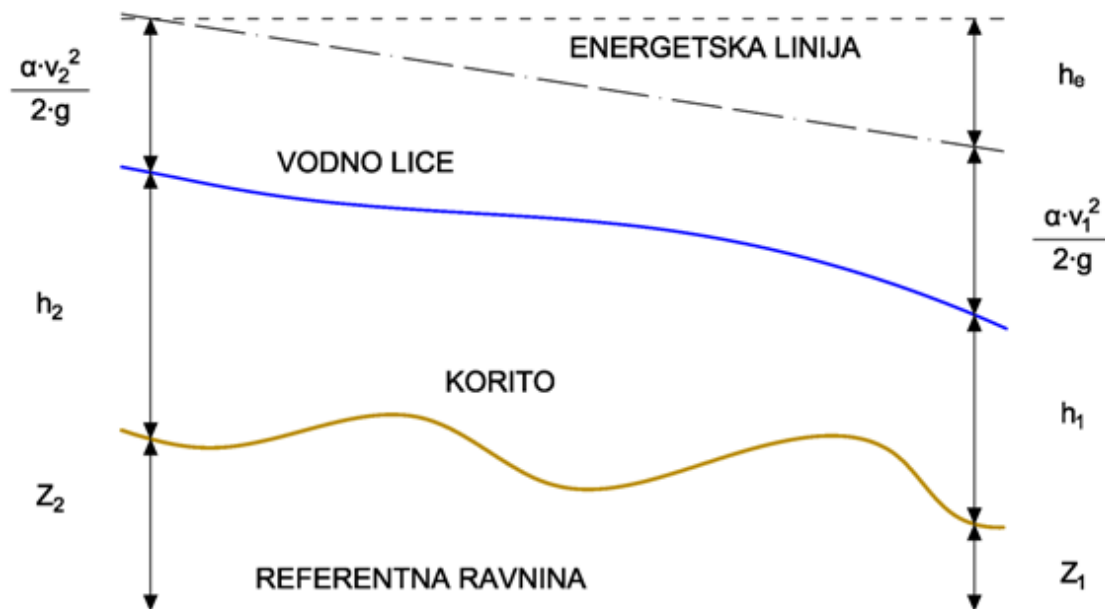


Slika 4.3 Poprečni presjek kanala sa prikazom elemenata

Hidraulički proračun kanalske mreže će se izraditi u programu HEC-RAS. HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System) je program izrađen od strane stručnjaka vojske SAD-a za potrebe proračuna tokova na kanalima i rijekama. Program se može preuzeti na web stranici hidrološkog tehničkog centra vojske SAD-a <https://www.hec.usace.army.mil/>. U našem projektu koristit će ga se optimaliziranje padova kanala, dimenzija kanala i dubina dna kanala na ušćima 3., 2., i 1. reda radi smanjivanja troškova izgradnje sustava i povoljnih protoka. Prije početka rada potrebno je kao i kod HEC-HMS-a podesiti postavke računala na vrijeme i zonu kao i u SAD-u te staviti da točka označuje decimalno mjesto. HEC-RAS je integrirani matematički program projektiran za interaktivnu upotrebu u okruženju sa višestrukim zadaćama matematičkog simuliranja. Matematički modeli HEC paketa koriste se za simulaciju tečenja i proračuna razina na

riječnim dionicama, a namijenjeni su za provedbu jednodimenzionalnih (1-D) hidrauličkih proračuna na mreži prirodnih i umjetnih vodotoka. Ovim modelom je moguće ostvariti numeričke pokuse stacionarnog i nestacionarnog strujanja u jednoj dimenziji i jednom vertikalnom homogenom sloju. HEC-RAS se sastoji od četiri jednodimenzionalna modula za: (1) proračun parametara toka za uvjete stacionarnog tečenja, (2) proračun parametara toka za uvjete nestacionarnog tečenja, (3) proračun pronosa nanosa u uvjetima pokretnog korita i (4) analizu kvalitete vode. Sva četiri modula koriste zajedničke podatke o geometriji korita i zajedničke algoritme za provedbu hidrauličkog proračuna.

Za potrebe hidrauličkih proračuna korišten je modul za simulaciju stacionarnog tečenja. Ovaj modul programa HEC-RAS je namijenjen proračunu profila vodostaja u uvjetima stacionarnog postepeno promjenjivog toka. Modul je namijenjen proračunu tečenja u samostalnoj dionici, lutajućem koritu ili riječnoj mreži. Moguće je simulirati tečenje u uvjetima mirnog, burnog i mješovitog režima toka.



Slika 4.4 Jednodimenzionalna shema za stacionarni proračun tečenja.

Osnovni algoritam proračuna temelji se na primjeni zakona održanja kinetičke energije :

$$Z_2 + h_2 + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} = Z_1 + h_1 + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} + h_e$$

gdje su:  $Z_2, Z_1$  = razina dna korita [m],  $h_2, h_1$  = dubina vode [m],  $v_2, v_1$  = srednja profilska brzina [m/s],  $\alpha_2, \alpha_1$  = Coriolisov koeficijent korekcije brzine [/],  $g$  = ubrzanje sile teže [m/s<sup>2</sup>],  $h_e$  = energetski gubici [m].

Energetski gubici su zastupljeni preko linearnih i lokalnih gubitaka, a dani su jednadžbom:

$$h_e = L \cdot \bar{I} + C \cdot \left| \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} \right|$$

gdje su:  $L$  = razmak između sukcesivnih poprečnih profila [m],  $I$  = pad energetske linije [m/m],  $C$  = koeficijent lokalnog gubitka [/].

Pad energetske linije uslijed linijskog tečenja se procjenjuju na temelju Manningove jednačbe:

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$$

gdje su:  $v$  = srednja brzina toka između dva sukcesivna profila [m/s],  $n$  = Manningov koeficijent hrapavosti [ $m^{-1/3}$  s],  $R$  = hidraulički radijus [m].

Kod promjene režima toka, iz mirnog u burni, prelazi se na primjenu zakona održanja količine gibanja. Ovakve situacije se javljaju kod hidrauličkih skokova, mostovskih otvora, propusta i ušća vodotoka:

$$P_2 - P_1 + G_x - F = \rho \cdot Q \cdot \Delta v_x$$

gdje su:  $P$  = sila hidrostatskog tlaka na profilima 1 i 2 [N],  $G_x$  = težina vode unutar kontrolnog profila u smjeru pružanja dna [N],  $F$  = sila uzrokovana trenjem sa dnom [N],  $Q$  = protok [ $m^3/s$ ],  $\rho$  = gustoća vode [ $kg/m^3$ ],  $\Delta v_x$  = promjena brzine između profila 1 i 2 [m/s].

