

# Unapređenje održivosti urbanih područja kroz optimizaciju kišnih vrtova s primjenom GIFmod računalnog programa

---

**Gregorović, Leo**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:749662>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#) / [Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-26**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Leo Gregorović**

**Unapređenje održivosti urbanih područja kroz optimizaciju kišnih  
vrtova primjenom GIFMod računalnog programa**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij  
Hidrotehnika  
Urbani vodni sustavi**

**Leo Gregorović  
JMBAG: 0114030747**

**Unapređenje održivosti urbanih područja kroz optimizaciju kišnih  
vrtova primjenom GIFMod računalnog programa**

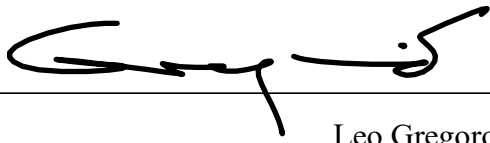
**Diplomski rad**

**Rijeka, rujan 2023.**



## IZJAVA

Završni/Diplomski rad izradio/izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom/mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.



---

Leo Gregorović

U Rijeci, 10.9.2023.



## Sažetak

Tema ovog rada jest modeliranje kišnih vrtova različitih propusnosti i provođenje analiza osjetljivosti u svrhu dobivanja znanja o rješavanju problematike **urbanizacije** i funkcioniranju **održivih sustava odvodnje** oborinskih voda te stručnosti o **optimalnom dimenzioniranju**. To je bilo provedeno hidrauličkim modeliranjem u **SWMM** i **GIFMod** računalnim programima. Zaključeno je da se **propusnost** ne može poistovjetiti samo sa njenom **hidrauličkom provodljivošću** te su izložena razna osmatranja dobivena pri dimenzioniranju kišnih vrtova. U radu su predložena potencijalna daljna ispitivanja parametara i modeliranja kišnih vrtova vezana uz parametre propusnosti tla.

Ključne riječi: **urbanizacija, održivi sustavi odvodnje, optimalno dimenzioniranje, SWMM računalni program, GIFMod računalni program, propusnost, hidraulička provodljivost.**

## Abstract

The topic of this paper is modeling of rain gardens of different permeability and carrying out a sensitivity analysis in order to gain knowledge about solving the problem of urbanization and functioning of a sustainable stormwater drainage system, as well as to gain expertise about optimal dimensioning. This was done by hydraulic modeling in SWMM and GIFMod computer programs. It was concluded that permeability cannot be equated only with its hydraulic conductivity, and various observations obtained during the dimensioning of rain gardens were presented. Potential further analysis of parameters and modeling of rain gardens related to soil permeability parameters are proposed in the paper.

Keywords: **urbanization, sustainable drainage systems, optimal sizing, SWMM computer program, GIFMod computer program, permeability, hydraulic conductivity.**





## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. SUSTAVI ODVODNJE OBORINSKIH VODA .....	3
2.1. Utjecaj urbanizacije na otjecanje .....	3
2.2. Klasični sustavi odvodnje oborinskih voda .....	4
2.3. Održivi sustavi odvodnje oborinskih voda .....	6
2.4. Metode održivih sustava odvodnje .....	7
2.4.1. Kontrola toka.....	8
2.4.2. Retencioniranje.....	8
2.4.3. Akumuliranje.....	8
2.4.4. Filtracija .....	8
2.4.5. Infiltracija .....	9
2.4.6. Evapotranspiracija.....	9
2.4.7. Ispust .....	9
3. PRIRODNA RJEŠENJA ZA ODVODNJU OBORINSKIH VODA .....	10
3.1. Planiranje i dimenzioniranje kišnih vrtova .....	14
4. METODOLOGIJA .....	16
4.1. Korišteni računalni programi .....	18
4.1.1. QGIS.....	18
4.1.2. Microsoft Excel .....	18
4.1.3. EPA SWMM .....	18
4.1.4. GIFMod.....	19
4.2. Hidraulički proračun otjecanja oborinskih voda – SWMM.....	21



4.3.	Hidraulički proračun kišnog vrta – GIFMod .....	26
5.	KRITERIJI ZA DIMENZIONIRANJE KIŠNIH VRTOVA .....	34
6.	MODELIRANJE KIŠNIH VRTOVA .....	36
6.1.	Karakteristike područja .....	36
6.2.	Klimatološke karakteristike Poreča i dostupne meterološke podloge .....	38
6.3.	Hidraulički model otjecanja .....	43
6.4.	Hidraulički proračun kišnog vrta .....	46
7.	DIMENZIONIRANJE KIŠNIH VRTOVA .....	48
8.	REZULTATI.....	50
8.1.	Model 1 – prikaz rezultata .....	50
8.1.1.	Analize osjetljivosti.....	56
8.1.2.	Pregled analiza osjetljivosti.....	57
8.2.	Model 2 – prikaz rezultata .....	58
8.3.	Model 3 – prikaz rezultata .....	64
8.4.	Model 4 – prikaz rezultata .....	70
8.5.	Model 5 – prikaz rezultata .....	76
8.6.	Model 6 – prikaz rezultata .....	82
8.7.	Model 7 – prikaz rezultata .....	88
9.	DISKUSIJA REZULTATA.....	95
10.	ZAKLJUČAK.....	101
	Literatura.....	103



## Popis tablica

Tablica 1: Vladajuće jednadžbe između blokova u GIFModu .....	28
Tablica 2: Količine oborina za pripadajuće povratne periode i trajanje pljuska.....	40
Tablica 3: Količine oborina za različita trajanja pljuska povratnog perioda 1 godine .....	41
Tablica 4: Vremenska serija kiše trajanja 60 min povratnog perioda 1 godine.....	43
Tablica 5: Karakteristike slivne površine .....	43
Tablica 6: Parametri slivnih površina .....	44
Tablica 7: Geometrija i parametri propusnosti dimenzioniranih kišnih vrtova .....	48
Tablica 8: Analize razina vode i vršnih protoka projektnih pljuskova Modela 1 .....	50
Tablica 9: Parametri analiza osjetljivosti i pripadajući brojevi eksperimenata .....	56
Tablica 10: Analiza osjetljivosti za eksperimente 1. – 8. ....	57
Tablica 11: Analiza osjetljivosti za eksperimente 9. – 16. ....	57
Tablica 12: Analize razina vode i vršnih protoka projektnih pljuskova Modela 2 .....	58
Tablica 13: Analize razina vode i vršnih protoka projektnih pljuskova Modela 3 .....	64
Tablica 14: Analize razina vode i vršnih protoka projektnih pljuskova Modela 4 .....	70
Tablica 15: Analize razina vode i vršnih protoka projektnih pljuskova Modela 5 .....	76
Tablica 16: Analize razina vode i vršnih protoka projektnih pljuskova Modela 6 .....	82
Tablica 17: Analize razina vode i vršnih protoka projektnih pljuskova Modela 7 .....	88
Tablica 18: Parametri propusnosti filtarskog sloja i prirodnog tla .....	96



## Popis slika

Slika 1: Kruženje vode u prirodnom i urbaniziranom slivu.....	3
Slika 2: Prikaz hidrograma urbane sredine i prirodnog područja iste površine .....	4
Slika 3: Tradicionalan pristup odvodnje oborinske vode .....	5
Slika 4: Shema sustava i objekata sive infrastrukture.....	5
Slika 5: Integralni pristup odvodnje oborinske vode .....	6
Slika 6: Grad spužva, Sanya Dong'an Wetland Park u Kini .....	7
Slika 7: Metode održivih sustava odvodnje oborinske vode .....	7
Slika 8: Shematski prikaz infiltracijskog jarka .....	10
Slika 9: Shematski prikaz bioretencije.....	11
Slika 10: Shematski prikaz klasičnog kišnog vrta .....	12
Slika 11: Primjer kišnog vrta, Bush Pasture Park, Oregon .....	13
Slika 12: Kišni vrt, Flora Terrace, Australija.....	13
Slika 13: Kišni vrt, Argenta Hills, Minnesota.....	14
Slika 14: Primjer modeliranja slivnih površina u SWMM-u .....	19
Slika 15: Primjer sheme kišnog vrta .....	20
Slika 16: Primjer modeliranja kišnog vrta u GIFModu prema prethodnoj shemi (prikaz konceptualnog modela iz GIFMod računalnog programa).....	21
Slika 17: Blok podzemne retencije .....	28
Slika 18: Blok saturiranog tla .....	29
Slika 19: Blok površinske retencije .....	29
Slika 20: Blok nesaturiranog tla.....	30
Slika 21: Blok potoka.....	30
Slika 22: Blok površinskog toka .....	31





Slika 23: Prikaz grada Poreča na karti Hrvatske.....	36
Slika 24: Prikaz odabranog područja na karti Poreča .....	37
Slika 25: Odabrano slivno područje, trgovina Lidl, grad Poreč .....	37
Slika 26: Tlocrtni prikaz odabrane slivne površine .....	37
Slika 27: Primjer projektnih pljuskova .....	39
Slika 28: HTP krivulje različitih povratnih perioda s pripadajućim funkcijama .....	40
Slika 29: H – PP krivulja za trajanje pljuska od 1440 min .....	41
Slika 30: HTP krivulja povratnog perioda 1 godine .....	42
Slika 31: Prikaz površine modelirane u SWMM računalnom programu.....	43
Slika 32: Hidrogram prirodnog stanja slivne površine povratnog perioda 10 godina .....	44
Slika 33: Hidrogram prirodnog stanja slivne površine povratnog perioda 100 godina ....	45
Slika 34: Primjer djela tekstualne datoteke vremenske serije dotoka u kišni vrt.....	45
Slika 35: Primjer djela tekstualne datoteke vremenske serije oborine nad kišnim vrtom	46
Slika 36: Primjer modela kišnog vrta u GIFMod računalnom programu .....	47
Slika 37: Shema kišnog vrta .....	49
Slika 38: Model 1, 1. i 2.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	51
Slika 39: Model 1, 1. i 2.kriterij – razina vode u retenciji .....	51
Slika 40: Model 1, 3.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	52
Slika 41: Model 1, 3.kriterij – razina vode u retenciji .....	52
Slika 42: Model 1, 4.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	53
Slika 43: Model 1, 4.kriterij – razina vode u retenciji .....	53
Slika 44: Model 1, 5.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	54
Slika 45: Model 1, 5.kriterij – razina vode u retenciji .....	54
Slika 46: Model 1, dugogodišnji niz oborina – hidrogram izlaza.....	55



Slika 47: Model 1, dugogodišnji niz oborina – razina vode u retenciji .....	55
Slika 48: Model 1, dugogodišnji niz oborina – evapotranspiracija .....	56
Slika 49: Model 2, 1. i 2.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	59
Slika 50: Model 2, 1. i 2.kriterij – razina vode u retenciji .....	59
Slika 51: Model 2, 3.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	60
Slika 52: Model 2, 3.kriterij – razina vode u retenciji .....	60
Slika 53: Model 2, 4.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	61
Slika 54: Model 2, 4.kriterij – razina vode u retenciji .....	61
Slika 55: Model 2, 5.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	62
Slika 56: Model 2, 5.kriterij – razina vode u retenciji .....	62
Slika 57: Model 2, dugogodišnji niz oborina – hidrogram izlaza.....	63
Slika 58: Model 2, dugogodišnji niz oborina – razina vode u retenciji .....	63
Slika 59: Model 2, dugogodišnji niz oborina – evapotranspiracija .....	64
Slika 60: Model 3, 1. i 2.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	65
Slika 61: Model 3, 1. i 2.kriterij – razina vode u retenciji .....	65
Slika 62: Model 3, 3.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	66
Slika 63: Model 3, 3.kriterij – razina vode u retenciji .....	66
Slika 64: Model 3, 4.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	67
Slika 65: Model 3, 4.kriterij – razina vode u retenciji .....	67
Slika 66: Model 3, 5.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	68
Slika 67: Model 3, 5.kriterij – razina vode u retenciji .....	68
Slika 68: Model 3, dugogodišnji niz oborina – hidrogram izlaza.....	69
Slika 69: Model 3, dugogodišnji niz oborina – razina vode u retenciji .....	69
Slika 70: Model 3, dugogodišnji niz oborina – evapotranspiracija .....	70



Slika 71: Model 4, 1. i 2.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	71
Slika 72: Model 4, 1. i 2.kriterij – razina vode u retenciji .....	71
Slika 73: Model 4, 3.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	72
Slika 74: Model 4, 3.kriterij – razina vode u retenciji .....	72
Slika 75: Model 4, 4.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	73
Slika 76: Model 4, 4.kriterij – razina vode u retenciji .....	73
Slika 77: Model 4, 5.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	74
Slika 78: Model 4, 5.kriterij – razina vode u retenciji .....	74
Slika 79: Model 4, dugogodišnji niz oborina – hidrogram izlaza.....	75
Slika 80: Model 4, dugogodišnji niz oborina – razina vode u retenciji .....	75
Slika 81: Model 4, dugogodišnji niz oborina – evapotranspiracija .....	76
Slika 82: Model 5, 1. i 2.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	77
Slika 83: Model 5, 1. i 2.kriterij – razina vode u retenciji .....	77
Slika 84: Model 5, 3.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	78
Slika 85: Model 5, 3.kriterij – razina vode u retenciji .....	78
Slika 86: Model 5, 4.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	79
Slika 87: Model 5, 4.kriterij – razina vode u retenciji .....	79
Slika 88: Model 5, 5.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	80
Slika 89: Model 5, 5.kriterij – razina vode u retenciji .....	80
Slika 90: Model 5, dugogodišnji niz oborina – hidrogram izlaza.....	81
Slika 91: Model 5, dugogodišnji niz oborina – razina vode u retenciji .....	81
Slika 92: Model 5, dugogodišnji niz oborina – evapotranspiracija .....	82
Slika 93: Model 6, 1. i 2.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	83
Slika 94: Model 6, 1. i 2.kriterij – razina vode u retenciji .....	83



Slika 95: Model 6, 3.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	84
Slika 96: Model 6, 3.kriterij – razina vode u retenciji .....	84
Slika 97: Model 6, 4.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	85
Slika 98: Model 6, 4.kriterij – razina vode u retenciji .....	85
Slika 99: Model 6, 5.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	86
Slika 100: Model 6, 5.kriterij – razina vode u retenciji .....	86
Slika 101: Model 6, dugogodišnji niz oborina – hidrogram izlaza.....	87
Slika 102: Model 6, dugogodišnji niz oborina – razina vode u retenciji .....	87
Slika 103: Model 6, dugogodišnji niz oborina – evapotranspiracija .....	88
Slika 104: Model 7, 1. i 2.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	89
Slika 105: Model 7, 1. i 2.kriterij – razina vode u retenciji .....	89
Slika 106: Model 7, 3.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	90
Slika 107: Model 7, 3.kriterij – razina vode u retenciji .....	90
Slika 108: Model 7, 4.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	91
Slika 109: Model 7, 4.kriterij – razina vode u retenciji .....	91
Slika 110: Model 7, 5.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta .....	92
Slika 111: Model 7, 5.kriterij – razina vode u retenciji .....	92
Slika 112: Model 7, dugogodišnji niz oborina – hidrogram izlaza.....	93
Slika 113: Model 7, dugogodišnji niz oborina – razina vode u retenciji .....	93
Slika 114: Model 7, dugogodišnji niz oborina – evapotranspiracija .....	94
Slika 115: Model 1, analiza osjetljivosti – eksperiment br. 4.....	95
Slika 116: Model 2 – vršni protoci ulaznih i izlaznih protoka prema kriterijima.....	97
Slika 117: Model 3 – vršni protoci ulaznih i izlaznih protoka prema kriterijima.....	97
Slika 118: Model 4 – vršni protoci ulaznih i izlaznih protoka prema kriterijima.....	98





Slika 119: Model 5 – vršni protoci ulaznih i izlaznih protoka prema kriterijima.....	98
Slika 120: Model 6 – vršni protoci ulaznih i izlaznih protoka prema kriterijima.....	99
Slika 121: Model 7 – vršni protoci ulaznih i izlaznih protoka prema kriterijima.....	99
Slika 122: Model 2 – detalj vršnog protoka.....	100



## 1. UVOD

Cilj ovog rada je provesti racionalno dimenzioniranje kišnih vrtova različitih karakteristika i provesti analize njihovih geometrijskih karakteristika i parametara kako bismo bolje razumjeli funkcioniranje zeleno-plave infrastrukture i njihov doprinos prirodnim procesima. Ovaj rad je također izrađen s ciljem unaprjeđenja postojećih saznanja o dimenzioniranju ovakve infrastrukture te boljeg razumijevanja utjecaja svih relevantnih parametara na funkcionalnost ne samo kišnih vrtova, već i ostalih pristupa za odvodnju oborinskih voda koji su temeljeni na prirodnim rješenjima (engl. Nature-based Solutions, NbS). Također svrha ovoga rada bilo je upoznavanje sa radom u GIFMod računalnom programu, njegovima prednostima u odnosu na jednostavnije računalne programe kako bi se unaprijedilo razumijevanje o vrlo složenim nelinearnim procesima procjeđivanja vode u nesaturiranim tlima.

U drugom poglavlju ovog rada objašnjena je problematika urbanizacije i kako ona utječe na površinsko otjecanje i kvalitetu oborinskih voda. Predstavljene su alternativni pristupi klasičnim sustavima odvodnje oborinskih voda kojima je cilj poboljšanje kvalitete oborinskih voda i oponašanje prirodnog režima otjecanja.

Nadalje, u trećem poglavlju opisana je teorijska podloga dimenzioniranja kišnih vrtova te njihovo funkcioniranje sa detaljnim shemama. Uz to je opisan kratki pregled literature koji opisuje preporuke i razmatranja pri planiranju kišnih vrtova.

U četvrtom poglavlju opisana je metodologija u koracima koja se koristila u izradi ovog rada uz kratki pregled bitnih računalnih programa korištenih za obradu podataka i modeliranje kišnih vrtova. Također je detaljno opisana teorijska podloga koju računalni program SWMM koristi pri hidrauličkom modeliranju dotoka i teorijska podloga koju GIFMod koristi pri hidrauličkom modeliranju kišnog vrta.

U petom poglavlju su ukratko opisani korišteni kriteriji za dimenzioniranje kišnih vrtova.

U šestom poglavlju su detaljnije opisani koraci korišteni pri modeliranju kišnih vrtova u vidu odabira područja, njegovih geometrijskih i klimatoloških karakteristika, predstavljene su korištene meteorološke podloge te njihova obrada za korištenje u hidrauličkom proračunu, postupak provođenja hidrauličkog proračuna dotoka i hidrauličkog modeliranja kišnog vrta te obrada rezultata.

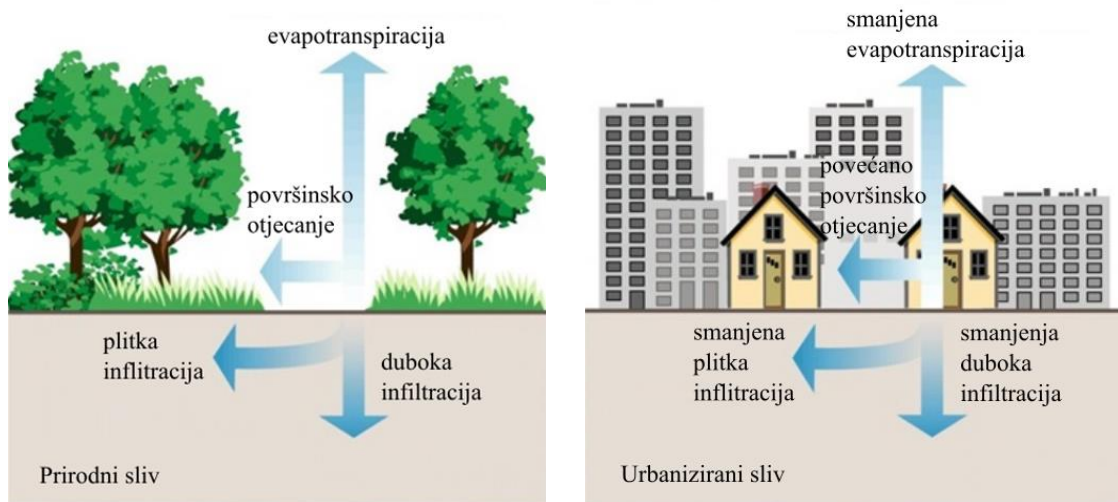
U sedmom poglavlju prikazane su sheme sa geometrijskim karakteristikama te popratne tablice dimenzioniranih kišnih vrtova.

U osmom poglavlju su prikazani grafovi rezultata provedenih simulacija uz kratak opis vršnih vrijednosti mjerodavnih projektnih pljuskova po svakom kriteriju te rezultati simulacija dugogodišnjih nizova oborina grada Poreča.

U devetom poglavlju je provedena diskusija rezultata vezana uz dimenzioniranje kišnih vrtova, zaključci iz prikazanih rezultata te potencijalni nedostaci modeliranja.

## 2. SUSTAVI ODVODNJE OBORINSKIH VODA

Oborinskom vodom se smatraju svi oblici vode koji padaju na tlo ili na tlu nastaju te otječu nakon oborinskog događaja [1, 2]. Sve većom urbanizacijom, otjecanje oborinske vode postaje čimbenik kojeg treba pratiti i uzeti u obzir pri planiranju i izvedbi građevinskih radova/objekata. Korištenjem umjetnih materijala, prije svega raznih vrsta asfalta i betona, smanjila se propusnost površina što je generiralo potencijalni problem otjecanja oborinske vode (slika 1). Prirodna tla su znatno propusnija, što znači da mogu „upiti“ puno veću količinu vode i time prirodno smanjiti protjecanje oborine [2].



Slika 1: Kruženje vode u prirodnom i urbaniziranom slivu (modificirano prema [3])

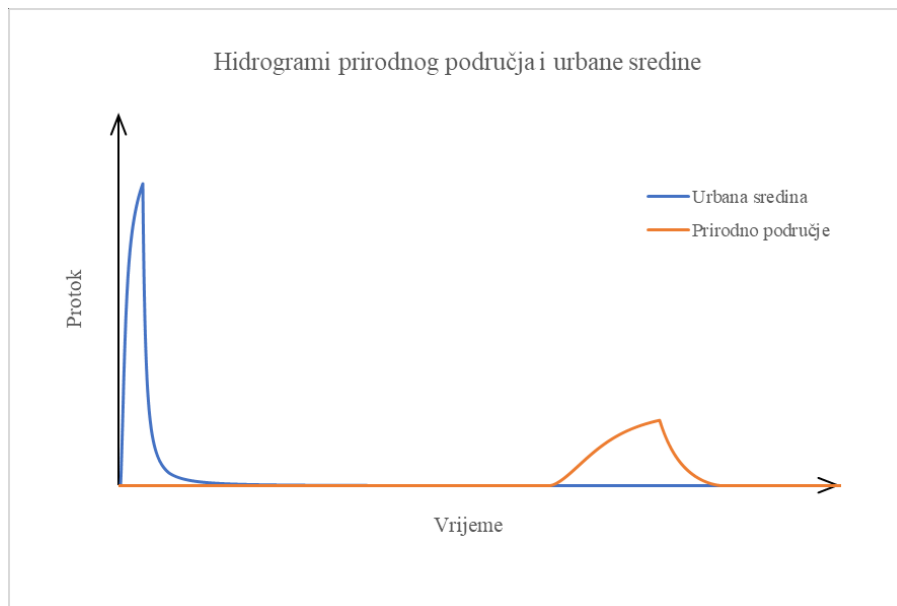
### 2.1. Utjecaj urbanizacije na otjecanje

Urbanizacija poremećuje prirodno kruženje vode i ima mnogo različitih utjecaja na sam proces otjecanja [2,4]:

- povećanje volumena oborinskih voda,
- povećanje protoka i vršnog protoka,
- povećanje brzine otjecanja,
- skraćenje vremena koncentracije,
- smanjenje infiltracije,

- smanjenje evapotranspiracije,
- češće poplave.

Također urbanizacija ima negativan utjecaj na geomorfologiju toka, vodena staništa i kvalitetu vode [2]. Na slici 2 prikazan je hidrogram otjecanja sa slivne površine za urbanu sredinu i prirodno područje.

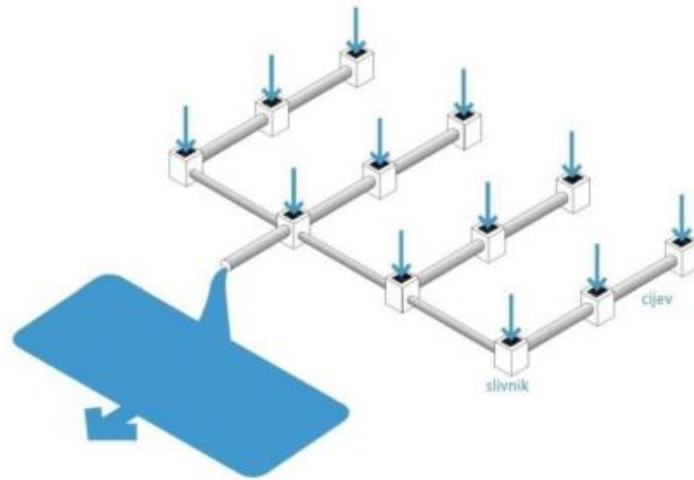


Slika 2: Prikaz hidrograma urbane sredine i prirodnog područja iste površine

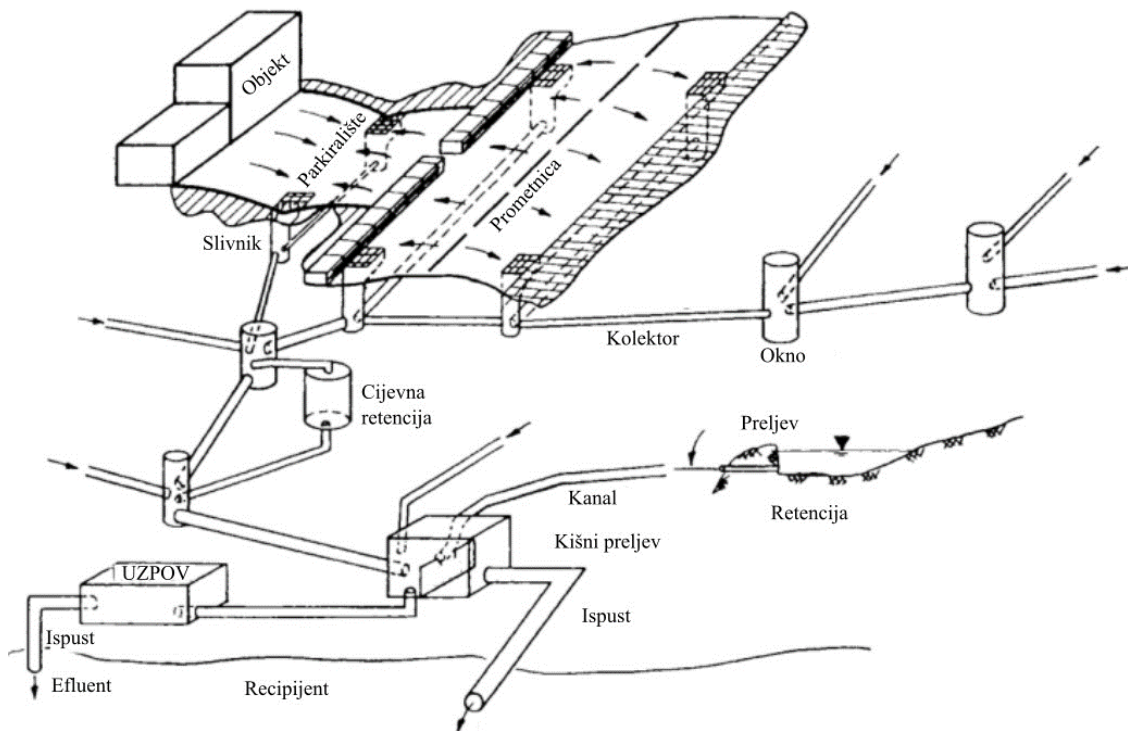
## 2.2. Klasični sustavi odvodnje oborinskih voda

Klasični sustavi odvodnje su prirodni razvitak urbanizacije područja u smislu da je urbanizacija zbog jednostavnosti i brzine, planirana bez prirodnih materijala i bez razmišljanja o prirodnim utjecajima; osim o zaštiti od prirodnih utjecaja. Pod klasičnim sustavima smatra se tradicionalni pristup odvodnji oborinskih voda (slika 3), gdje se voda skuplja sa prometnica koje se izvode u malim nagibima prema ulazima u kanalizaciju (slivnici i sl.) ili direktno cijevima u kanalizaciju iz stambenih, komercijalnih i ostalih vrsta objekata te se sustavima kolektora/cijevi, okana, retencija i sličnih objekata voda što prije odvodi do ispusta ili uređaja za pročišćavanje – ovo nazivamo *sivom infrastrukturom* (slika 4). To znači da od faze otjecanja oborina s urbaniziranih površina do njenog ispusta u

recipijent, volumen oborine nije odvođen niti tretiran nikakvim prirodnim procesima (osim izrazito malog djela infiltracije kroz urbanizirane površine) te je voda dodatno onečišćena prikupljanjem onečišćujućih tvari s urbaniziranih površina (naravno i padanjem kroz atmosferu dolazi do određenog onečišćenja oborinskih voda).



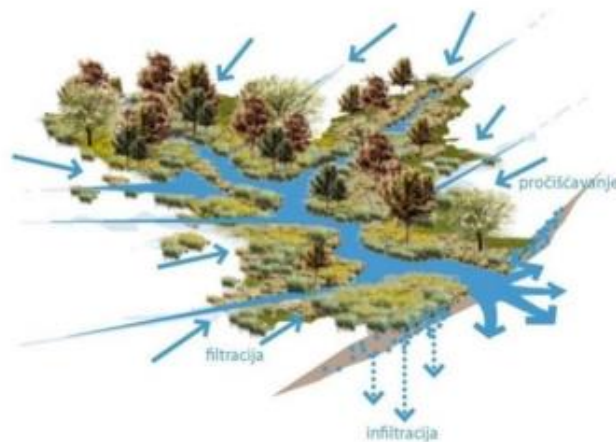
Slika 3: Tradicionalan pristup odvodnje oborinske vode [4]



Slika 4: Shema sustava i objekata sive infrastrukture [4]

### 2.3. Održivi sustavi odvodnje oborinskih voda

Kako bi se smanjio negativan utjecaj urbanizacije sliva razvile su se različiti pristupi, tehnike i sustavi odvodnje oborinske vode koji nastoje oponašati proces otjecanja u prirodnom slivu, pritom iskorištavajući prirodne procese i resurse. Najpoznatiji pristupi su „razvoj smanjenog negativnog utjecaja“ (eng. LID – Low Impact Development) te „najbolji postupci upravljanja“ (eng. BMP – Best Management Practice) iz Sjedinjenih Američkih Država, postoje i nekoliko različitih pristupa iz Europe i Australije. U Aziji su već razvijeni tzv. „Gradovi spužve“ (slika 6) koji koriste ove principe kao osnovni dio urbanog planiranja gradova U Hrvatskoj je razvijen pristup „integralnog upravljanja vodnim sustavima“ (slika 5), a u novije vrijeme se koristi izraz prirodna rješenja (eng. Nature-based solutions, NbS) [2, 4].



Slika 5: Integralni pristup odvodnje oborinske vode [4]

Svi pristupi koriste tehnike kojima se voda usporava, zadržava i pročišćava. Primjenom ovih pristupa provodi se planiranje *plavo-zelene infrastrukture* (kombinacije strateškog gospodarenja vodom te struktura koje funkcioniraju u svrhu oponašanja prirodnih procesa vodnog otjecanja i očuvanja prirode) kao zamjena za *sivu infrastrukturu* (tradicionalan pristup odvodnji oborinske vode) [4].

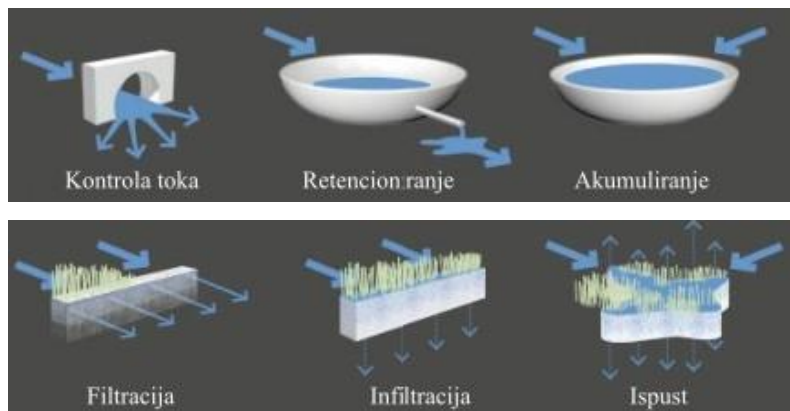




Slika 6: Grad spužva, Sanya Dong'an Wetland Park u Kini [5]

#### 2.4. Metode održivih sustava odvodnje

Najosnovnije metode koje je bitno poznavati pri planiranju infrastrukture održivih sustava odvodnje oborinske vode i koje koriste svi prethodno navedeni pristupi u svrhu usporavanja toka, zadržavanja, pročišćavanja i krajnjeg ispusta vode su: kontrola toka, retencioniranje, akumuliranje, filtracija, infiltracija, evapotranspiracija i ispuštanje (prikazano na slici 7), a sve u svrhu smanjenja površinskog otjecanja oborinske vode te njenog pročišćavanja prirodnim procesima [2, 4].



Slika 7: Metode održivih sustava odvodnje oborinske vode [4]

#### **2.4.1. Kontrola toka**

Pod kontrolom toka misli se na njeno usporavanje i usmjeravanje, a to se vrši geometrijom površina i okolnog terena, različitim vrstama materijala, i objektima za usmjeravanje vode [4].