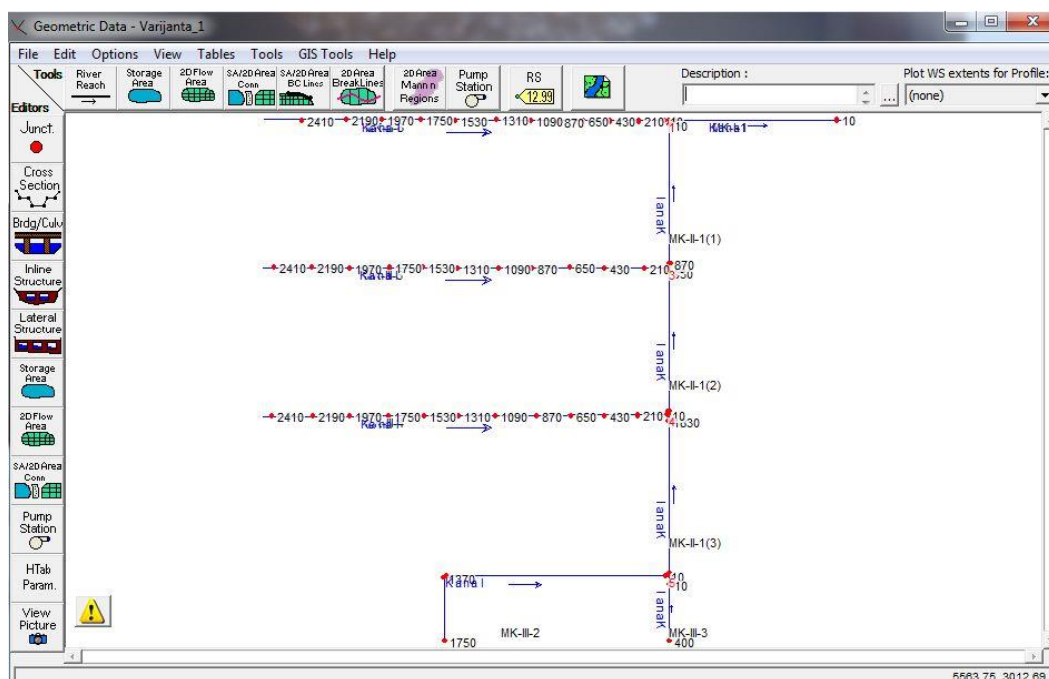
Za početak rada nam treba GIS (Geografski informacijski sustav) topografije melioracijskog područja, iscrtani kanali 3., 2., i 1. reda sa kontrolnim profilima na ušćima kanala 4. reda u kanale 3. reda te na ušćima kanala 3. reda u kanale 2. reda u AutoCAD programu te dubinu kanala 4. reda i dubinu vode u njima kao i duljine, kote dna kanala i padove kanala 3., 2. i 1. reda upisane u Microsoft Excel datoteci prikazano na slici 4.5. GIS terena, AutoCAD crtež i Excel datoteku učitavamo u program WriteSDF koji tada generira geometrijsku datoteku i datoteku sa protocima koje učitava HEC-RAS. Kada te dvije datoteke učitamo u HEC-RAS dobivamo prikaz situacije kanala sa kontrolnim profilima kao i protoke za svaki od tih kontrolnih profila sve do izlaza iz kanala 1. reda. Na slici 3.5 je prikaz tablice u Microsoft Excelu za kanale 3., 2. i 1. reda. U stupcu ispod Manningovog koeficijenta su upisane stacionaže na kojima se nalaze kontrolni profili kanala a desno od stacionaža su upisani pripadajući protoci. Također svaki kanal mora biti upisan na zaseban list.

	A	B	C	D	E
1		MK-II-1			
2		Kota dna kanala na stacionaži 0+000; H [m]	111.50		
3		Širina dna kanala; b [m]	3.00		
4		Pad dna kanala; I [m/m]	0.000050		
5		Nagib pokosa; m [/]	2.50		
6		Manningov koeficijent; n [/]	0.02		
7	2+740	0.58			
8	1+830	0.61			
9	1+760	1.21			
10	0+930	1.23			
11	0+870	1.82			
12	0+010	1.86			
13					
14					
35					

Slika 4.5 Prikaz opisa kanala 3., 2. i 1. reda u Excel datoteci

Kad smo učitali datoteke pokrećemo simulaciju tečenja. Kad simulacija završi dobiju se razine vode u kanalima (uzdužni presijeci kanala i poprečni presjeci na kontrolnim profilima) za zadani protok i nagib kanala. Na prikazima presjeka su također prikazane optimalne visine vode u svakom kanalu tako da podešavano nagibe i kote dna kanala dok ne uspijemo optimizirati čitavu mrežu kanala.