#### **2.4.2. Retencioniranje**

Retencioniranje vode je postupak privremenog zadržavanja vode u svrhu ograničenja vršnog protoka i zadržavanja volumena kako bi se omogućilo više vremena za infiltraciju i evapotranspiraciju vode. Može se postići različitim vrstama podzemnih ili površinskih objekata [2, 4, 6].

#### **2.4.3. Akumuliranje**

Akumuliranje je postupak produljenog zadržavanja vode iz istih razloga kao i za retencioniranje te dodatnog; omogućava taloženje na dnu akumulacije i time pročišćava vodu od većih čestica nanosa [4].

#### **2.4.4. Filtracija**

Postupak procjeđivanja vode kroz sloj poroznog materijala u svrhu separacije od krupnijih čestica te pročišćavanja vode od sitnijih; što je materijal nepropusniji, tipično će pročišćavanje biti bolje [4].

#### **2.4.5. Infiltracija**

Infiltracija predstavlja pojam upuštanja vode u prirodno tlo, time smanjujući volumen vode koji otječe površinski. Propusnost tla je prema tome mjerodavan parametar volumenu vode koji je moguće propustiti u tlo [2].

#### **2.4.6. Evapotranspiracija**

Evapotranspiracija je povezan proces isparavanja (evaporacije) i transpiracije vode. Biljke korijenjem upijaju vodu iz tla i prenose je kroz stabljiku do površine listova gdje voda onda isparava (prijelaz iz tekućeg u plinovito agregatno stanje) [7, 8, 9].

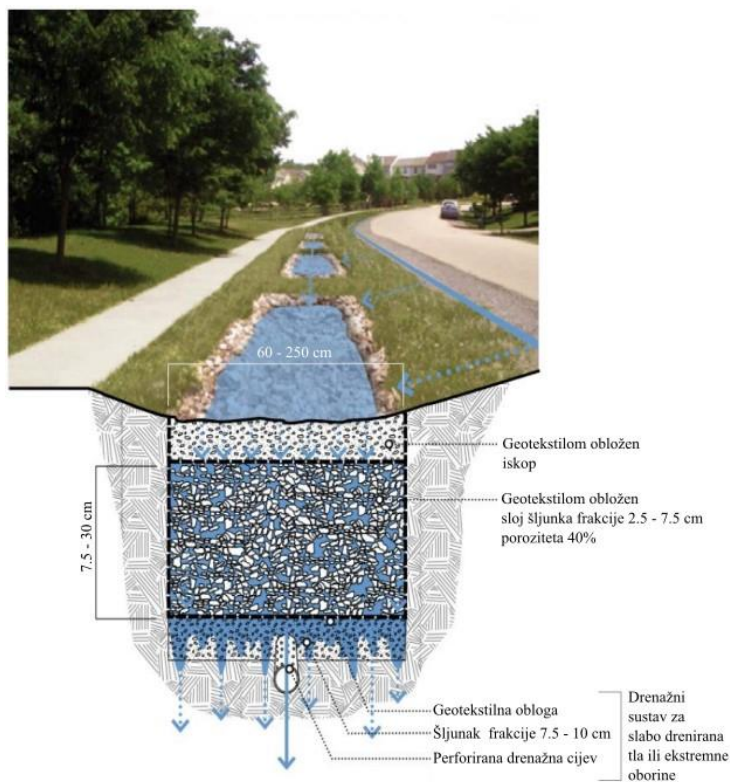
#### **2.4.7. Ispust**

U tradicionalnom pristupu odvodnji oborinske vode cilj je svu vodu usmjeriti ka ispustu, dok je u održivim sustavima cilj što veći volumen vode infiltrirati u tlo i dopustiti evapotranspiraciju, a volumen ispusta je ograničen na način da bi volumen ispuštene vode trebao biti sličan volumenu ispuštene vode (koja površinski otječe) u prirodnom slivu [2].

### 3. PRIRODNA RJEŠENJA ZA ODVODNJU OBORINSKIH VODA

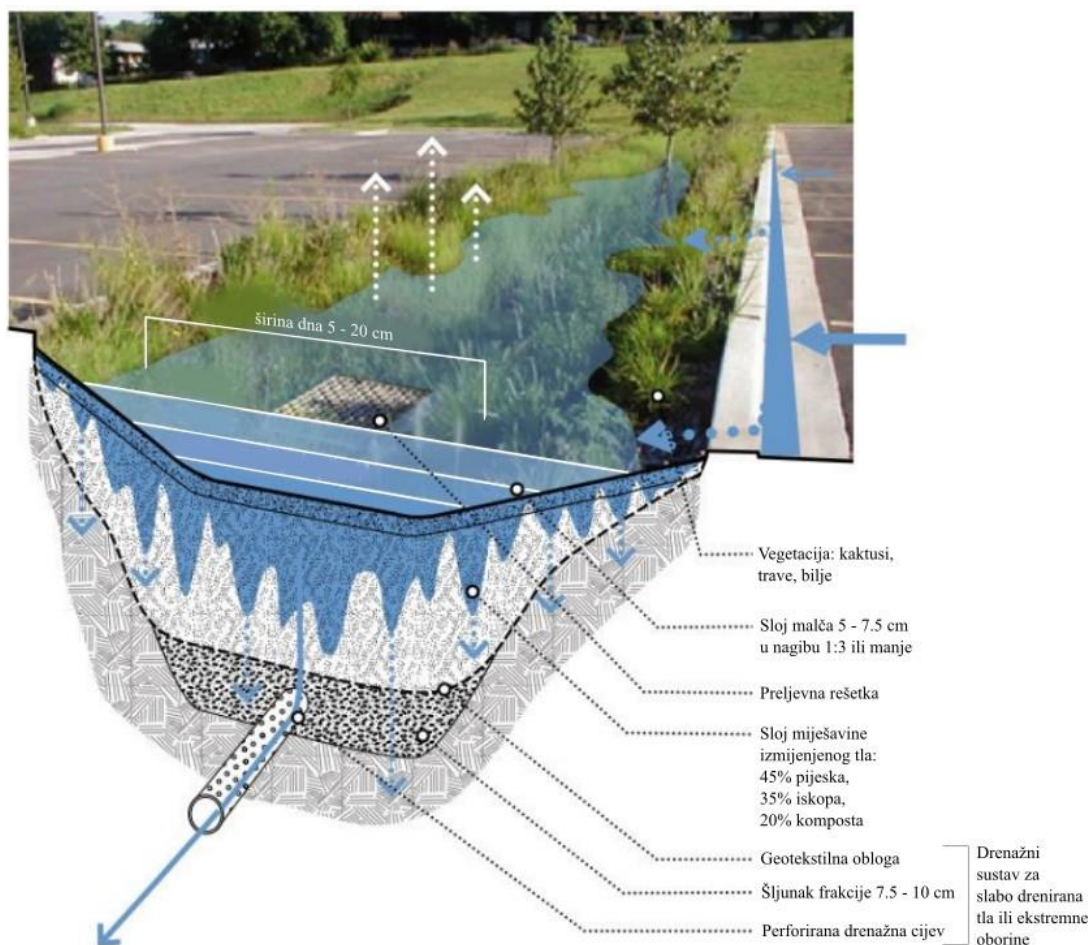
Prirodna rješenja za odvodnju oborinskih voda je relativno širok pojam u okviru zeleno-plave infrastrukture, a odnose se na objekte koje prihvaćaju vodu, filtriraju je kroz porozni medij u svrhu pročišćavanja, zadržavaju je kroz određeni period vremena kako bi se što veći volumen vode infiltrirao u tlo i prihranio podzemnu vodu te je kontrolirano ispuštaju. U ovome radu fokus je na kišnim vrtovima, iako se na vrlo sličan način mogu dimenzionirati i bioretencije te infiltracijski jarci.

Infiltracijski jarci (slika 8) su sustavi različitih slojeva koji su obloženi geotekstilnim oblogama oko cijelog iskopa za poboljšanje infiltracije. Preporučeno je da se uz jarke ne sade stabla te da se koriste obloge kako bi se spriječilo začepljenje jarka i time smanjilo potrebno održavanje. Preporučuje se njihovo korištenje za nepropusna, slabo drenirana tla te da se na istom području koriste i druge vrste zeleno-plave infrastrukture. Infiltracijski jarci se najčešće postavljaju između kolnika i prometnice [4].



Slika 8: Shematski prikaz infiltracijskog jarka (modificirano prema [4])

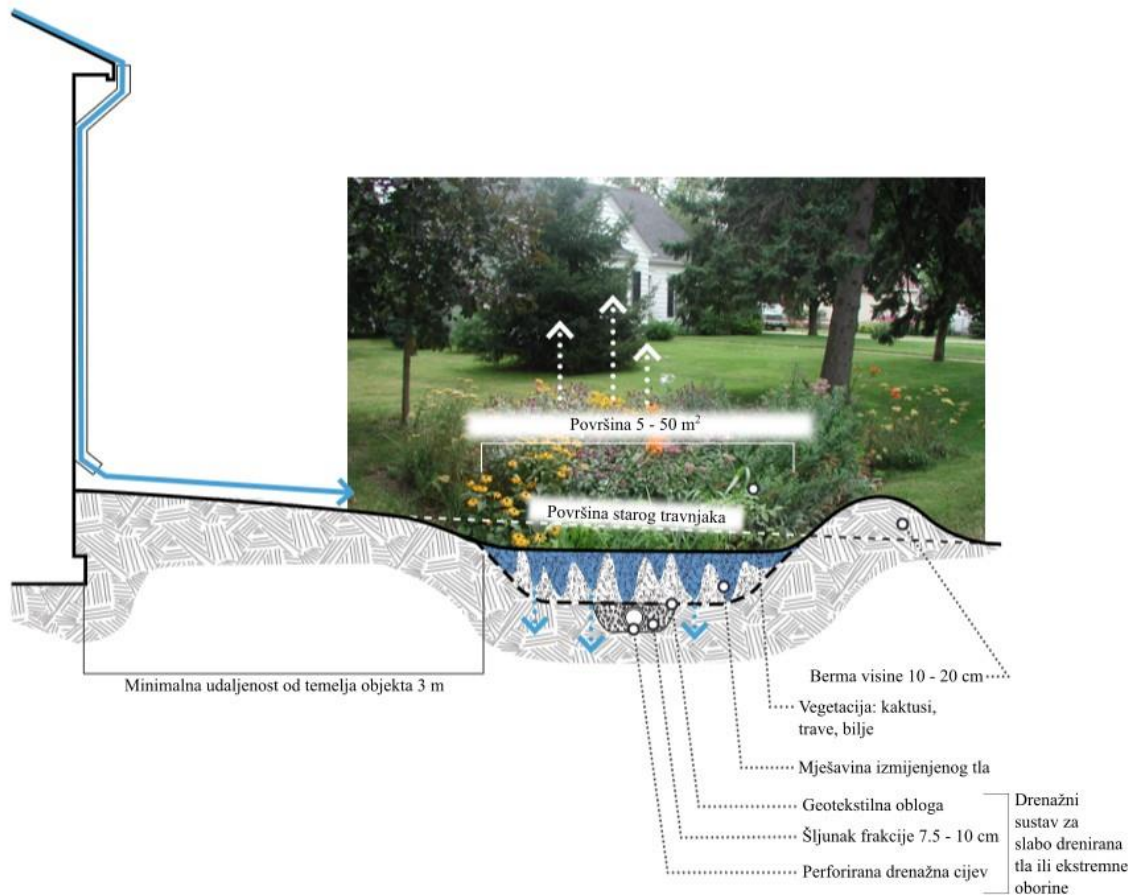
Drugo rješenje su bioretencije (slika 9) koje se definiraju kao kanal blagih nagiba, obrasao vegetacijom, namijenjen za prihvatanje i pročišćavanje oborinskih voda. U bioretencijama filtracija se izvršava pretežito vegetacijom i upravo je pročišćavanje za razliku od klasičnog kišnog vrta njihova primarna funkcija. Bioretencije su tako često građene uz prometnice i prometne površine jer imaju visoku učinkovitost za prihvatanje oborinske vode, što je bitno jer je upravo voda koja se otječe s prometnih površina ona kojoj je potreban visok stupanj pročišćavanja [4].



Slika 9: Shematski prikaz bioretencije (modificirano prema [4])

Klasični kišni vrt se definira kao plitka depresija u tlu koja se sastoji od nekoliko različitih slojeva koji prihvaćaju, filtriraju i propuštaju vodu u tlo ili je po potrebi dreniraju i ispuštaju u obližnji kanalizacijski sustav. Velika prednost kišnih vrtova osim smanjenja volumena površinskog otjecanja je pročišćavanje zahvaćene vode njenim prolaskom kroz filtarski

sloj (zamjenski sloj tla); mogućnost uklanjanja raznih patogena i metala. Njihova primarna svrha je infiltriranje oborinske vode uz njeno privremeno zadržavanje [4, 10]. Shema kišnog vrta prikazana je na slici 10.



Slika 10: Shematski prikaz klasičnog kišnog vrta (modificirano prema [4])

Kišni vrtovi su tipično zasađeni biljkama (prikazano na slici 11) kako bi se volumen oborinske vode dodatno smanjio evapotranspiracijom te iz estetskih razloga. Biljke bi trebale biti relativno otporne na sušu; voda se ne zadržava dugotrajno u kišnim vrtovima zbog problema sa životinjama, pogotovo s komarcima [10].



Slika 11: Primjer kišnog vrta, Bush Pasture Park, Oregon [11]

Izgradnja kišnih vrtova je jeftina komparativno sa sivom infrastrukturom uz dodatne efekte pročišćavanja vode i ispuštanja u tlo/dohranjivanja podzemne vode. Iako zahtjeva redovito održavanje, s vremenom troškovi održavanja se smanjuju. Dugotrajnost, uz pravilno održavanje, jest još jedna prednost naspram sive infrastrukture. Kišni vrt ne zahtjeva veliku površinu te je time moguće graditi i uklopiti kišne vrtove na površinama različitih namjena – parkovi, parkirališta, dvorišta, škole, uz kolnike i slične objekte (slike 12 i 13).



Slika 12: Kišni vrt, Flora Terrace, Australija [12]



Slika 13: Kišni vrt, Argenta Hills, Minnesota [13]

### 3.1. Planiranje i dimenzioniranje kišnih vrtova

Općenito, kišni vrtovi služe za upravljanje oborinskih voda manjih slivova, a njihove površine bi trebale biti 10% – 20% površine sliva, međutim literatura ukazuje i na različita ograničenja površina. Moguće je i umjesto jednog, napraviti niz manjih kišnih vrtova kojima su preljevi i drenaže povezani jedni s drugim do krajnjeg kišnog vrta koji vodu drenira i preljeva u ispust [10, 14].

Dubina ili visina berme ovisi o namjeni kišnog vrta i gdje se nalazi, npr. kišni vrtovi koji se nalaze uz kolnike i parkirališta, gdje se odvija pješački i motorni promet trebala bi biti plića [10].

Materijali koji se koriste za filtracijske slojeve mogu biti različitih propusnosti, materijali sa puno pijeska su većih propusnosti i omogućuju veću infiltraciju dok materijali manjih propusnosti s više gline i ilovače pružaju bolje pročišćavanje vode [10].

Propusnost prirodnog tla je bitan parametar kojeg treba testirati na terenu, za tla koja imaju veću propusnost mogu se graditi kišni vrtovi bez podzemne drenaže dok se za tla niskih



propusnosti mogu koristiti podzemne drenaže ukoliko brzo tlo dolazi do granice potpune saturacije [10].

Promjer drenažnih i preljevnih cijevi služi za kontrolu protoka na ispustu kišnog vrta, u literaturi su pronađene razne preporuke, ali u obzir treba uzeti uvjete poput toga gdje cijevi prolaze (u vidu opterećenja iznad njih) i materijala koji se koristi za drenažni sloj.

Osim ovdje gore navedenih najosnovnijih uvjeta bitno je razmišljati i o vegetaciji koja će se koristiti, lokaciji, klimi područja, nagibu i dotoku sliva, razini i karakteristikama podzemne vode, kvaliteti zraka i ostalim mogućim zagađenjima oborine. Pregledom literature može se primijetiti da većina preporuka i ograničenja dolazi iz različitih priručnika koji su izrađeni s obzirom na grad/državu u kojima su dobivena iskustva izgradnjom različitih kišnih vrtova. Prema tome moguće je zaključiti da iako se preporuke mogu koristiti u početnim planiranjima i dimenzioniranjima, bitno je iterirati, modificirati, provoditi vlastita ispitivanja, praćenja izvedenih projekata u svrhu dobivanja ideje o karakteristikama šireg područja na kojem se izrađuje bilo kakva zelena infrastruktura ukoliko za to područje ne postoji velika količina prethodno dostupne literature, smjernica ili priručnika.

## 4. METODOLOGIJA

Prilikom izrade rada korišteno je nekoliko različitih računalnih programa u svrhu modeliranja različitih kišnih vrtova. Prema tome postupak modeliranja kišnih vrtova možemo podijeliti na korake prema radu u svakom računalnom programu.

U prvom koraku koristio se računalni program QGIS. Bilo je potrebno odabrati slivnu površinu u urbaniziranom području grada Poreča za kojeg su bile dostupne meteorološke podloge. Nakon odabira područja trebalo je označiti zadanu slivnu površinu te odrediti njene geometrijske karakteristike; duljinu, širinu i nagib površine. Nakon toga trebalo je snimiti promatrano područje i spremiti sliku kako bi se kasnije koristila za podlogu pri hidrauličkom modeliranju.

U drugom koraku trebalo je koristiti tablični kalkulator, u ovom slučaju Excel, kako bi se obradili podatci s meteoroloških podloga i pripremile datoteke vremenskih serija projektnih pljuskova za SWMM računalni program.

U trećem koraku koristio se program EPA SWMM za hidrauličko modeliranje dotoka oborinske vode u kišni vrt. U programu se ubacila podloga promatranog sliva snimljena kao slika u QGIS-u. Podloga se skalirala u pripadajuće mjerilo i po njoj je u SWMM-u isertana pripadajuća slivna površina. Zatim su ispisani svim parametri zadane površine te su modelirani ispušaji sa slivne površine u kojem se mjeri dotok i kišomjer u kojem se odabire datoteka vremenske serije za simulaciju projektnog pljuska. Ovaj postupak je proveden za dvije različite vrste površina; u urbaniziranom te u prirodnom stanju. Iz Excela su ubačene datoteke vremenskih serija projektnih pljuskova različitih trajanja i povratnih perioda. Također za urbaniziranu površinu provedene su i simulacije dotoka za dugogodišnji niz oborina za područje grada Poreča i dotoka za dugogodišnji niz oborina 90-og percentila grada Poreča. Nakon provođenja svake simulacije rezultati dotoka u ispušaju (hidrogrami dotoka) su ispisani u Excelu.

U četvrtom koraku opet je korišten Excel za izradu hidrograma mjerodavnih projektnih pljuskova površine u prirodnom stanju u svrhu dobivanja vršnih protoka 10 i 100 godišnjeg povratnog perioda koji će se koristiti kao kriteriji za dimenzioniranje kišnih vrtova. Također su rezultati ostalih simulacija obrađeni kako bi se pripremile vremenske serije za korištenje u GIFMod računalnom programu u pravilnim mjernim jedinicama i formatima. To su vremenske serije dotoka u kišni vrt i vremenske serije dotoka dugogodišnjih nizova oborina. Također obrađene su i pripremljene datoteke dugogodišnjeg niza oborina u gradu Poreču te dugogodišnjeg niza oborina grada Poreča 90-og percentila koji generiraju kišu nad samim kišnim vrtom. Uz to pripremljena je i datoteka vremenske serija dugogodišnjeg niza evapotranspiracije u gradu Poreču.

U petom koraku modelirani su kišni vrtovi u računalnom programu GIFMod. Izrađeno je 7 različitih modela kišnih vrtova. Prvi je dimenzioniran kako bi se provele analize osjetljivosti parametara kišnog vrta u svrhu dobivanja slike o utjecajima različitih parametara na ponašanje izlaznih protoka i razine vode. Za ostalih 6 modela odabrali su se različiti parametri propusnosti tla, tri različite propusnosti filtarskog sloja kišnog vrta i tri različite propusnosti prirodnog tla ispod kišnog vrta u koje se infiltrira oborinska voda. Za prva 3 modela provodile su se simulacije za 3 odabrane različite propusnosti i srednjom vrijednošću propusnosti prirodnog tla (srednja vrijednost od 3 odabrane propusnosti prirodnog tla). Za druga 3 modela simulacije su se provodile obratno, koristila se srednja vrijednost filtarskog materijala i odabrane 3 različite vrijednosti propusnosti prirodnog tla. Cilj modeliranja svakog kišnog vrta bio je zadovoljavanje kriterija za dimenzioniranje kišnog vrta i dobivanje optimalnih dimenzija visina slojeva i površine kišnog vrta, promjere i položaje izlaznih cijevi. Svrha ovakvog modeliranja svih 6 kišnih vrtova bila je dobivanje slike o utjecaju propusnosti materijala filtarskog sloja i prirodnog tla za racionalno dimenzioniranje kišnih vrtova te usporedbu vršnih vrijednosti razina vode i izlaznog protoka. Također nakon dimenzioniranja svakog kišnog vrta za isti je provedena simulacija za dugogodišnji niz oborina grada Poreča u kojem su se koristile vremenske serije dugogodišnjeg niza oborina (za dotok i kišu nad vrtom) i evapotranspiracije grada Poreča kako bi se dobila nešto realnija slika funkcioniranja kišnog vrta.

U šestom koraku izlazni podatci iz simulacija u GIFMod računalnom programu i izlazni podatci iz SWMM računalnog programa bili su obrađeni i korišteni za izradu dijagrama u Excelu kako bi se prikazali rezultati dimenzioniranja kišnih vrtova i funkcioniranja kišnih vrtova za dugogodišnje nizove oborina i evapotranspiracije.

#### **4.1. Korišteni računalni programi**

Prilikom izrade ovog rada korišten je niz programa za prikupljanje i obradu podataka, provođenje proračuna i dimenzioniranja, izradu grafova i tablica u svrhu pregleda rezultata. Neki od važnijih programa su navedeni u nastavku.

##### ***4.1.1. QGIS***

QGIS je geografski informacijski sustav koji služi za prikupljanje, pohranu, analiziranje i prikazivanje informacija promatranog geografskog područja [15]. U ovom radu QGIS je korišten za odabir područja sliva u gradu Poreču te iščitavanje njegove geometrije.

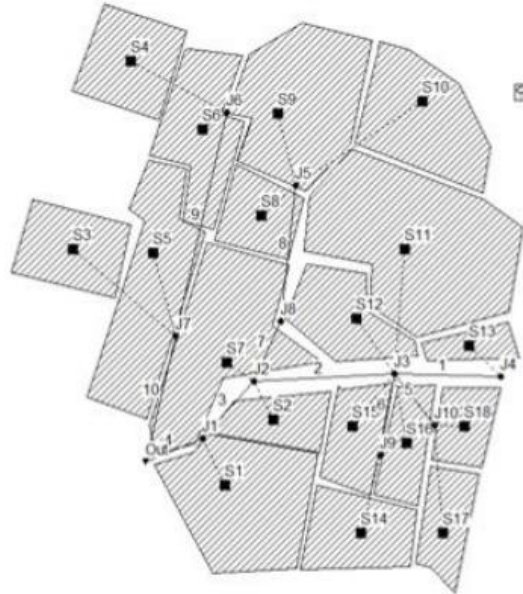
##### ***4.1.2. Microsoft Excel***

Excel je tablični kalkulator, služi za različite računske i logičke operacije, statističku analizu, sortiranje i organizaciju podataka te izradu grafova i tablica [16]. Excel je korišten za obradu ulaznih i izlaznih podataka, izradu datoteka vremenskih serija, projektnih pljuskova, HTP krivulja, izradu grafova i tablica rezultata, tablica parametara i sl.

##### ***4.1.3. EPA SWMM***

Računalni program SWMM je model upravljanja oborinskim vodama (eng. SWMM – Storm Water Management Model agencije za zaštitu okoliša SAD-a (eng. EPA – Environmental Protection Agency). Program se koristi za dinamičke (nestacionarne)

proračune i simulacije oborine – otjecanja pretežito u urbanim sredinama [2, 4, 17]. Program je korišten za modeliranje oborine nad slivom i proračun dotoka u svrhu dobivanja podataka za izradu vremenskih serija koje su se koristile u GIFModu i za izradu grafova rezultata dimenzioniranja kišnih vrtova. Na slici 14 prikazan je primjer modela rađenog u SWMM-u.

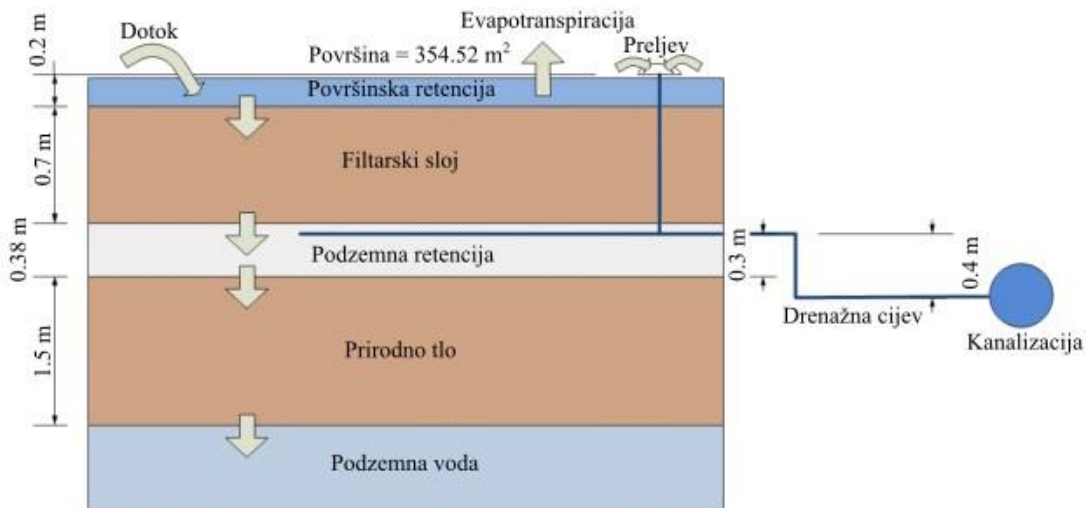


Slika 14: Primjer modeliranja slivnih površina u SWMM-u (modificirano prema [18])

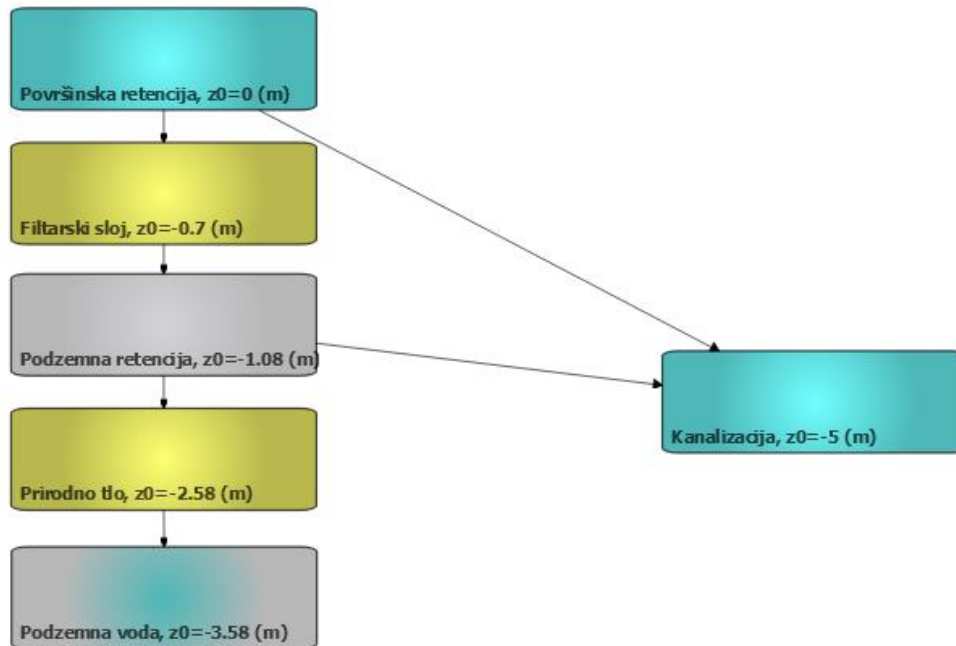
#### 4.1.4. *GIFMod*

GIFMod se koristi za modeliranje raznih vrsta zelenih infrastruktura. Modeliranje u GIFModu se vrši pomoću nekoliko blokova koji predstavljaju različite materijale sa različitim karakteristikama i parametrima. Za svaki blok se koriste različiti algoritmi koji računaju protok vode kroz taj blok te program mijenja algoritme koji se koriste pri računanju ovisno tome koji su blokovi povezani s kojim blokom te s obzirom na njihovu razinu, saturaciju i sl. Za razliku od SWMM i sličnih vrsta programa, GIFMod pruža puno detaljnije mogućnosti modeliranja ovisno o razini kompleksnosti koja se želi postići; izrada modela je gotovo modularna jer program dopušta provođenje simulacija sa odabirom od najosnovnijih parametara do svih dostupnih pa čak i na nekoliko mogućih razina (odabir

korištenja vremenskih serija, korištenje algoritama za njihove procjene, odabire izraza/jednadžbi ili odabir da se ne koriste) [2, 19, 20]. GIFMod je program koji je uz Excel najviše korišten pri izradi ovog rada, njime su se dimenzionirali modeli svih kišnih vrtova i analize osjetljivosti. Na slikama 15 i 16 je prikazana shema kišnog vrta modeliranog prema GIFMod korisničkom priručniku [19]. Ovaj primjer iz priručnika bio je osnova za izradu modela i provođenje simulacija u ovom radu; korišteno je 3 vrste blokova – „pond“ blok za površinsku retenciju i odvodnju/kanalizaciju, „soil“ blok za filtarski sloj i prirodno tlo te „storage“ blok za podzemnu retenciju. Blokovi kišnog vrta povezani su „default“ konektorima što znači da program odabire koji će se algoritmi koristiti za računanje protoka, te „pipe“ konektor za povezivanje prelivne i drenažne cijevi sa kanalizacijom što znači da će program koristiti Hazen-Williams-ovu jednadžbu za računanje protok. U nastavku je detaljnije objašnjeno kako i kojim algoritmima program provodi hidraulički proračun [19].



Slika 15: Primjer sheme kišnog vrta (modificirano prema [19])



Slika 16: Primjer modeliranja kišnog vrta u GIFModu prema prethodnoj shemi (prikaz konceptualnog modela iz GIFMod računalnog programa)

#### 4.2. Hidraulički proračun otjecanja oborinskih voda – SWMM

Proračun otjecanja modeliran je u dva dijela; proračun infiltracije i proračun usmjeravanja toka. SWMM pruža nekoliko mogućih modela za proračun infiltracije oborinskih voda; Horton-ova metoda, modificirana Horton-ova metoda, Green-Ampt-ova metoda, modificirana Green-Ampt-ova metoda i metoda broja krivulje, odnosno SCS metoda. Za usmjeravanje toka SWMM također pruža nekoliko modela: model jednolikog toka, metoda kinematičkog vala te metoda dinamičkog vala [17].

Pri izradi ovog rada koristilo se modeliranje dotoka sa SCS metodom za infiltraciju. Ova metoda razvijena je od agencije za očuvanje prirodnih resursa (eng. NRCS – Natural Resources Conservation Service) SAD-a za procjenu otjecanja oborinskih voda. Prema SCS metodi propusnost/infiltracija tla određena je CN brojem krivulje koje su vezane uz zemljišni pokrov i hidrološke grupe tla. Dakle za korištenje ove metode potrebno je poznavati tlo na promatranom području kako bi mu se pravilno dodijelio broj krivulje [21].

SCS metoda se sastoji od tri različita proračuna; proračun kumulativnog volumena otjecanja, procjena vršnog protoka i sintetički hidrogram otjecanja za 24-satni projektni pljusak odabranog povratnog perioda. SWMM koristi prvi proračun ove metode.

Za proračun volumena otjecanja SCS metodom, SWMM koristi sljedeći izraz [21]:

$$R = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S} \quad (1)$$

Gdje je:

$R$  - kumulativni volumen otjecanja

$P$  - kumulativna visina oborine

$Ia$  - početni gubitak

$S$  - kapacitet tla za upijanje

Početni gubitak je potrebno samostalno proračunati, a računa se kao [21]:

$$Ia = 0.2S \quad (2)$$

Gdje je:

$Ia$  - početni gubitak

$S$  - kapacitet tla za upijanje

Kod samostalnog proračuna početnog gubitka treba pripaziti na mjerne jedinice pa bi tako ovaj rezultat trebalo pomnožiti sa 25.4 za pretvorbu iz inča u milimetre.

Kapacitet tla za upijanje proračunava se izrazom [21]:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (3)$$

Gdje je:

$S$  - kapacitet tla za upijanje

$CN$  - broj krivulje



Pri izradi ovog rada usmjeravanje toka modelirano je metodom kinematičkog vala. Ova metoda proizlazi iz Saint-Venant-ovih jednadžbi kontinuiteta i očuvanja količine gibanja [22].