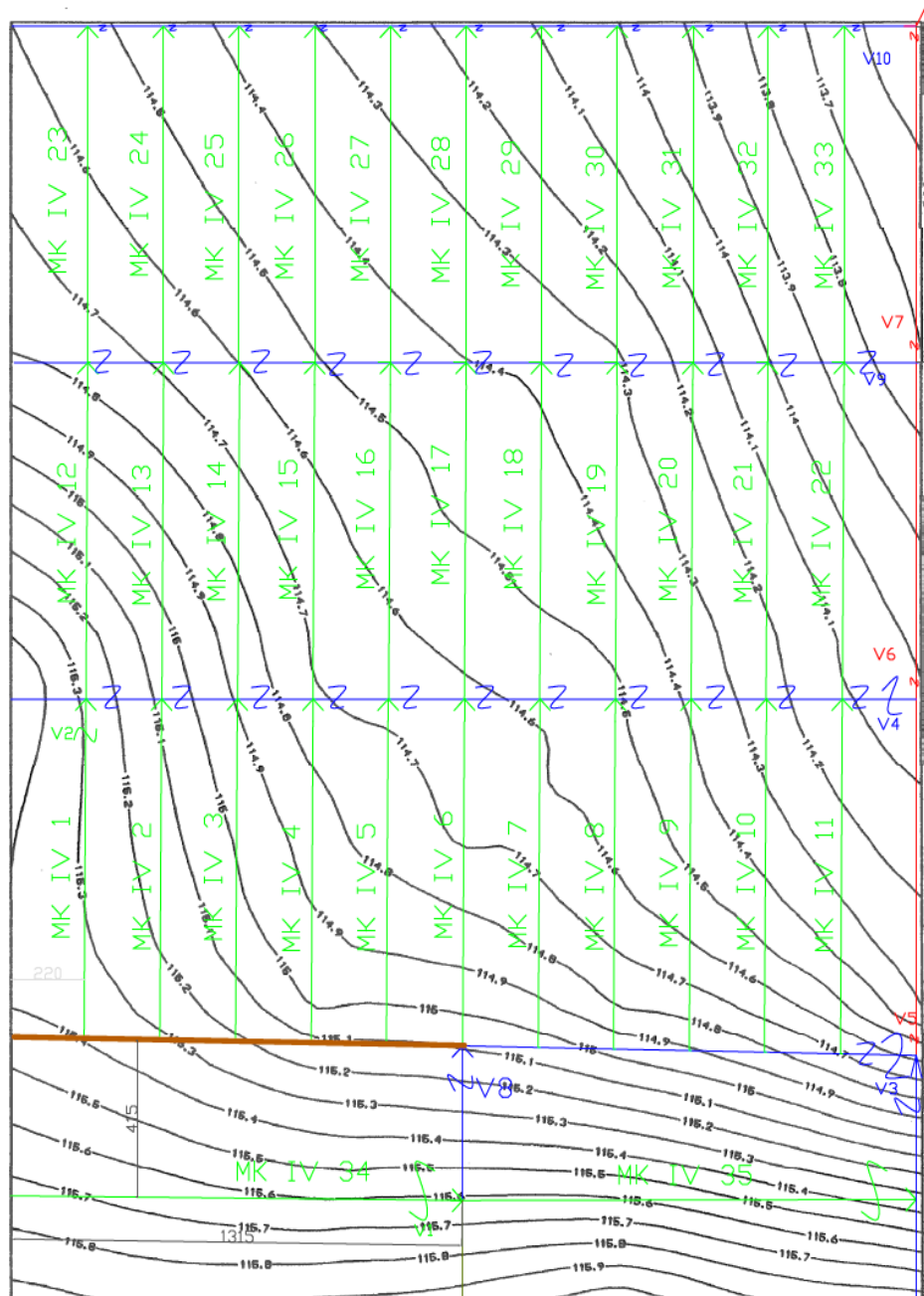
Na slici 4.6 prikazani su kanali 3., 2. i 1. reda u HEC-RAS-u. Strelicama je označen smjer toka vode a crvene točke na kanalima predstavljaju kontrolne profile na ušćima kanala. Kanali 4. reda su u modelu prikazani preko svojih vodostaja a njihova ušća u kanalima 3. reda su prikazana stacionažama kontrolnih profila. Svaki kontrolni profil imenovan je svojom stacionažom na kanalu, broj stacionaže raste od ušća prema izvoru to jest od nizvodnog dijela prema uzvodnom.



Slika 4.6 Prikaz mreže kanala melioracijskog područja u HEC-RAS-u

## 5. Rezultati i rasprava

Izrađen je idejni projekt površinske odvodnje za zadano melioracijsko područje priloženo u mjerilu 1:10000. Cilj hidromelioracijskih zahvata na danoj površini je stvaranje i održavanje povoljnog vodnog režima u tlu u skladu sa zahtjevima optimalnog razvoja biljnih kultura. Na slici 5.1 je prikazana kanalska mreža iscrtana u programu AutoCAD gdje su vidljivi kontrolni profili kanala. Zelenom bojom su označeni melioracijski kanali 4. reda, plavom bojom melioracijski kanali 3. reda, crvenom bojom melioracijski kanali 2. reda sa svojim duljinama



Slika 5.1 Prikaz položene kanalske mreže

Stvarajući kanalsku mrežu sa razmakom kanala od 415 metara na uzvodnom to jest najvišem dijelu terena i razmakom kanala od 220 metara u nizvodnom to jest nižem dijelu terena imamo sveukupno 36 kanala 4. reda, 5 kanala 3. reda te jedan kanal 2. reda podijeljen u 3 dijela. Sa ovakvom kanalskom mrežom dobili smo 4 kazete u višem dijelu područja površine 50.6 ha svaku, a u nižem dijelu područja 36 kazeta gdje svaka kazeta ima površinu od 19.8 ha. Kanali MK IV 34, MK IV 35 i MK IV 36 postavljeni su paralelno sa topografskim slojnicama zbog manjih uzdužnih padova kanala kao što se vidi na slici 5.1 što omogućuje sakupljanje veće količine vode sa kazeta u kraćem vremenu dok su ostali kanali 4. reda koji su na nižem dijelu područja postavljeni okomito na slojnice iz istog razloga. U tablici 5.1 prikazani su ručno izračunati protoci na profilima u mreži kanala.



Tablica 5.1 Tablični hidroloških proračun

Kontrolni profil	Stacionaža	Duljina kanala L (m)				tc (h)	A i-i	q (l/s/ha)	F(i-i) (ha)	Q (l/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)
		S (IV) (m)	S (III) (m)	S (II) (m)	S (I) (m)						
1a-1a	0+414	1315	414	0	20,11	1,91	2,3	101,2	232,76	0,23276	
1b-1b	1+729	1315	1729	0	21,03	1,96	2,24	151,8	340,032	0,34003	
1c-1c	0+414	1315	414	0	20,11	1,91	2,3	50,6	116,38	0,11638	
2a-2a	0+000	1315	2143	0	21,31	1,97	2,27	202,4	465,52	0,46552	
3a-3a	0+000	900	0	0	19,25	1,875	2,34	19,8	46,33	0,04633	
3b-3b	0+220	900	220	0	19,4	1,88	2,33	39,6	92,268	0,09227	
3c-3c	0+440	900	440	0	19,55	1,89	2,32	59,4	137,808	0,13781	
3d-3d	0+660	900	660	0	19,71	1,895	2,27	79,2	179,784	0,17978	
3e-3e	0+880	900	880	0	19,86	1,9	2,31	99	228,69	0,22869	
3f-3f	1+100	900	1100	0	20,01	1,91	2,3	118,8	273,24	0,27324	
3g-3g	1+320	900	1320	0	20,17	1,91	2,3	138,6	318,78	0,31878	
3h-3h	1+540	900	1540	0	20,32	1,92	2,28	158,4	361,152	0,36115	
3i-3i	1+760	900	1760	0	20,47	1,93	2,27	178,2	404,514	0,40451	
3j-3j	1+980	900	1980	0	20,63	1,94	2,26	198	447,48	0,44748	
3k-3k	2+200	900	2200	0	20,78	1,94	2,26	217,8	492,228	0,49223	
2b-2b	0+900	900	4343	900	22,57	2,03	2,16	440	1021,48	1,02148	
4a-4a	0+000	900	0	900	19,25	1,875	2,34	19,8	46,33	0,04633	
4b-4b	0+220	900	220	900	19,4	1,88	2,33	39,6	92,268	0,09227	
4c-4c	0+440	900	440	900	19,55	1,89	2,32	59,4	137,808	0,13781	
4d-4d	0+660	900	660	900	19,71	1,895	2,27	79,2	179,784	0,17978	
4e-4e	0+880	900	880	900	19,86	1,9	2,31	99	228,69	0,22869	
4f-4f	1+100	900	1100	900	20,01	1,91	2,3	118,8	273,24	0,27324	
4g-4g	1+320	900	1320	900	20,17	1,91	2,3	138,6	318,78	0,31878	
4h-4h	1+540	900	1540	900	20,32	1,92	2,28	158,4	361,152	0,36115	
4i-4i	1+760	900	1760	900	20,47	1,93	2,27	178,2	404,514	0,40451	
4j-4j	1+980	900	1980	900	20,63	1,94	2,26	198	447,48	0,44748	
4k-4k	2+200	900	2200	900	20,78	1,94	2,26	217,8	492,228	0,49223	
2c-2c	1+800	900	6543	1800	24,42	2,11	2,1	697,4	1419,07	1,4197	
5a-5a	0+000	900	0	1800	19,25	1,875	2,34	19,8	46,33	0,04633	
5b-5b	0+220	900	220	1800	19,4	1,88	2,33	39,6	92,268	0,09227	
5c-5c	0+440	900	440	1800	19,55	1,89	2,32	59,4	137,808	0,13781	
5d-5d	0+660	900	660	1800	19,71	1,895	2,27	79,2	179,784	0,17978	
5e-5e	0+880	900	880	1800	19,86	1,9	2,31	99	228,69	0,22869	
5f-5f	1+100	900	1100	1800	20,01	1,91	2,3	118,8	273,24	0,27324	
5g-5g	1+320	900	1320	1800	20,17	1,91	2,3	138,6	318,78	0,31878	
5h-5h	1+540	900	1540	1800	20,32	1,92	2,28	158,4	361,152	0,36115	
5i-5i	1+760	900	1760	1800	20,47	1,93	2,27	178,2	404,514	0,40451	
5j-5j	1+980	900	1980	1800	20,63	1,94	2,26	198	447,48	0,44748	
5k-5k	2+200	900	2200	1800	20,78	1,94	2,26	217,8	492,228	0,49223	
6a-6a	0+000	900	8753	2700	26,27	2,19	2	915,2	2081,26	2,08126	