Izraz za jednadžbu kontinuiteta [22]:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

Gdje je:

$A$  - površina kanala/cijevi

$t$  - vrijeme

$Q$  - protok

$x$  - udaljenost/put

Jednadžba očuvanja količine gibanja dana je izrazom [22]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (5)$$

Gdje je:

$Q$  - protok

$t$  - vrijeme

$A$  - površina kanala/cijevi

$x$  - udaljenost/put

$g$  - ubrzanje sile teže

$H$  - hidraulički potencijal

$S_f$  - linijski gubitci

Izraz linijskih gubitaka izazvanih trenjem može dan je kao [22]:

$$S_f = \left( \frac{n}{1.486} \right)^2 \frac{Q|U|}{AR^{3/4}} \quad (6)$$

Gdje je:

$S_f$  - linijski gubitci

$n$  - Manning-ov koeficijent hrapavosti

$Q$  - protok

$U$  - brzina protoka

$A$  - površina kanala/cijevi

$R$  - hidraulički radijus protoka u kanalu/cijevi

Treba napomenuti da je broj 1.486 pretvorba za prijelaz iz SI u imperijalni sustav ( $m^{1/3}$  u  $ft^{1/3}$ ).

Hidraulički potencijal se može zapisati kao [22]:

$$H = Z + Y \quad (7)$$

Gdje je:

$H$  - hidraulički potencijal

$Z$  - visina od dna kanala/cijevi

$Y$  - dubina protoka

Supstitucijom prethodnog izraza u jednadžbu (5) i zapisivanjem  $\partial Z/\partial x = -S_o$  dobije se [kw]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial Y}{\partial x} = gA(S_o - S_f) \quad (8)$$

Gdje je:

$Q$  - protok

$t$  - vrijeme  
 $A$  - površina kanala/cijevi  
 $x$  - udaljenost/put  
 $g$  - ubrzanje sile teže  
 $Y$  - dubina protoka  
 $S_0$  - nagiba kanala/cijevi  
 $S_f$  - linijski gubitci

Pod pretpostavkom da je lijeva strana jednadžbe (8) zanemariva [22]:

$$S_0 = S_f \quad (9)$$

Gdje je:

$S_0$  - nagiba kanala/cijevi  
 $S_f$  - linijski gubitci

Pomoću Manning-ove jednadžbe supstitucijom u jednadžbu (9) dobije se izraz za protok [22]:

$$Q = \frac{AR^{2/3}\sqrt{S_0}}{n} \quad (10)$$

Gdje je:

$A$  - površina kanala/cijevi  
 $R$  - hidraulički radijus protoka u kanalu/cijevi  
 $S_0$  - nagiba kanala/cijevi  
 $n$  - Manning-ov koeficijent hrapavosti

### 4.3. Hidraulički proračun kišnog vrta – GIFMod

Prema GIFModovom priručniku ovisno o vrstama blokova koriste se sljedeće jednačbe za provođenje hidrauličkog modeliranja [19].

Za nezasićeni tok GIFMod koristi Van Genuchten-Maulem-ovu jednačbu [19]:

$$Q_{i,j} = A_s K_e \frac{h_i - h_j}{d} \quad (11)$$

Gdje je:

$Q_{i,j}$  - protok od bloka  $i$  do bloka  $j$

$A_s$  - površina bloka

$K_e$  - efektivna hidraulička provodljivost

$h$  - hidraulički potencijal

$d$  - efektivna udaljenost između dva bloka

Efektivna hidraulička provodljivost dana je sljedećom jednačbom [19]:

$$K_e = K_s s_e^\lambda \left[ 1 - \left( 1 - s_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (12)$$

Gdje je:

$K_e$  - efektivna hidraulička provodljivost

$K_s$  - saturirana hidraulička provodljivost

$s_e$  - relativna vlažnost

$\lambda$  - Van Genuchten  $\lambda$  parametar

$m$  - Van Genuchten  $m$  parametar

Jednačba relativne vlažnosti je [19]:

$$s_e = (\theta_s - \theta)(\theta_r - \theta_s) \quad (13)$$

Gdje je:

$s_e$  - relativna vlažnost

$\theta_s$  - saturirana vlažnost

$\theta$  - vlažnost

$\theta_r$  - rezidualna vlažnost

Za protok kroz zasićene porozne medije i podzemne retencijske blokove koristi se Darcy-eva jednadžba [19]:

$$Q_{i,j} = A_s K_s \frac{h_i - h_j}{d} \quad (14)$$

Gdje je:

$Q_{i,j}$  - protok od bloka  $i$  do bloka  $j$

$A_s$  - površina bloka

$K_s$  - Saturirana hidraulička provodljivost

$h$  - hidraulički potencijal

$d$  - efektivna udaljenost između dva bloka

Za protok svih komponenti površinske vode koristi se jednadžba difuznog vala/Manning-ova [19]:

$$Q_{i,j} = n_m y^{-1+\alpha_m} \left( \frac{h_i - h_j}{d} \right)^{1/2} \quad (15)$$

Gdje je:

$Q_{i,j}$  - protok od bloka  $i$  do bloka  $j$

$n_m$  - Manningov koeficijent hrapavosti

$y$  - hidraulički radijus

$\alpha_m$  - eksponent hidrauličkog radijus (2/3 za blokove jezera i potoka, 1/2 za površinsko otjecanje)

$h$  - hidraulički potencijal

$d$  - efektivna udaljenost između dva bloka

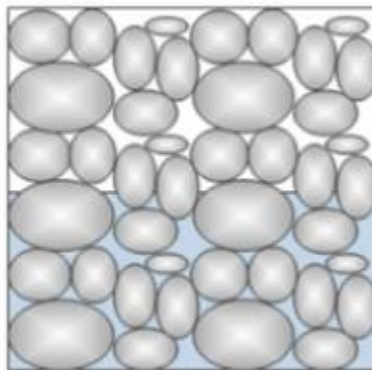
Koje će se jednađbe koristiti ovisi o vrstama blokova i na kojoj se visini nalaze; dva bloka iste vrste spojena konektorom, npr. dva bloka saturiranog tla koristiti će Darcy-evu jednađbu. Ako su dva bloka spojena konektorom, različitih vrsta, GIFMod će tipično koristiti pripadajuću jednađbu bloka na većoj visini/razini ili neće dodijeliti vladajuću jednađbu ovisno o vrsti blokova. Tablica 1 prikazuje kako GIFMod dodjeljuje vladajuće jednađbe ovisno o visinama i vrstama blokova [19].

Tablica 1: Vladajuće jednađbe između blokova u GIFModu (VGM – Van Genuchten-Maulem, ND – nije dodijeljeno, DVM – Difuzni val/Manning) (prema [19])

niži/viši blok	Nesaturirano tlo	Površinska retencija	Podzemna retencija	Površinski tok	Saturirano tlo	Segment potoka
Nesaturirano tlo	VGM	VGM	VGM	VGM	VGM	VGM
Površinska retencija	ND	DVM	Darcy	DVM	Darcy	DVM
Podzemna retencija	VGM	Darcy	Darcy	ND	Darcy	ND
Površinski tok	ND	ND	ND	DVM	ND	ND
Saturirano tlo	VGM	Darcy	Darcy	ND	Darcy	Darcy
Segment potoka	ND	DVM	ND	DVM	ND	DVM

U sljedećim primjerima (slike 17 – 22) prikazano je kako GIFMod računa hidraulički potencijal ovisno o korištenoj vrsti bloka [19].

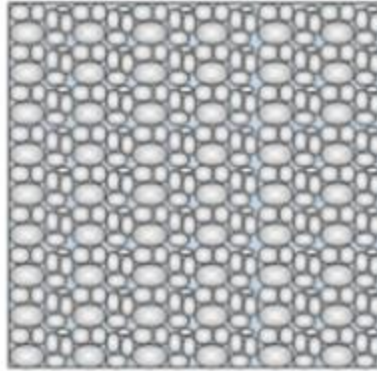
Podzemna retencija



Slika 17: Blok podzemne retencije (prema [19])

$$h = \frac{S}{A_s \theta_s} - \frac{\epsilon}{s_e^{n_e}} + pos(\theta - \theta_s) / S_s \quad (16)$$

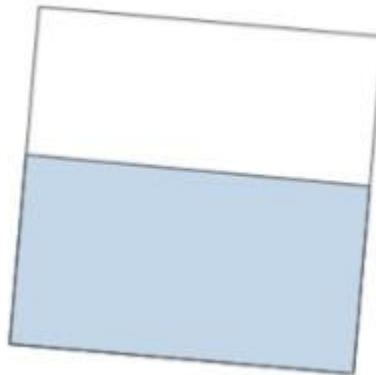
Saturirano tlo



Slika 18: Blok saturiranog tla (prema [19])

$$h = h_0 + \frac{\theta - \theta_s}{S_s} \quad (17)$$

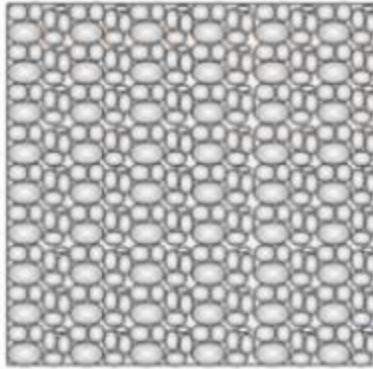
Površinska retencija



Slika 19: Blok površinske retencije (prema [19])

$$h = z_0 + \frac{S}{A_s} \quad (18)$$

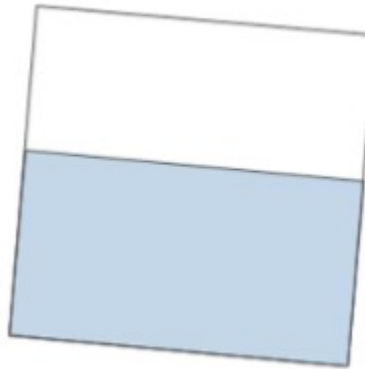
### Nesaturirano tlo



Slika 20: Blok nesaturiranog tla (prema [19])

$$h = z_0 - \frac{H(\theta_s - \theta)}{\alpha} (s_e^{n/(1-n)} - 1)^{1/n} + pos(\theta - \theta_s)/S_s \quad (19)$$

### Segment potoka



Slika 21: Blok potoka (prema [19])

$$h = z_0 + \frac{S}{A_s} \quad (20)$$



### Površinski tok



Slika 22: Blok površinskog toka (prema [19])

$$h = z_0 + \frac{S}{A_s} \quad (21)$$

Gdje je:

$h$  - hidraulički potencijal

$S$  - kapacitet retencije

$A_s$  - površina bloka

$\theta_s$  - saturirana vlažnost

$\epsilon$  - parametar usisnog potencijala retencije

$s_e$  - relativna vlažnost

$n_e$  - snaga usisnog potencijala pri uvjetima niske vlažnosti retencijskih blokova

$\text{pos}()$  -  $\text{pos}(x) = x$  ako je  $x > 0$ , inače = 0

$\theta$  - vlažnost

$S_s$  - storativnost

$z_0$  - razina dna bloka

$H()$  – Heaviside funkcija

$\alpha$  - Van Genuchten  $\alpha$  parametar

$n$  - Van Genuchten  $n$  parametar

Konektori koji predstavljaju preljevnu i drenažnu cijev odabrani su kao cijevi (eng. pipe). Za cijevi GIFMod koristi Hazen-Williams-ovu jednadžbu za računanje protoka (pretpostavka da cijev nije pod tlakom) [19]:

$$Q_{i,j} = k_{hw} \pi C \left( \frac{D_p}{2} \right)^{2.63} \operatorname{sgn}(h_i - h_j) \left( \frac{\max(h_i, z_{c,i}) - \max(h_j, z_{c,j})}{d} \right)^{0.54} f_{hw}(\bar{y}_{pipe}) \quad (22)$$

Gdje je:

$Q_{i,j}$  - protok od bloka  $i$  do bloka  $j$

$k_{hw}$  - faktor jedinične pretvorbe za Hazen-Williams-ovu jednadžbu

$C$  - Hazen-Williams-ov koeficijent hrapavosti

$h$  - hidraulički potencijal

$D_p$  - promjer cijevi

$\operatorname{sgn}()$  -  $\operatorname{sgn}(x) = 1$  ako je  $x > 0$ , inače = -1

$z_c$  - razina dna cijevi

$d$  - efektivna udaljenost između dva bloka

$f_{hw}$  - Hazen-Williams-ova aproksimacija površine vode djelomično ispunjene cijevi

$\bar{y}_{pipe}$  - aproksimacija prosječne dubine vode u djelomično ispunjenoj cijevi

Aproksimacija površine vode djelomično ispunjene cijev izražena je jednadžbom [19]:

$$f_{hw}(x) = -2.0255x^4 + 1.9813x^3 + 1.0318x^2 + 0.0388x \quad (23)$$

Gdje je:

$f_{hw}$  - Hazen-Williams-ova aproksimacija površine vode djelomično ispunjene cijevi

Funkcije prosječne dubine vode dana je jednadžbom [19]:

$$y_{pipe} = \max\left(\frac{1}{2D_p}(h_i - z_{c,i} + h_j - z_{c,j}), 1\right) \quad (24)$$

Gdje je:

$y_{pipe}$  - aprokcimacija dubine vode u djelomično ispunjenoj cijevi

$D_p$  - promjer cijevi

$h$  - hidraulički potencijal

$z_c$  - razina dna cijevi

Za proračun evapotranspiracije GIFMod može koristiti više različitih modela; Penman-ov, Priestly-Taylor-ov, aerodinamički model ili modele transpiracije zasnovane na sadržaju vlage tla ili potencijala matrice tla. U ovom radu se koristila eksterna datoteka vremenske serije evapotranspiracije [19].

## 5. KRITERIJI ZA DIMENZIONIRANJE KIŠNIH VRTOVA

Kriteriji koji su se koristili pri dimenzioniranju kišnih vrtova preuzeti su iz priručnika odvodnje oborinskih voda New Yorka [4, 23], a sastoje se od sljedećih provjera:

1. Kontrola kvalitete oborinskih voda – kvaliteta vode postiže se separacijom i pročišćavanjem vode od onečišćujućih tvari/čestica. Padanje oborine nad urbaniziranim slivom i njeno otjecanje po urbaniziranoj površini iziskuje korištenje pravilno odabranih filtarskih slojeva kako bi se voda pročistila do odgovarajućeg standarda. Ovo je vrlo bitno kada se voda infiltrira u podzemlje i prihranjuje podzemnu vodu.

Zadovoljavanje ovog kriterija postiže se prihvaćanjem i pročišćavanjem volumena oborina 90-og percentila. Volumen otjecanja oborine 90-og percentila treba zadržati u sloju površinske retencije minimalno 24 sata, a otjecanje treba završiti do 48 sati.

2. Smanjenje otjecanja oborinske vode – svrha ovog kriterija je dovođenje količina površinskog otjecanja i infiltracije oborinske vode kao i za prirodno (neizgrađeno) stanje sliva. To se postiže prirodnim procesima (opisano u poglavlju 2.4.) i zadovoljavajućim funkcioniranjem kišnog vrta.

Ovaj kriterij se zadovoljava kao i 1.kriterij; prihvaćanjem, zadržavanjem i infiltriranjem 90% svih 24-satnih oborina.

3. Zaštita sustava odvodnje oborinskih voda – ovaj kriterij traži zaštitu sustava odvodnje sprječavanjem erozije površine te odgovarajućim standardom funkcioniranja sustava odvodnje oborinskih voda.

Ovaj kriterij se postiže osiguranjem produljenog zadržavanja oborine u kišnom vrtu projektnih pljusкова povratnih perioda 1 godine. Produljenim zadržavanjem misli se na 24-satnu udaljenost težišta ulaznog i izlaznog hidrograma ili prihvata cjelokupnog volumena oborine (potpuna infiltracija volumena u kišnom vrtu).

4. Smanjenje površinskog otjecanja – cilj ovog kriterija jest smanjiti broj poplavnih događaja i njihov intenzitet (vršne vrijednosti) uzrokovanih izgradnjom (urbanizacijom) sliva. Pod ovim misli se na jake oborinske događaje koji prelaze projektirani kapacitet sustava odvodnje.

Postizanje ovog kriterija svodi se na prihvaćanje, zadržavanje i ispuštanje oborine mjerodavnog projektnog pljuska povratnog perioda 10 godina sa ograničenjem vršnog protoka izlaznog hidrograma na razinu vršnog protoka sliva u prirodnom stanju.

5. Ublažavanje poplava izazvanih ekstremnim oborinama – svrha ovog kriterija je ublažiti posljedice izazvane događajima ekstremnih oborina; sprječavanje šteta od poplava, zaštita infrastrukture.

Kriterij se postiže ograničavanjem vršnog protoka izlaznog hidrograma oborine mjerodavnog projektnog pljuska 100 godišnjeg povratnog perioda na razinu vršnog protoka sliva u prirodnom stanju.

## 6. MODELIRANJE KIŠNIH VRTOVA

Ovo poglavlje će detaljnije objasniti korake metodologije navedene u 4. Poglavlju.

### 6.1. Karakteristike područja

U prvom koraku modeliranje kišnih vrtova započeto je odabirom područja sliva. Korišten je program QGIS te „Google Satellite Plugin“. Odabran je dio parkirališta i prometnice trgovine Lidl-a grada Poreča površine 1000 m<sup>2</sup> (duljine 100 m i širine 10 m), nagiba od 1%. Na sljedećim slikama (23 – 26) prikazano je odabrano područje i pripadajuća površina u različitim razinama.