U nastavku će biti prikazani izračuni protoka u HEC-HMS programu na karakterističnim profilima melioracijskih kanala 4. reda, 3. reda, 2. reda i 1. reda sa grafovima.

Tablica 5.2 Usporedbe izračuna protoka na karakterističnim presjecima

Presjek	Ručni izračun (m <sup>3</sup> /s)	Izračun u HEC-HMS-u (m <sup>3</sup> /s)
V1	0,11638	0,14019
V2	0,04633	0,05493

V3	0,34003	0,4178
V4, V9, V10	0,49223	0,5985
V7	1,419	1,902
MK I	2,081	2,494

U tablici 5.2 je prikaz vršnog protoka na karakterističnom profilu za melioracijski kanal 4. reda višeg dijela melioracijskog područja na slici 5.1 prikazan kao presjek V1. Melioracijska površina svakog kanala iznosi 50.6 ha. Najveći to jest vršni protok je 8. veljače u 5:00 i iznosi 0.14 m<sup>3</sup>/s. Ručnim izračunom smo dobili da je vršni protok za kanale 4. reda na tom području 0.11638 m<sup>3</sup>/s što čini razliku od 0.02362 m<sup>3</sup>/s ili 23.62 l/s po kanalu 4. reda.

U tablici 5.2 je prikaz vršnog protoka na karakterističnom profilu za melioracijski kanal 4. reda nižeg dijela melioracijskog područja na slici 5.1 prikazan kao presjek V2. Melioracijska površina svakog kanala iznosi 19.8 ha. Najveći to jest vršni protok je 8. veljače u 5:00 i iznosi 0.055 m<sup>3</sup>/s. Ručnim izračunom smo dobili da je vršni protok za kanale 4. reda na tom području 0.04633 m<sup>3</sup>/s što čini razliku od 0.00867 m<sup>3</sup>/s ili 8.67 l/s po kanalu 4. reda.

Iz dobivenih rezultata je vidljivo da je izračun protoka za kanale 4. reda u HEC-HMS-u veći za 20.7% od ručnog izračuna u višem dijelu područja te veći za 18.7% od ručnog izračuna u nižem dijelu područja, u prosijeku je izračun HEC-HMS-a veći za 19.7%.

U tablici 5.2 je prikaz vršnog protoka na profilu za melioracijski kanal 3. reda višeg dijela melioracijskog područja na slici 5.1 prikazan kao presjek V3. Melioracijska površina ovog kanala iznosi 151.8 ha. Najveći to jest vršni protok je 8. veljače u 5:00 i iznosi 0.418 m<sup>3</sup>/s. Ručnim izračunom smo dobili da je vršni protok za taj kanal 3. reda 0.34003 m<sup>3</sup>/s što čini razliku od 0.10797 m<sup>3</sup>/s ili 107 l/s po tom kanalu 3. reda.

U tablici 5.1 je prikaz vršnog protoka na karakterističnom profilu za melioracijske kanale 3. reda nižeg dijela melioracijskog područja na slici 5.1 prikazani kao presjeci V4, V9 i V10. Melioracijska površina svakog kanala iznosi 237.6 ha. Najveći to jest vršni protok je 8. veljače u 5:00 i iznosi 0.6 m<sup>3</sup>/s. Ručnim izračunom smo dobili da je vršni protok za kanale 3. reda na tom području 0,49223 m<sup>3</sup>/s što čini razliku od 0.10777 m<sup>3</sup>/s ili 107.77 l/s po kanalu 3. reda.