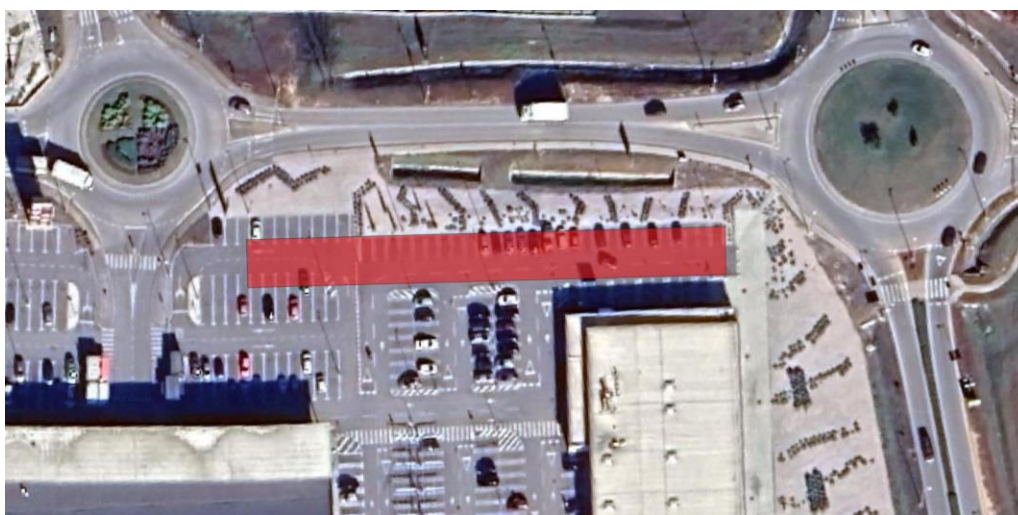
Slika 23: Prikaz grada Poreča na karti Hrvatske (preuzeto programom Google Earth Pro)



Slika 24: Prikaz odabranog područja na karti Poreča (preuzeto programom Google Earth Pro)



Slika 25: Odabrano slivno područje, trgovina Lidl, grad Poreč [24]



Slika 26: Tlocrtni prikaz odabrane slivne površine (preuzeto programom Google Earth Pro)

## 6.2. Klimatološke karakteristike Poreča i dostupne meteorološke podloge

Opće klimatološke karakteristike grada Poreča opisane su u dokumentu strateške prilagodbe klimatskih promjena Poreča [25] kao:

- plodno tlo, pretežito crvenica sa kamenjem, dobro za poljoprivredu (žitarice, maslinici, vinogradi, voćnjaci i povrtnjaci),
- temperatura mora do 28 °C sa 3850 sunčanih sati na godinu,
- prosječna najveća oborina 300 mm u jesen, najmanja 178 mm u proljeće (razdoblje 1981. – 2015.), sa pozitivnim trendom rasta osim u ljeto (blagi pad),
- trendovi smanjenja trajanja sušnih razdoblja zimskog i jesenskog razdoblja,
- trend porasta vlažnih indeksa ekstrema, blago smanjenje ljeti.

Također, klimatološke značajke grada Poreča opisane su i elaboratu zaštite okoliša odvodnje naselja Baderna od strane komunalnog društva Odvodnja Poreč [26]:

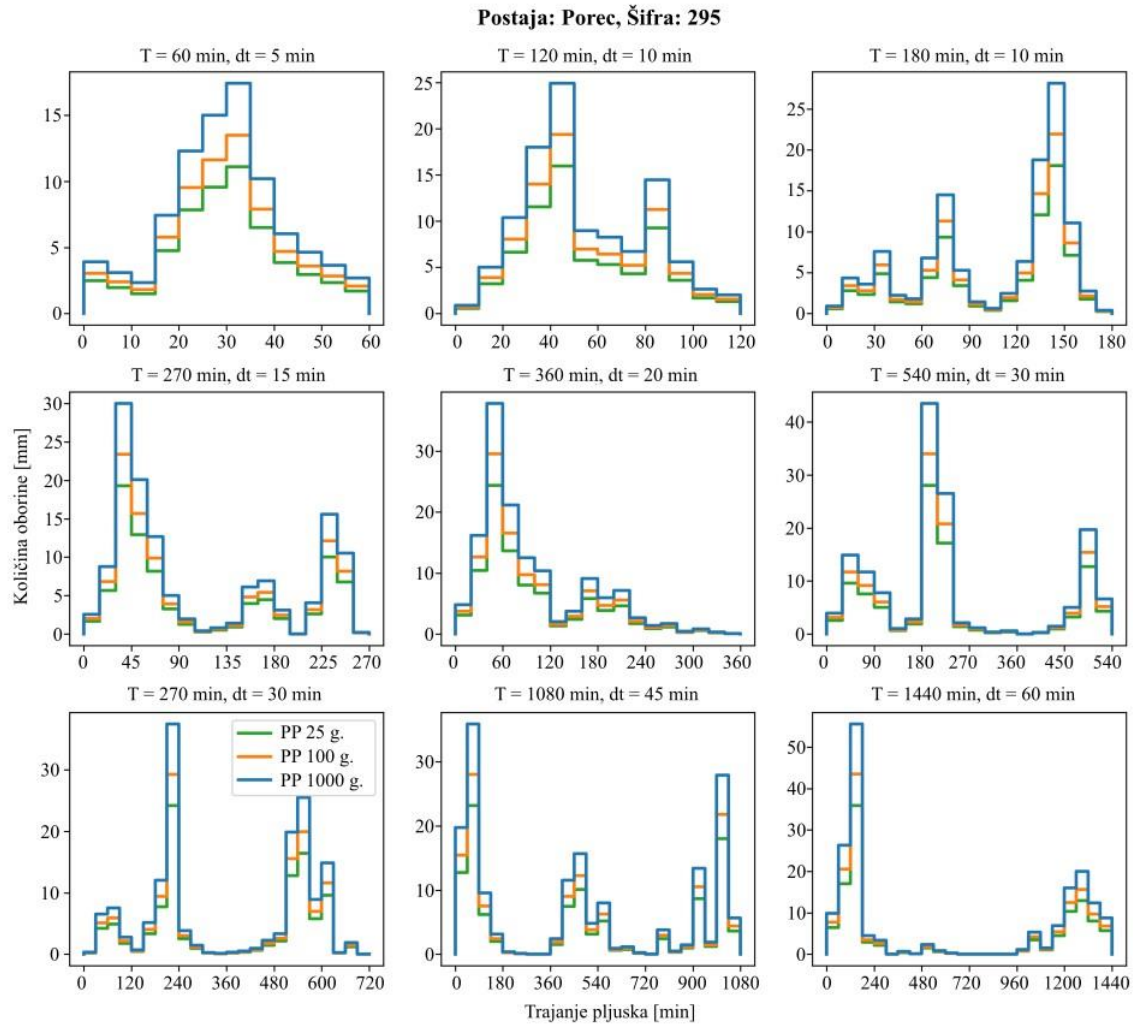
- najniža srednja temperatura u siječnju od 4.9 °C, a najviša srednja temperatura u kolovozu iznosi 22 °C, srednja godišnja temperatura 13.4 °C,
- prosječno 25 dana mraza u godini sa srednjom temperaturom nižom od 0 °C te prosječno 33 topla dana sa srednjom temperaturom višom od 25 °C,
- mediteranska klima (temperatura iznad 10 °C tijekom 8 mjeseci godišnje),
- za razdoblje od 1990. – 1997. prosječne mjesečne oborine u rujnu, listopadu i studenom veće od 100 mm, najsuši periodi u veljači i ožujku sa prosječnom oborinom od 40 mm,
- srednja godišnja oborina za razdoblje od 30 godina iznosi 710 mm.

Podaci o oborinama u vidu HTP krivulja i projektnog pljuska preuzeti su iz projekta STREAM u kojem su se analizirale opasnosti i rizici od poplava na području Poreča [27]. Podaci o evapotranspiraciji preuzeti su iz Copernicus Climate Change baze podataka [28].

Dostupni ulazni podatci u vidu meteoroloških podloga bili su dugogodišnji nizovi podataka za oborine i evapotranspiraciju grada Poreča, projektni pljuskovi sa postaje Poreč (šifra 295) za povratne periode (2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 i 1000 godina; za trajanja 60, 120,

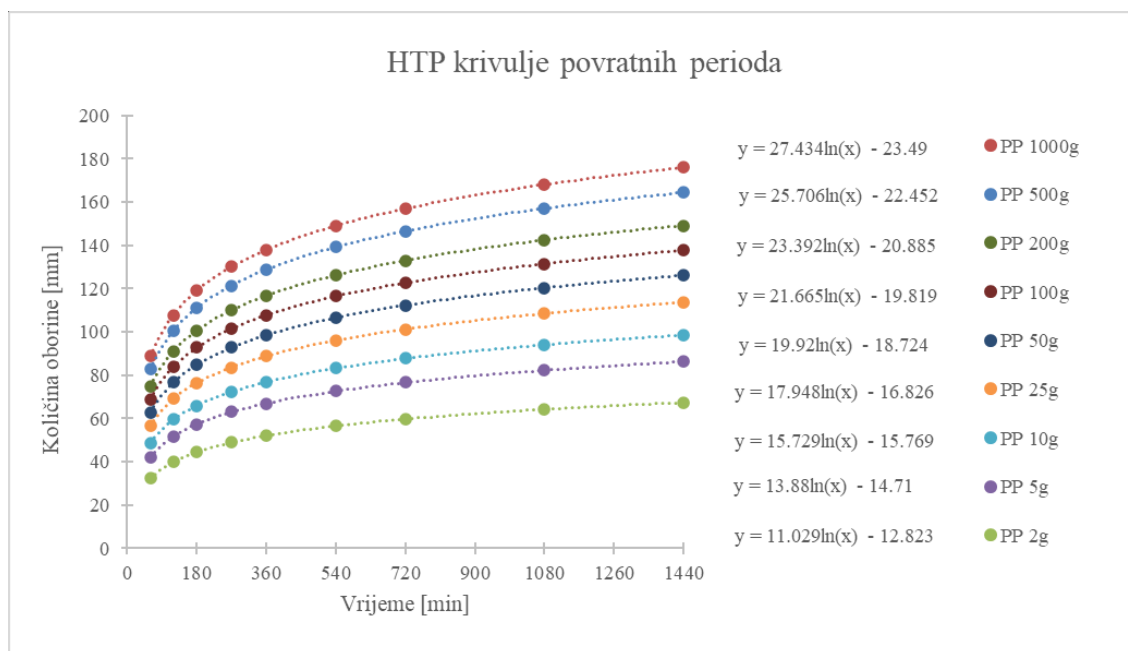


180, 270, 360, 540, 720, 1080 i 1440 minuta). Na slici 27 je prikazan primjer projektnih pljuskova.



Slika 27: Primjer projektnih pljuskova [27]

U drugom koraku su u Excelu pripremljene datoteke vremenskih serija za dane projektne pljuskove. Vremenske serije su izrađene za povratne periode od 1, 10 i 100 godina. Za projektni period od 1 godine HTP krivulja je dobivena pomoću HTP krivulja (izrađenih sa podataka projektnih pljuskova) svih ostalih danih povratnih perioda kao što je prikazano na slici 28.

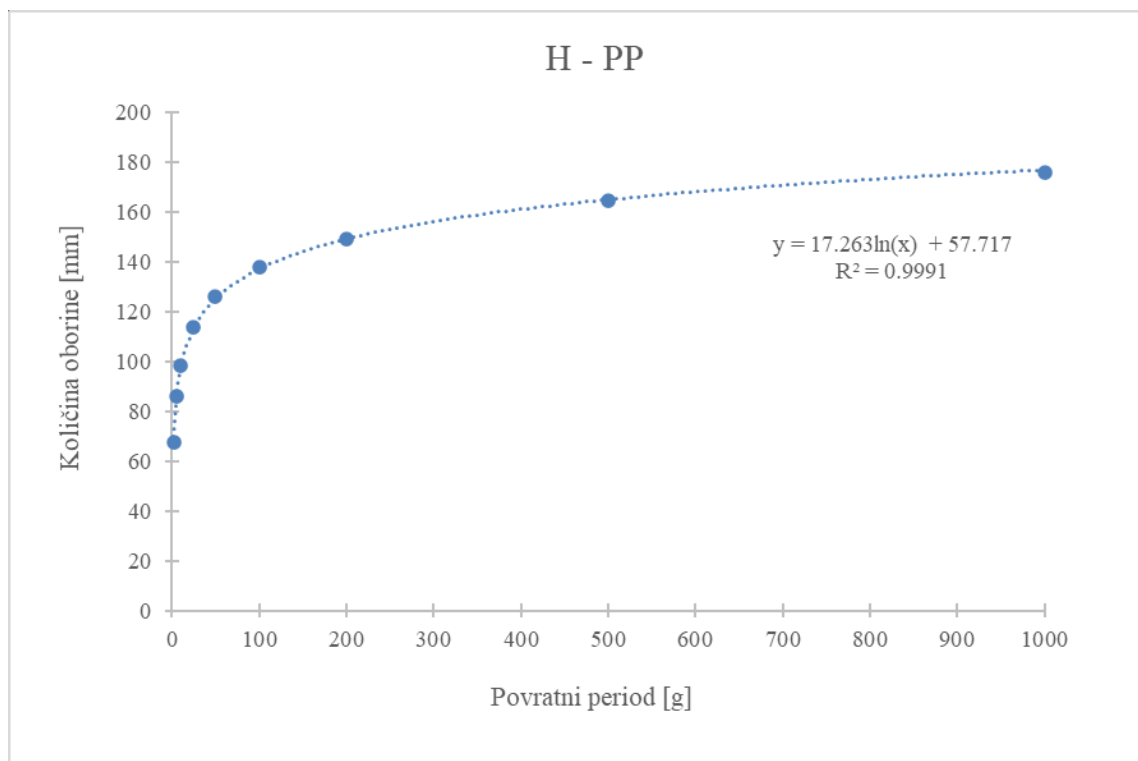


Slika 28: HTP krivulje različitih povratnih perioda s pripadajućim funkcijama

Sa funkcijama različitih povratnih perioda izrađene su krivulje gdje se ovisno o trajanju projektnog pljuska dobila krivulja količine oborina i povratnog perioda, kao što je prikazano slikom 29 i tablicom 2.

Tablica 2: Količine oborina za pripadajuće povratne periode i trajanje pljuska

t [min]	1440								
PP [g]	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
H [mm]	67.38428	86.23089	98.61855	113.699	126.1422	137.7375	149.2309	164.4923	176.021

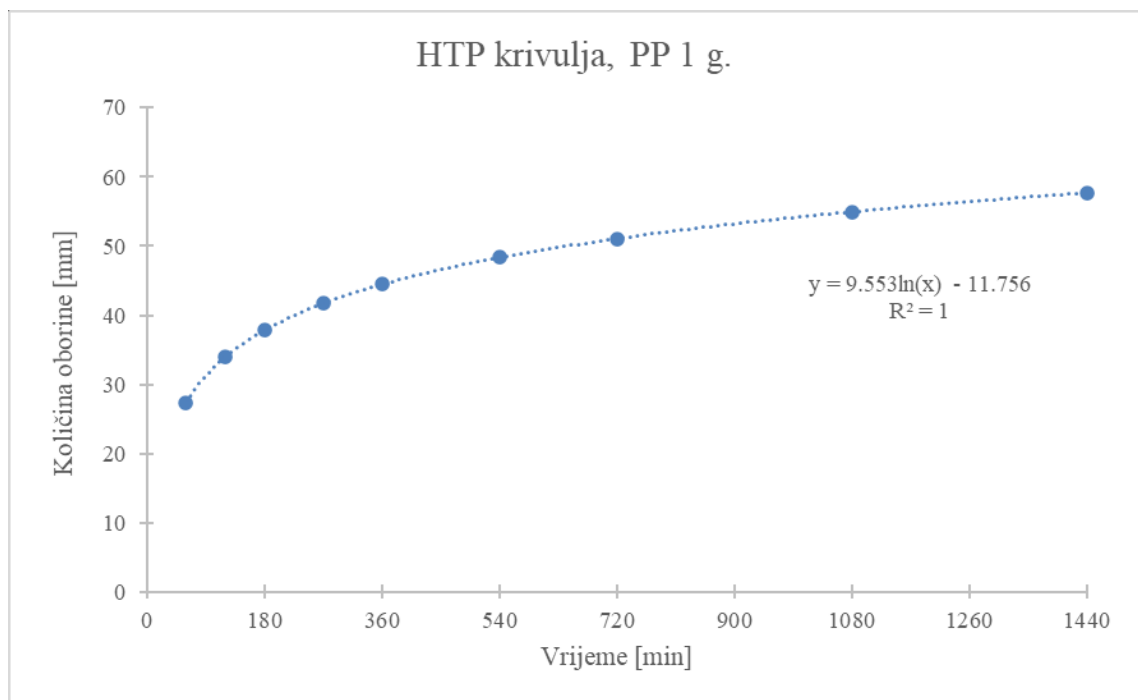


Slika 29: H – PP krivulja za trajanje pljuska od 1440 min

Izrađene su krivulje za sva trajanja pljuskova i pomoću funkcija dobivene količine oborine povratnog perioda 1 godine za sva trajanja kao što je prikazano u tablici 3 i slici 30.