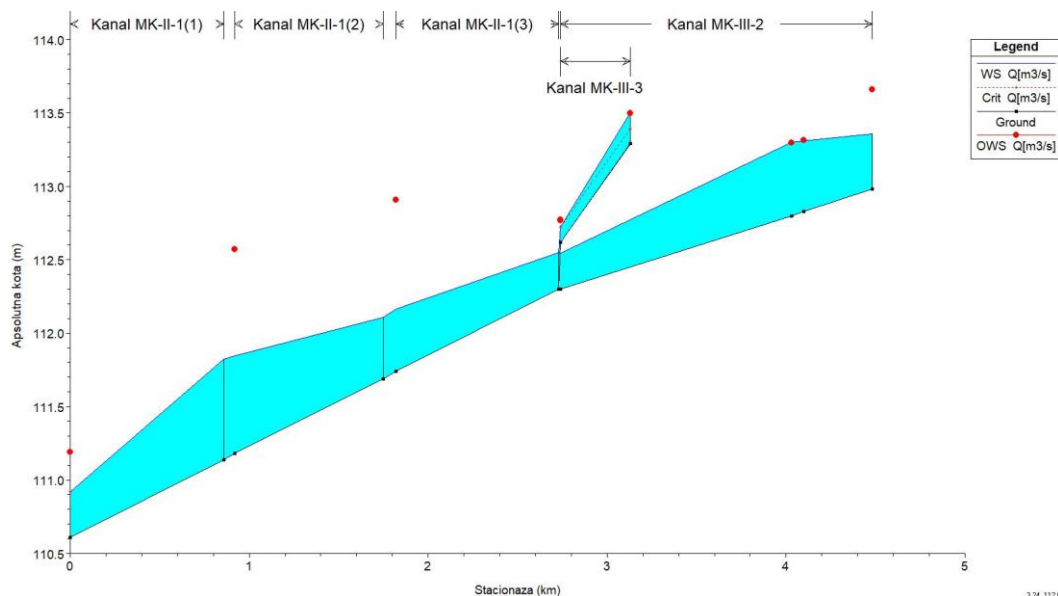
Iz dobivenih rezultata je vidljivo da je izračun protoka za kanal 3. reda u višem dijelu područja u HEC-HMS-u veći za 31,75% od ručnog izračuna te veći za 21.8% od ručnog izračuna za kanale 3. reda u nižem dijelu područja, u prosijeku je izračun HEC-HMS-a veći za 26.78%.

U tablici 5.2 je prikaz vršnog protoka na profilu za melioracijski kanal 2. reda na slici 5.1 prikazan kao presjek V7 i obojan crvenom bojom. Melioracijska površina ovog kanala iznosi 638 ha. Najveći to jest vršni protok je 8. veljače u 5:00 i iznosi 1.9 m<sup>3</sup>/s. Ručnim izračunom smo dobili da je vršni protok za taj kanal 2. reda 1,46603 m<sup>3</sup>/s što čini razliku od 0.43397 m<sup>3</sup>/s ili 433.97 l/s po tom kanalu 2. reda. Iz usporedbe rezultata vidljivo je da je u HEC-HMS-u proračun vršnog protoka 29,6% veći od ručnog proračuna.

U tablici 5.1 je prikaz vršnog protoka na profilu za melioracijski kanal 1. reda na slici 5.1 prikazan kao strelica koja izlazi sa melioracijskog područja i obojan crvenom bojom. Melioracijska površina ovog kanala iznosi 915,7 ha. Najveći to jest vršni je protok 8. veljače u

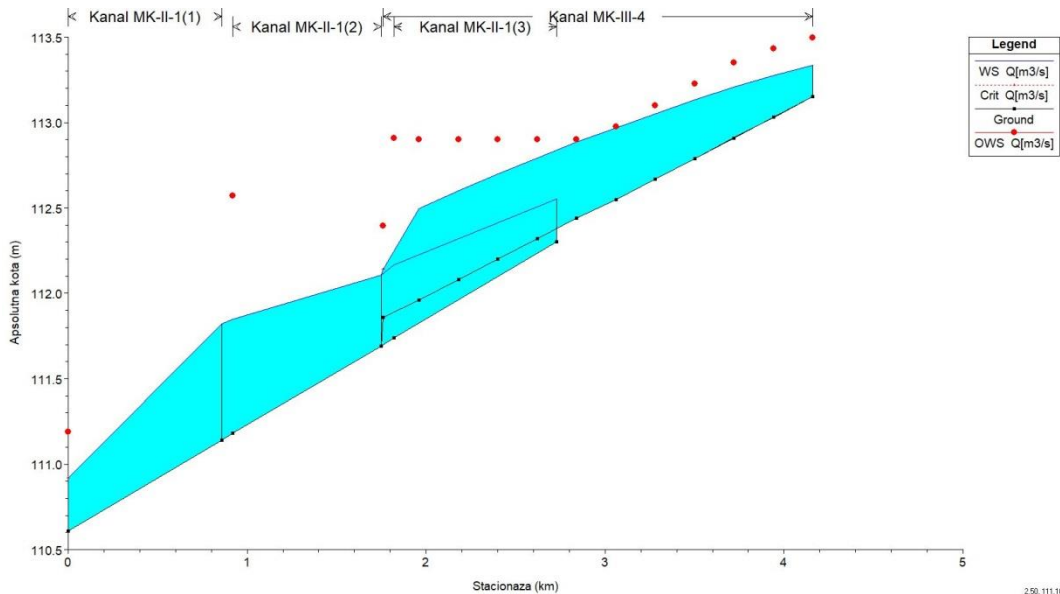
5:00 i iznosi  $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ručnim izračunom smo dobili da je vršni protok za taj kanal 2. reda  $2,08126 \text{ m}^3/\text{s}$  što čini razliku od  $0.41874 \text{ m}^3/\text{s}$  ili  $418,74 \text{ l/s}$  po tom kanalu 1. reda. Iz usporedbe rezultata vidljivo je da je u HEC-HMS-u proračun vršnog protoka  $20,12\%$  veći od ručnog proračuna.

Iz ovih usporedbi može se očitati da se hidrološki proračun otjecanja u HEC-HMS-u može uvelike razlikovati od ručnog proračuna. Ovim programom smo simulirali otjecanje vode sa melioracijskog područja u zadanom vremenu sa vrlo visokom preciznosti te će poslužiti za optimiziranje kanalske mreže i veličine kanala u HEC-RAS programu. Također vidimo da je ručni proračun pojednostavljena metoda jer HEC-HMS uzima mnoge druge parametre u obzir prilikom izračuna no bitno je da se početni podaci unesu točno.



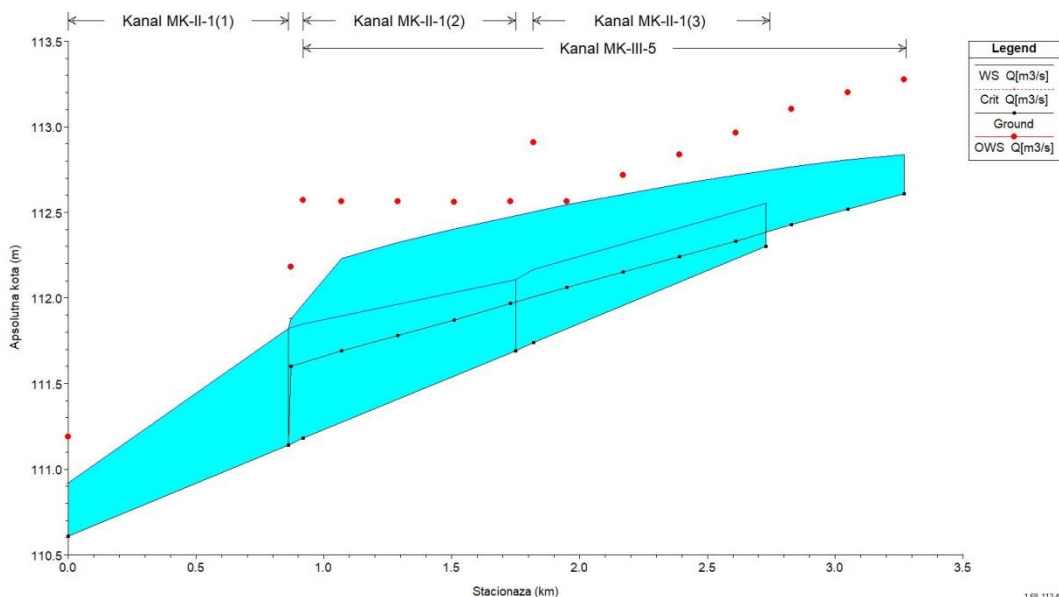
Slika 5.2 Prikaz uzdužnih presjeka kanala MK-III-3 i MK-III-2 sa kotama dna kanala i ušćima u kanal 2. reda

Na slici 5.2 je optimizirani prikaz uzdužnih profila kanala MK III 3 i MK III 2 na slici 5.1 su to kanali 3. reda sa presjekom V3 koji su na višem dijelu područja. Na slici se vide kote dna tih kanala kao i mjesta gdje se ti kanali ulijevaju u kanal 2. reda i njihove duljine. Iz priloženog možemo očitati optimalne dubine kanala i njihove padove. Početna dubina kanala MK III 3 iznosi  $1.21 \text{ m}$  a dubina na ušću u kanal 2. reda  $1.6 \text{ m}$  čime smo dobili da je optimalan pad dna kanala  $0.001614457 \text{ m/m}$  ili  $1.61 \text{ ‰}$  a visina vode na ušću u kanal 2. reda  $10.5 \text{ cm}$ . Početna dubina kanala MK III 2 iznosi  $1.68 \text{ m}$  a dubina na ušću kanala iznosi  $1.9 \text{ m}$  čime smo dobili da je optimalan pad dna kanala  $0.0003863636 \text{ m/m}$  ili  $0.386 \text{ ‰}$  a visina vode na ušću u kanal 2. reda  $24 \text{ cm}$ .



Slika 5.3 Prikaz uzdužnog presjeka kanala MK-III-4 sa prikazom kote dna kanala u mjestu ušća u kanal 2. reda

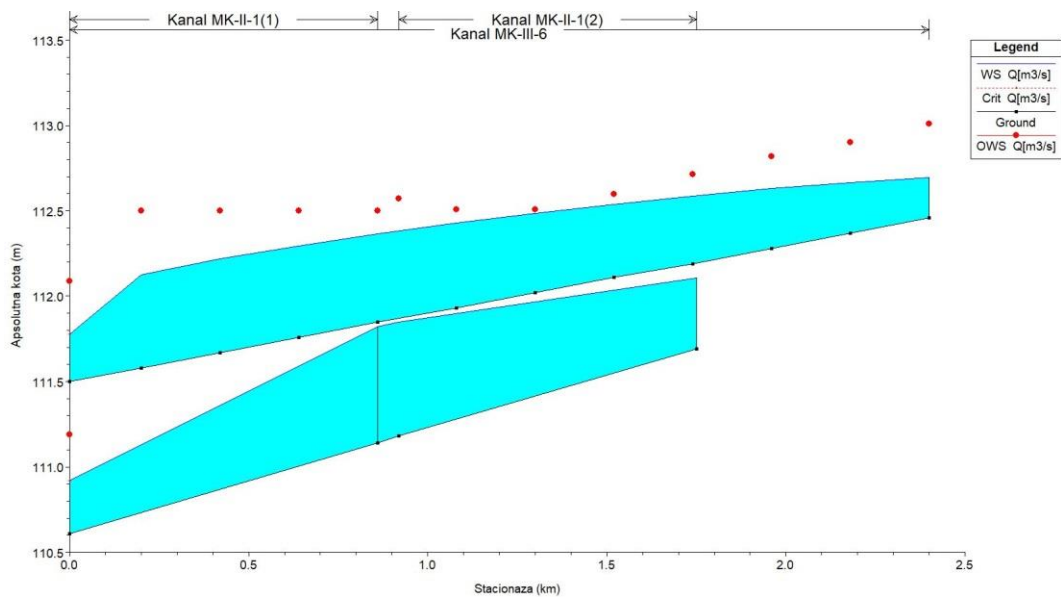
Na slici 5.3 je optimizirani prikaz uzdužnog profila kanala MK III 4 na slici 5.1 je to kanal 3. reda sa presjekom V4 koji je na nižem dijelu područja. Na slici se vidi kота dna tog kanala kao i mjesto gdje se taj kanal ulijeva u kanal 2. reda i njegova duljina. Iz priloženog možemo očitati optimalne dubine kanala i njihove padove. Početna dubina kanala MK III 4 iznosi 1.35 m a dubina na ušću u kanal 2. reda 2.04 m čime smo dobili da je optimalan pad dna kanala 0.00048863636 m/m ili 0.489 ‰ a visina vode na ušću u kanal 2. reda 30 cm.



Slika 5.4 Prikaz uzdužnog presjeka kanala MK-III-5 sa prikazom kote dna kanala u mjestu ušća u kanal 2. reda

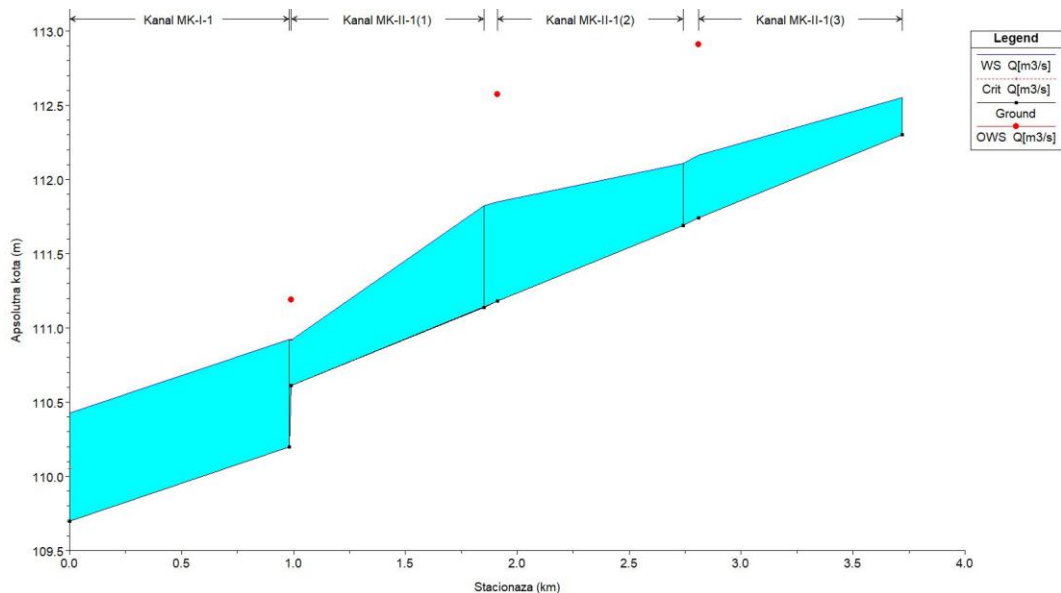
Na slici 5.4 je optimizirani prikaz uzdužnog profila kanala MK III 5 na slici 5.1 je to kanal 3. reda sa presjekom V9 koji je na nižem dijelu područja. Na slici se vidi kота dna tog kanala kao i mjesto gdje se taj kanal ulijeva u kanal 2. reda i njegova duljina. Iz priloženog možemo očitati optimalne dubine kanala i njihove padove. Početna dubina kanala MK III 5 iznosi 1.67