Tablica 3: Količine oborina za različita trajanja pljuska povratnog perioda 1 godine

PP [g]	t [min]	H [mm]
1	60	27.357
	120	33.979
	180	37.852
	270	41.726
	360	44.474
	540	48.347
	720	51.096
	1080	54.969
	1440	57.717



Slika 30: HTP krivulja povratnog perioda 1 godine

Po uzoru na povratno razdoblje od 2 godine, izrađena je tablica raspodjele projektnih pljuskova (korišteni su jednaki koeficijenti za raspodjelu oborine).

Izrađene su tablice vremenskih serija projektnih pljuskova za povratne periode 1, 10 i 100 godina za trajanja pljuskova 60, 120, 180, 270, 360, 540, 720, 1080 i 1440 minuta (tablica 4). Također, izrađena je 24-satna vremenska serija jednolikog intenziteta 90-og percentila dugogodišnjeg niza oborina za područje grada Poreča i vremenska serija dugogodišnjeg niza oborina grada Poreča.

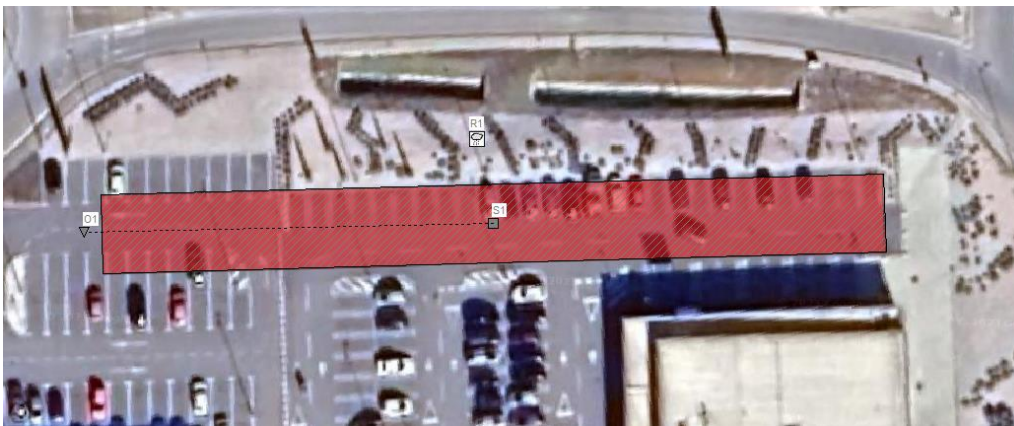
Vremenske serije su ispisane u SWMM-ovom uređivaču vremenskih serija u 2 stupca; u lijevom se nalazi vremenski inkrement, a u desnom pripadajuća količina oborine u milimetrima. U tablici 4 prikazan je primjer formata vremenske serije.

Tablica 4: Vremenska serija kiše trajanja 60 min povratnog perioda 1 godine

60min	
0:05	1.45
0:10	0.84
0:15	1.76
0:20	2.26
0:25	5.00
0:30	6.01
0:35	4.01
0:40	3.02
0:45	0.64
0:50	0.76
0:55	1.06
1:00	0.54

### 6.3. Hidraulički model otjecanja

U trećem koraku u SWMM-u je modelirano slivno područje za prirodno i postojeće stanje kao što je prikazano na slici 31. Modeliranje je provedeno SCS metodom odabirom CN krivulja za pripadajuće površine, a u tablici 5 su ispisane karakteristike geometrijske karakteristike slivne površine.



Slika 31: Prikaz površine modelirane u SWMM računalnom programu

Tablica 5: Karakteristike slivne površine

Karakteristike slivne površine			
Površina [ha]	Duljina [m]	Širina [m]	Nagib
0.1	100	10	1%

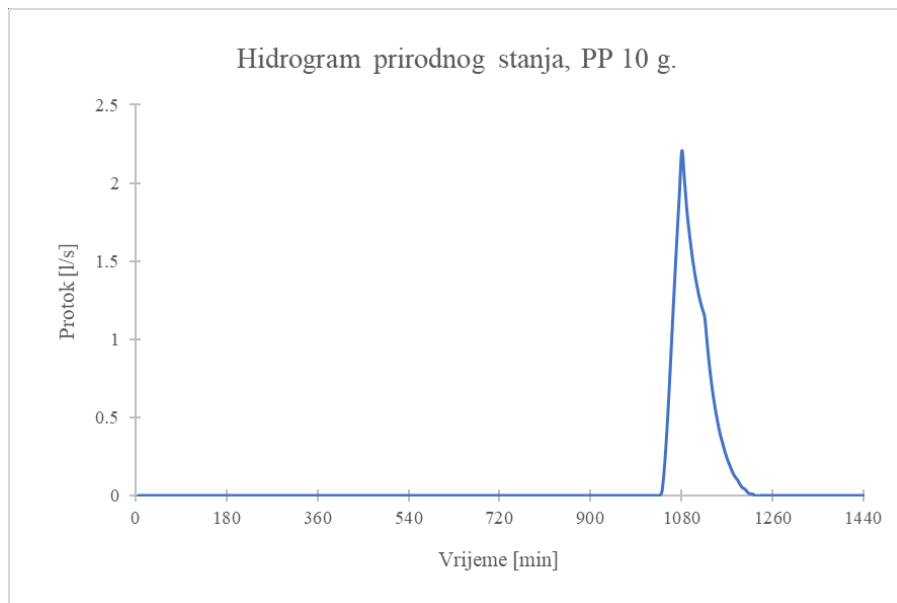
Tablica 6 prikazuje odabrane CN brojeve, kapacitet tla za upijanje ( $d$ ) i početne gubitke ( $F_0$ ) za prirodno i urbanizirano stanje površine (u poglavlju 4.2. oznake su bile  $S$  i  $Ia$ ).

Tablica 6: Parametri slivnih površina

Vrsta površine	CN broj	$d$ [mm]	$F_0$ [mm]
Prirodno stanje	65	136.77	27.35
Prometnica i parking	98	5.18	1.04

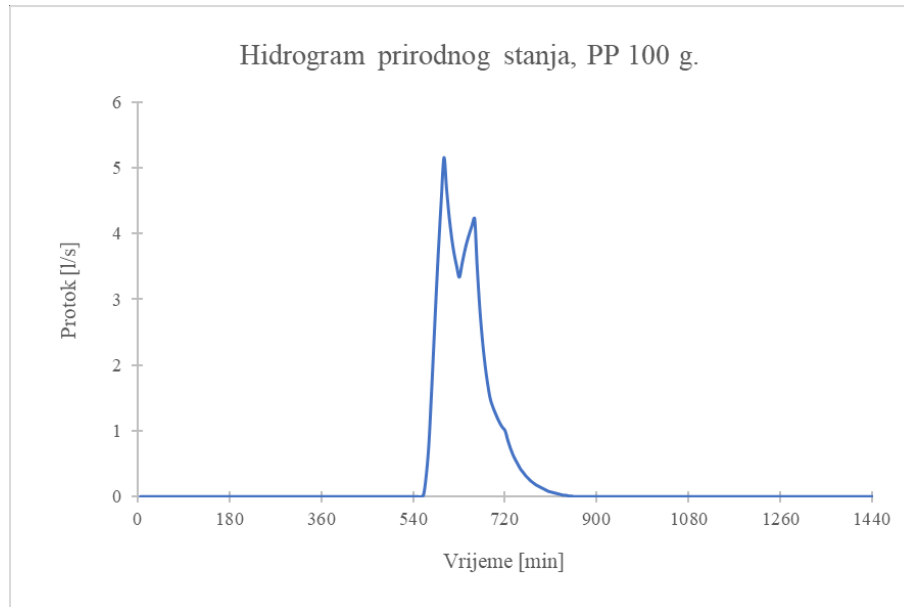
Provedene su simulacije u svrhu računanja dotoka sa sliva za povratne periode 1, 10 i 100 godina sa urbanizirane površine (rezolucija vremenskog koraka 1 minuta), za povratne periode 10 i 100 godina sa prirodne površine (rezolucija vremenskog koraka 5 minuta), za dugogodišnji niz oborina grada Poreča (rezolucija vremenskog koraka 1 sat) te dotok 24-satne oborine 90-og percentila (rezolucija vremenskog koraka 1 minuta).

U četvrtom koraku rezultati simulacija su hidrogrami dotoka koji su se obradili u Excelu te koristili u GIFMod računalnom programu za modeliranje dotoka u kišnom vrtu. Slike 32 i 33 prikazuju hidrograme za prirodno stanje površine (provedene simulacije za sva trajanja do 1440 minuta – odabrani mjerodavni projektni pljuskovi koji uzrokuju maksimalne protoke).



Slika 32: Hidrogram prirodnog stanja slivne površine povratnog perioda 10 godina

Vršni protok iznosi 2.5 l/s dostignut je u 1080-oj minuti za trajanje oborine 1080 minuta.



Slika 33: Hidrogram prirodnog stanja slivne površine povratnog perioda 100 godina

Vršni protok iznosi 5.5 l/s dostignut je u 600-oj minuti za trajanje oborine 720 minuta.

Ostale vremenske serije su obrađene u Excelu za unos u GIFMod kao eksterne tekstualne datoteke (.txt). Korišteni formati su zarezom odvojeni podaci u dva ili tri stupca; za dotok i evapotranspiraciju se koriste dva stupca, u lijevom su zapisani vremenski inkrementi u decimalnom obliku, a u desnom protoci u  $m^3/dan$  (slika 34).

```
0.000694444444444444,0  
0.00138888888888889,0  
0.00208333333333333,0  
0.00277777777777777,0  
0.00347222222222222,0  
0.00416666666666666,0  
0.00486111111111111,0  
0.00555555555555555,0  
0.00625,0  
0.00694444444444444,0
```

Slika 34: Primjer djela tekstualne datoteke vremenske serije dotoka u kišni vrt

Za generiranje pljuska nad kišnim vrtom koriste se vremenske serije projektnih pljuskova u tri stupca (slika 35); prva dva označuju vremenske inkremente (od – do), a treći količinu oborina u milimetrima (njezinu visinu po cijeloj površini vrta).

```
0,0.0034722222222222,0.00144831176470588  
0.0034722222222222,0.0069444444444444,0.000838496284829721  
0.0069444444444444,0.0104166666666667,0.00176168916408669  
0.0104166666666667,0.0138888888888889,0.00226139907120743  
0.0138888888888889,0.0173611111111111,0.00499709907120743  
0.0173611111111111,0.0208333333333333,0.00601345820433437  
0.0208333333333333,0.0243055555555555,0.00401461857585139  
0.0243055555555555,0.0277777777777778,0.00302366842105263
```

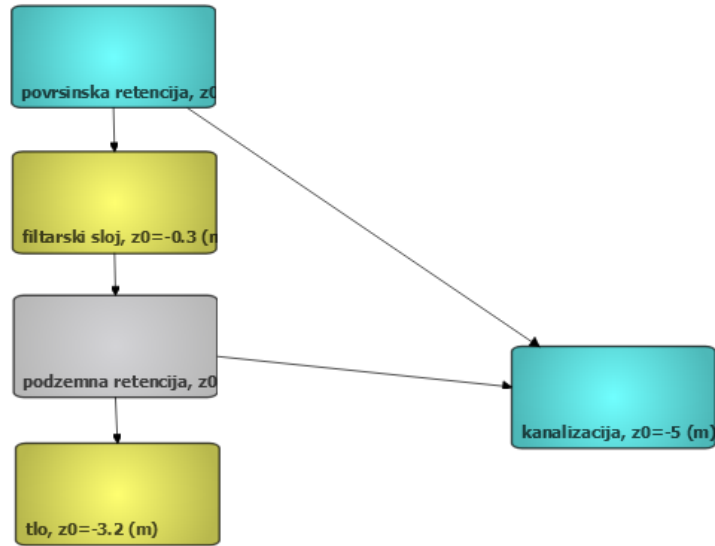
Slika 35: Primjer djela tekstualne datoteke vremenske serije oborine nad kišnim vrtom

#### 6.4. Hidraulički proračun kišnog vrta

U petom koraku kišni vrtovi u GIFModu su se modelirali s obzirom na nekoliko različitih propusnosti materijala filtarskog sloja i prirodnog tla ispod drenažnog sloja. Modeli 2 – 7 su bili dimenzionirani s obzirom na 6 različitih vrijednosti hidrauličkih provodljivosti; tri za filtarske slojeve i tri za prirodno tlo, za modele 2, 3 i 4 koristile su se vrijednosti tri različitih propusnosti filtarskog sloja i srednja vrijednost propusnosti (od tri propusnosti prirodnih tla) prirodnog tla i obratno za modele 5, 6 i 7. Model 1 je dimenzioniran za provođenje analiza osjetljivosti. Sami vrtovi bili su koncipirani u najosnovnijem obliku; retencijski sloj, filtarski sloj, drenažni sloj i prirodno tlo ispod te drenažna i preljevna cijev. Za modeliranje nisu se koristile biljke i vegetacije te podzemna voda ispod tla. Za dimenzioniranje provedene su analize projektnih pljuskova generirane vremenskim serijama dotoka sa sliva i projektnog pljuska nad površinom kišnog vrta (za dimenzioniranje nije modelirana evapotranspiracija). Rezolucije vremenskih koraka za dimenzioniranje i analize osjetljivosti bile su 1 minute. Nakon dimenzioniranja kišnog vrta prema kriterijima navedenim u poglavlju 5. za svaki kišni vrt se provela simulacija za dugogodišnji niz oborina u gradu Poreču; ova simulacija je uključivala vremensku seriju dugogodišnjeg niza evapotranspiracije, vremensku seriju dugogodišnjeg niza oborina i



vremensku seriju dugogodišnjeg niza dotoka u kišni vrt izrađene u prethodnim koracima. Na slici 35 prikazan je primjer jednog od dimenzioniranih modela kišnih vrtova.



Slika 36: Primjer modela kišnog vrta u GIFMod računalnom programu

U šestom koraku rezultatni hidrografi iz GIFModa i SWMM-a korišteni su za izradu grafova rezultata i tablice analiza osjetljivosti u Excelu te popratne tablice parametara kišnih vrtova.

## 7. DIMENZIONIRANJE KIŠNIH VRTOVA

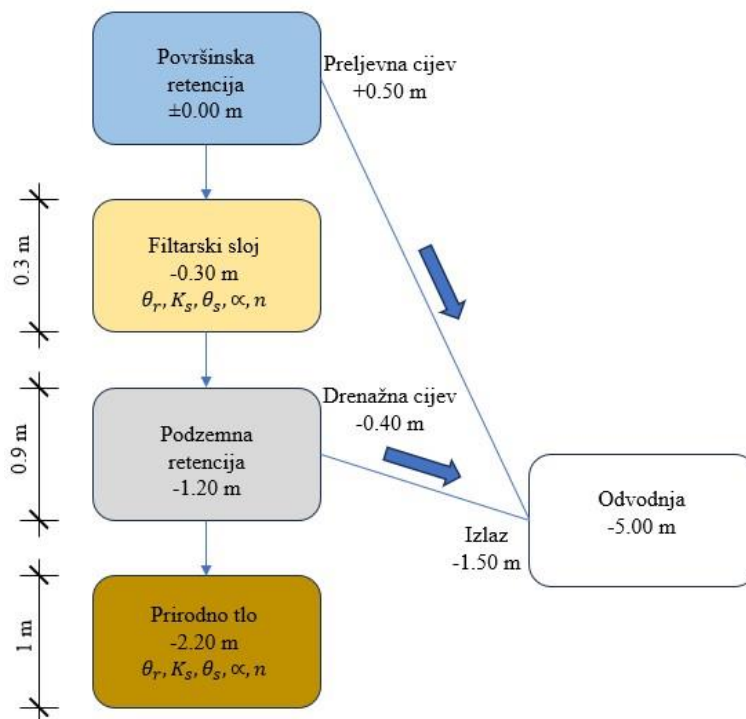
U ovom poglavlju biti će opisani dimenzionirani modeli svakog kišnog vrta, parametri korištenih materijala te njihove geometrijske karakteristike (tablica 7).