m a dubina na ušću u kanal 2. reda 1.96 m čime smo dobili da je optimalan pad dna kanala 0.00038257575 m/m ili 0.383 ‰ a visina vode na ušću u kanal 2. reda 28 cm.



Slika 5.5 Prikaz uzdužnog presjeka kanala MK-III-6 sa prikazom kote dna kanala u mjestu ušća u kanal 2. reda

Na slici 5.5 je optimizirani prikaz uzdužnog profila kanala MK III 6 na slici 5.1 je to kanal 3. reda sa presjekom V10 koji je na nižem dijelu područja. Na slici se vidi kota dna tog kanala kao i mjesto gdje se taj kanal ulijeva u kanal 2. reda i njegova duljina. Iz priloženog možemo očitati optimalne dubine kanala i njihove padove. Početna dubina kanala MK III 6 iznosi 1.55 m a dubina na ušću u kanal 2. reda 2 m čime smo dobili da je optimalan pad dna kanala 0.00036363636 m/m ili 0.36 ‰ a visina vode na ušću u kanal 2. reda 28 cm.



Slika 5.6 Prikaz uzdužnog presjeka kanala MK-II-1 i kanala MK-I-1 sa prikazom kote dna kanala i ušća u kanal 1. reda

Na slici 5.6 je optimizirani prikaz uzdužnog profila kanala MK II 1 na slici 5.1 je to kanal 2. reda sa presjecima V5, V6 i V7 koji je na nižem dijelu područja. Ovaj kanal je također podijeljen na tri manja dijela na slici uzdužnog presjeka. Kanal MK-II-(3) počinje nakon ušća kanala MK-III-3 i MK-III-2, kanal MK-II-(2) nakon ušća kanala MK-III-4 a kanal MK-II-(1) počinje nakon ušća kanala MK-III-5. Na slici se vidi kota dna tog kanala kao i mjesto gdje se taj kanal ulijeva u kanal 1. reda i njegova duljina. Iz priloženog možemo očitati optimalne dubine kanala MK-II-1 i MK-I-1 i njihove padove. Početna dubina kanala MK II 1 iznosi 1.89 m a dubina na ušću u kanal 1. reda 2.89 m čime smo dobili da je optimalan pad dna kanala 0.00062592529 m/m ili 0.626 ‰ a visina vode na ušću u kanal 1. reda 27 cm. Početna dubina kanala MK-I-1 iznosi 2.80 m a dubina na ulazu u crpnu stanicu iznosi 3.8 m čime smo dobili da je optimalan pad dna kanala 0.0005 m/m ili 0.5 ‰ a visina vode na ulazu u crpnu stanicu iznosi 76 cm.

U tablici 5.3 prikazani su prosječni izlazni podaci izračuna za svaki kanal u HEC-RAS-u dok su u tablici 5.4 prikazani podaci izračunati u HEC-RAS-u za svaki kontrolni profil na pojedinom kanalu. Iz tablica se vidi da su zahtjevi ispunjeni što znači da nema zastoja u kanalima.

Tablica 5.3 Prikaz prosječnih podataka za svaki kanal

Kanal	Prosječna brzina vode (m/s)	Prosječna visina vode (m)	Prosječna dubina kanala (m)
MK-III-2	0.243	0.313	1.553
MK-III-3	0.41	0.17	1.21
MK-III-4	0.43	0.31	1.69
MK-III-5	0.39	0.33	1.84
MK-III-6	0.38	0.34	1.79
MK-II-1	0.59	0.37	2.21
MK-I-1	0.75	0.59	3.5

Tablica 5.4 Prikazi brzine toka vode, visine vode u kanalu, dubine kanala i protoka za svaki kontrolni profil

Kontrolni profil	Brzina vode na profilu (m/s)	Visina vode (m)	Dubina kanala (m)	Protok (m <sup>3</sup> /s)
MK-III-2 1750	0.19	0.27	1.68	0.14
MK-III-2 1370	0.27	0.33	1.48	0.28
MK-III-2 1300	0.27	0.34	1.5	0.3
MK-III-2 10	1.09	0.19	1.9	0.45
MK-III-3 400	0.41	0.17	1.21	0.14
MK-III-3 10	0.94	0.09	1.6	0.14
MK-III-4 2410	0.21	0.15	1.35	0.06
MK-III-4 2190	0.26	0.19	1.4	0.11
MK-III-4 1970	0.32	0.22	1.44	0.17
MK-III-4 1750	0.36	0.25	1.44	0.23
MK-III-4 1530	0.39	0.28	1.43	0.29
MK-III-4 1310	0.41	0.3	1.43	0.35
MK-III-4 1090	0.44	0.31	1.46	0.41
MK-III-4 870	0.46	0.33	1.58	0.47
MK-III-4 650	0.48	0.34	1.7	0.53
MK-III-4 430	0.51	0.36	1.82	0.59

MK-III-4 210	0.53	0.37	1.94	0.65
MK-III-4 10	1.45	0.21	2.04	0.71
MK-III-5 2410	0.16	0.18	1.67	0.06
MK-III-5 2190	0.22	0.22	1.68	0.11
MK-III-5 1970	0.27	0.25	1.67	0.17
MK-III-5 1750	0.3	0.28	1.63	0.23
MK-III-5 1530	0.33	0.3	1.6	0.29
MK-III-5 1310	0.36	0.32	1.57	0.35
MK-III-5 1090	0.39	0.33	1.5	0.41
MK-III-5 870	0.42	0.35	1.59	0.47
MK-III-5 650	0.44	0.36	1.69	0.53
MK-III-5 430	0.47	0.37	1.88	0.59
MK-III-5 210	0.53	0.37	1.87	0.65
MK-III-5 10	1.45	0.21	1.96	0.71
MK-III-6 2410	0.15	0.18	1.56	0.06
MK-III-6 2190	0.21	0.22	1.53	0.11
MK-III-6 1970	0.26	0.26	1.54	0.17
MK-III-6 1750	0.29	0.28	1.52	0.23
MK-III-6 1530	0.33	0.3	1.49	0.29
MK-III-6 1310	0.35	0.32	1.49	0.35
MK-III-6 1090	0.38	0.34	1.58	0.41
MK-III-6 870	0.41	0.35	1.65	0.47
MK-III-6 650	0.44	0.36	1.74	0.53
MK-III-6 430	0.47	0.37	1.83	0.59
MK-III-6 210	0.52	0.37	1.92	0.65
MK-III-6 10	1.45	0.28	2	0.71
MK-II-1 2740	0.35	0.21	1.89	0.58
MK-II-1 10	1.6	0.26	2.89	1.86
MK-I-1 990	0.75	0.59	3.3	2.5
MK-I-1 10	0.75	0.76	3.8	2.5

Proračunima u HEC-HMS-u i HEC-RAS-u optimizirana je mrežu kanala na melioracijskom području. Proračun otjecanja sa čitavog područja je veći za 20.12 % u HEC-HMS-u od ručnog izračuna što ukazuje na preciznost i kompleksnost kojim se služe programski paketi u odnosu na ručni proračun. Također hidrološkim proračunom toka vode u kanalima preciznije su pozicionirane kote dubina tih kanala, dimenzije kanala kao i njihovi padovi budući da program HEC-RAS ima učitane topografiju terena (GIS). Ručno iscrtavanje uzdužnih presjeka kanala kao i iscrtavanje kontrolnih profila i dimenzija je puno mukotrpnije i nepreciznije jer je vrlo teško uzeti svu topografiju terena u obzir što programom HEC-RAS nije problem. Nakon što se učita geometrija kanala, zadani protoci i topografija terena i pokrene simulacija program sam pokazuje na kojim kotama bi trebalo biti dno kanala isto kao i vodno lice u kanalu da se ne bi pojavio uspor toka vode u kanalima, zatim u Excel tablici kanala se korigiraju padovi kanala i kote dna kanala dok se ne zadovolje optimalne kote izračunate u programu. Rezultati protoka su pouzdani na svim kontrolnim profilima u kanalskoj mreži osim na ušćima kanala pošto na tim dijelovima je potrebno izgraditi hidrotehničke stepenice što predstavlja posebni proračun koji nije obuhvaćen programom HEC-RAS.

## 6. Zaključak

U ovom radu dimenzioniran je sustav kanalske mreže površinske odvodnje na način da je određen optimalni nagibom i poprečni presjek geometrije svakog pojedinog kanala u mreži. Proračun je proveden ručno i uz pomoć računalnih programa. Utvrđeno je da se računalni programi za simulaciju otjecanja (HEC-HMS) i tečenja (HEC-RAS) koji se primarno koriste za velike sustave, mogu uspješno primijeniti i za proračun otjecanja s manjih poljoprivrednih površina. U radu su prikazani detaljni rezultati za sve kontrolne profile smještene na ušćima svakog pojedinog kanala u mreži. Utvrđeno je da postoje manje razlike u ručnom i računalnom proračunu te je zaključak da je svakako prikladnije prilikom dimenzioniranja koristiti matematičke modele jer nam daju više informacija o tečenju/otjecanju koje se koriste za dimenzioniranje kanala.



## 7. Popis literature

1. Brunner, G. J. (2016). HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 5.0. US Army Corps of Engineers, Davis, USA.
2. Husnjak, S., (2007). Poljoprivredna tla Hrvatske i potreba za melioracijskim mjerama. Agronomski fakultet sveučilišta u Zagrebu, Zagreb
3. Mustać I. (2019). Procjena pogodnosti s mjerama uređenja dreniranog poljoprivrednog zemljišta za primjenu navodnjavanja u Republici Hrvatskoj. Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Zagreb
4. Ondrašek G., Petošić D., Tomić F., Mustać I., Filipović V., Petek M., Lazarević B., Bubalo M. (2015). Voda u agroekosustavima. Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb
5. Petošić D. (1993). Funkcionalnost sustava detaljne odvodnje u Posavini. Disertacija, Agronomski fakultet, Zagreb
6. Petošić D., Tomić F. (2011). Reguliranje suvišnih voda. Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Zagreb
7. Scharffenberg, W. (2016). Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual Version 4.2. US Army Corps of Engineers, Davis, USA.
8. Šimunić I. (2013). Uređenje voda. Hrvatska sveučilišna naklada (sveučilišni udžbenik), Zagreb
9. Tomić F, Petošić D. (1989). Dosadašnja iskustva i potrebe detaljnog uređenja zemljišta u Posavini. In Proc Savjetovanja JAZU (Rijeka Sava, zaštita i korištenje voda), str. 121-132
10. Tomić F. (1987). Sistemi detaljne odvodnje za reguliranje suvišnih voda. Priručnik za hidrotehničke melioracije, I. kolo, knjiga 4, str. 169-223, Zagreb
11. Tomić F. (1988). Navodnjavanje, Savez poljoprivrednih inženjera i tehničara Hrvatske, Fakultet poljoprivrednih znanosti, Zagreb
12. Vidaček Ž. (1998). Gospodarenje melioracijskim sustavima odvodnje i natapanja. Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet i Hrvatsko društvo za odvodnju i navodnjavanje, Zagreb
13. Vranješ L. (2014). Stanje i potencijali odvodnje poljoprivrednih površina u Republici Hrvatskoj- završni rad. Sveučilište u Osijeku "J.J. Strossmayera" Poljoprivredni fakultet, Osijek

## 8. Životopis

Josip Dobrenić rođen je 18.9.1995. godine u Sisku, Republika Hrvatska. Završio je srednju Drvodjeljsku školu u Zagrebu koju je pohađao od 2010-2014. godine te stekao zvanje šumarskog tehničara. Potom je 2014. godine upisao Agronomski fakultet u Zagrebu preddiplomski studij Poljoprivredna tehnika gdje je 2017 stekao zvanje Sveučilišnog prvostupnika inženjera poljoprivredne tehnike (Univ.bacc.ing.agr). 2017. godine upisao je Diplomski studij Poljoprivredne tehnike-melioracija. Vrlo dobro koristi Engleski jezik koji je učio u osnovnoj školi te dobro koristi Njemački koji je učio u osnovnoj i srednjoj školi.