Tablica 7: Geometrija i parametri propusnosti dimenzioniranih kišnih vrtova

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7
<b>Geometrija</b>							
Površina kišnog vrta [m <sup>2</sup> ]	100	100	110	130	110	110	110
Razina površinske retencije [m]	±0.00	±0.00	±0.00	±0.00	±0.00	±0.00	±0.00
Razina filtarskog sloja [m]	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30
Razina podzemne retencije [m]	-1.30	-2.20	-1.50	-1.20	-2.20	-1.70	-1.50
Razina prirodnog tla [m]	-2.30	-3.20	-2.50	-2.20	-3.20	-2.70	-2.50
Razina preljevne cijevi [m]	+0.65	+0.40	+0.50	+0.50	+0.50	+0.50	+0.50
Razina drenažne cijevi [m]	-0.40	-1.10	-0.40	-0.40	-0.40	-0.40	-0.40
Promjer preljevne cijevi [m]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Promjer drenažne cijevi [m]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
<b>Filtarski sloj_propusnost</b>							
$\theta_r$	Pjeskovita Ilovača	0.05	0.06	0.05	0.053	0.053	0.053
$K_s$ [m/dan]		3	1.5	1	1.833	1.833	1.833
$\theta_s$		0.34	0.35	0.29	0.327	0.327	0.327
$\alpha$ [m <sup>-1</sup> ]		3.2	3.1	2.9	3.067	3.067	3.067
n		2.7	2.1	1.9	2.233	2.233	2.233
<b>Prirodno tlo_propusnost</b>							
$\theta_r$	Glina	0.046	0.046	0.046	0.02	0.05	0.068
$K_s$ [m/dan]		0.085	0.085	0.085	0.15	0.07	0.036
$\theta_s$		0.273	0.273	0.273	0.15	0.29	0.38
$\alpha$ [m <sup>-1</sup> ]		2.233	2.233	2.233	3	2.9	0.8
n		1.263	1.263	1.263	1.5	1.2	1.09

Model 1 je kišni vrt dimenzioniran za provođenje analize osjetljivosti na parametre kišnog vrta. Za razliku od ostalih modela pri modeliranju se nije pazilo na same dimenzije kišnog vrta i koristile su se predefinirane vrijednosti propusnosti filtarskog sloja i prirodnog tla dane u GIFMod računalnom programu za materijale pjeskovite ilovače (eng. sandy loam) i gline (eng. clay). Provođenje analiza osjetljivosti provodilo se u svrhu dobivanja znanja o tome kako će promjene parametara utjecati na zadovoljavanje kriterija dimenzioniranja te stručnosti kako bi se moglo provoditi dimenzioniranje kišnih vrtova optimalnih dimenzija.

Ostalih šest modela dimenzionirano je s obzirom na odabrane parametre propusnosti filtarskog sloja i prirodnog tla. Za modele 2, 3 i 4 odabrane su propusnosti filtarskog sloja s obzirom na vrijednosti hidrauličke provodljivosti ( $K_s$ ); model 2 ima najveću, model 3 srednju i model 4 najmanju vrijednost provodljivosti. Također, za modele 5, 6 i 7 odabrane su propusnosti prirodnog tla s obzirom na vrijednosti hidrauličke provodljivosti ( $K_s$ ); model 5 ima najveću, model 6 srednju i model 7 najmanju vrijednost provodljivosti. U modelima 2, 3 i 4 odabrani su jednaki parametri propusnosti prirodnog tla (srednje vrijednosti od tri odabrane propusnosti tla) i obratno, za modele 5, 6 i 7 odabrani su jednaki parametri propusnosti filtarskog sloja (srednje vrijednosti od tri odabrane propusnosti filtarskog sloja). Svi parametri propusnosti odabrani su prema radu koji se bavio djelovanjem pristupa razvoja smanjenog negativnog utjecaja [29]. Modeliranje prema propusnostima provodilo se u svrhu dobivanja slike o utjecaju propusnosti materijala na dimenzioniranje kišnog vrta. Očekivalo se da će veće propusnosti filtarskog sloja rezultirati kišnim vrtovima većih dimenzija te da će veće propusnosti prirodnog tla rezultirati vrtovima manjih dimenzija. Na slici 37 prikazan je primjer sheme jednog kišnog vrta (Model 4).



Slika 37: Shema kišnog vrta

## 8. REZULTATI

U ovom poglavlju biti će prikazani i ukratko opisani rezultati dimenzioniranih kišnih vrtova i analize osjetljivosti.

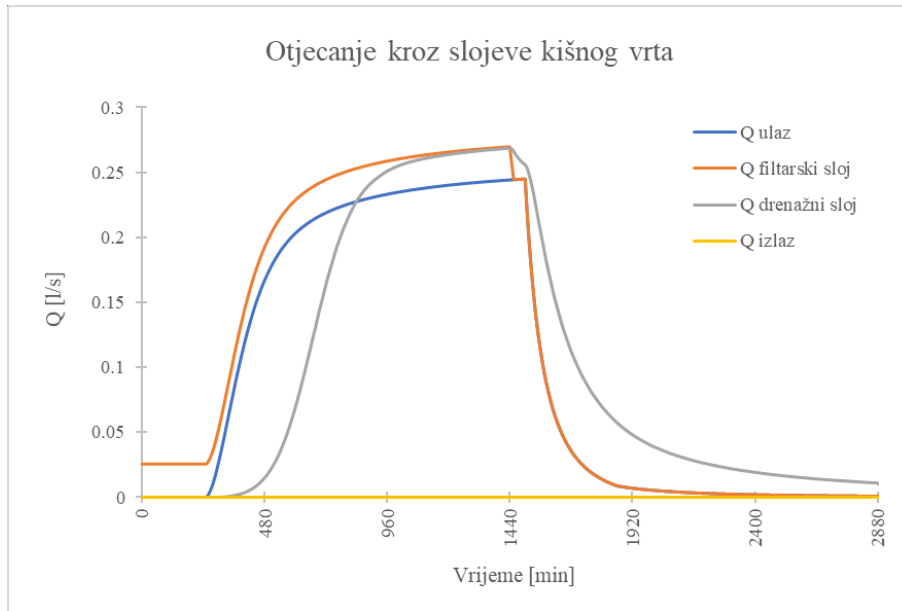
### 8.1. Model 1 – prikaz rezultata

U tablici 8 prikazana su rješenja simulacija projektnih pljuskova svih trajanja za Model 1 povratnih perioda 1, 10 i 100 godina. Ovi rezultati su se koristili za ispunjavanje kriterija 3., 4. i 5. Zelenom su označeni vršni protoci na izlazu iz kišnog vrta i razine vode u retencijskom sloju za mjerodavna trajanja projektnih pljuskova, a žutom bojom je označen odabrani projektni pljusak za provođenje analiza osjetljivosti.

Tablica 8: Analize razina vode i vršnih protoka projektnih pljuskova Modela 1

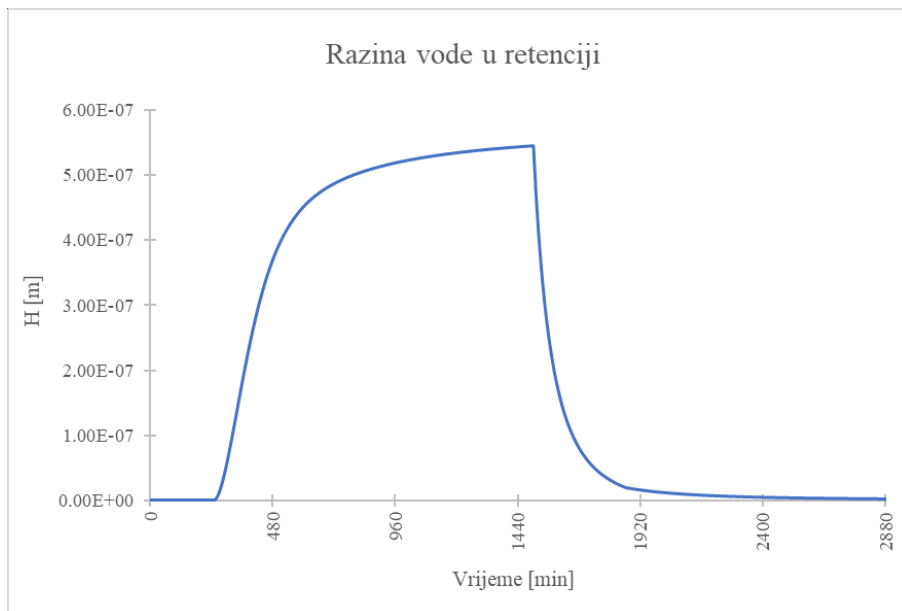
Trajanje pljuska [min]	Vršni protok PP 1 g. [l/s]	Razina vode [m]	Vršni protok PP 10 g. [l/s]	Razina vode [m]	Vršni protok PP 100 g. [l/s]	Razina vode [m]
60	0	0.14	0.00	0.33	0.61	0.52
120	0	0.191	0.06	0.41	0.36	0.43
180	0	0.223	0.60	0.47	2.71	0.68
270	0	0.197	0.94	0.44	2.05	0.61
360	0	0.216	0.98	0.44	2.31	0.66
540	0	0.218	1.23	0.41	2.45	0.62
720	0	0.184	1.40	0.39	2.79	0.59
1080	0	0.171	1.44	0.24	1.99	0.36
1440	0	0.127	1.28	0.34	1.79	0.51

Na idućim slikama (38 – 48 ) prikazani su grafovi hidrograma otjecanja kroz slojeve i razina vode u modelu kišnog vrta za ispunjavanje kriterija mjerodavni projektnih pljuskova te grafovi hidrograma izlaza iz kišnog vrta, razine vode i evapotranspiracije za dugogodišnji niz oborina u gradu Poreču.



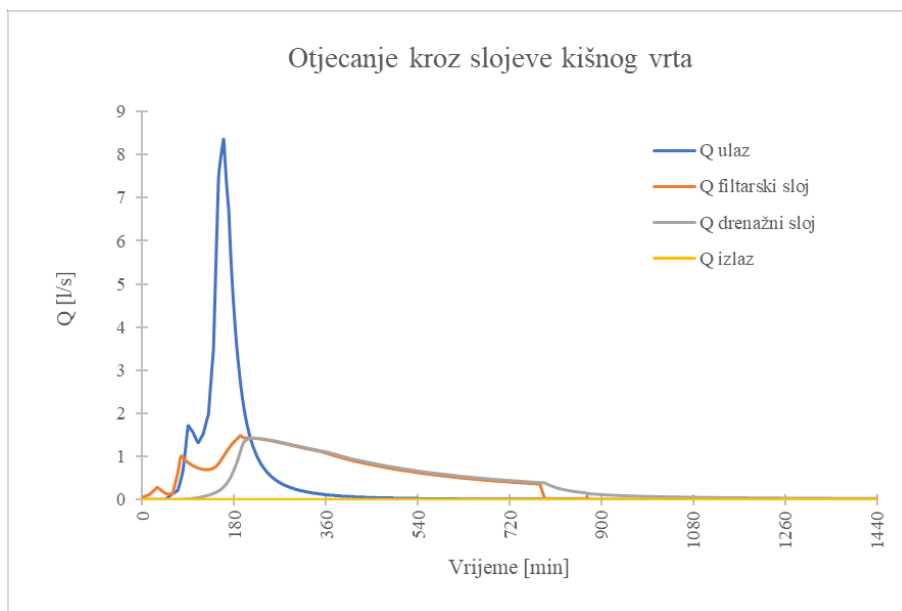
Slika 38: Model 1, 1. i 2.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Na grafu je vidljivo da se na izlazu ne javlja protok, dakle sva se voda infiltrirala za oborinu 90-og percentila.



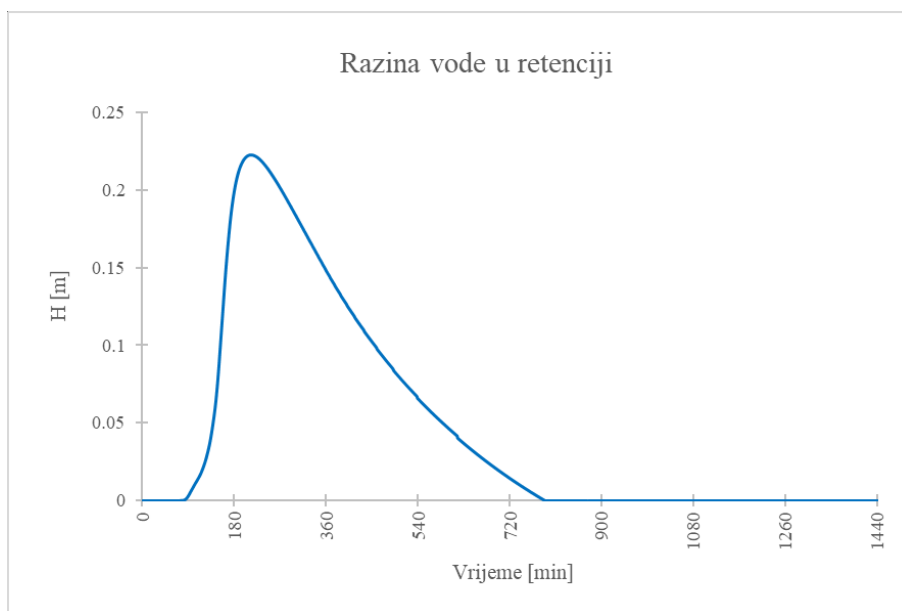
Slika 39: Model 1, 1. i 2.kriterij – razina vode u retenciji

Maksimalna razina vode je  $5.45 \cdot 10^{-7}$  m, dostignuta u 1501-oj minuti za volumen oborine 90-og percentila.



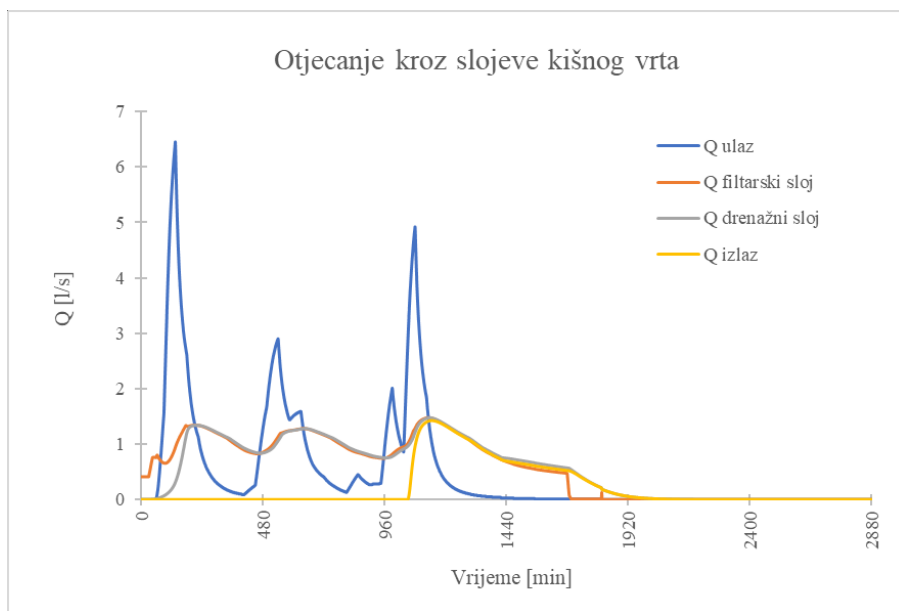
Slika 40: Model 1, 3.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Na grafu je vidljivo da se nisu aktivirale preljevna i drenažna cijev i ne dolazi do izlaznog protoka, kišni vrt je prihvatio i infiltrirao svu vodu za projektni pljusak trajanja 180 minuta.



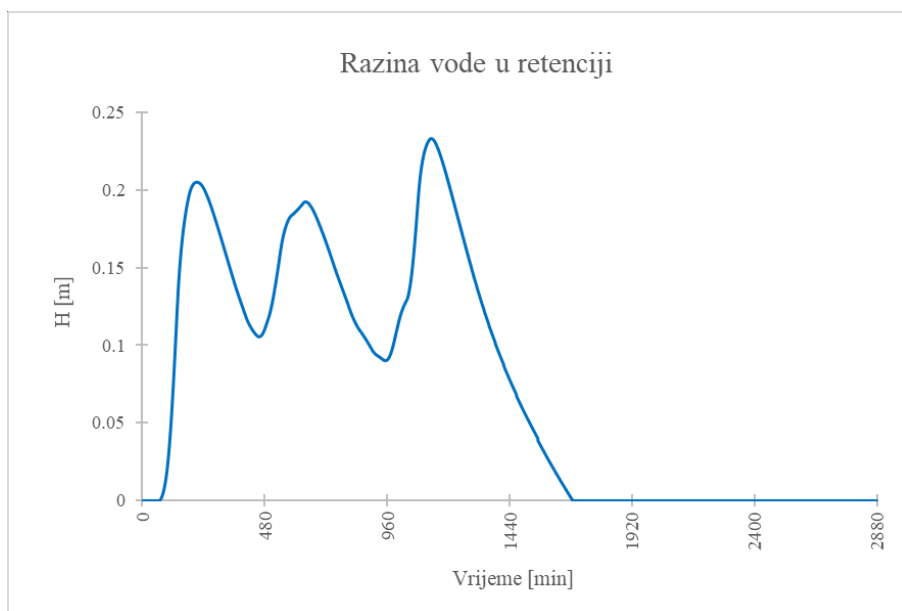
Slika 41: Model 1, 3.kriterij – razina vode u retenciji

U 214-oj minuti dostignuta je najveća razina vode od 0.23 m. Trajanje projektnog pljuska je 180 minuta.



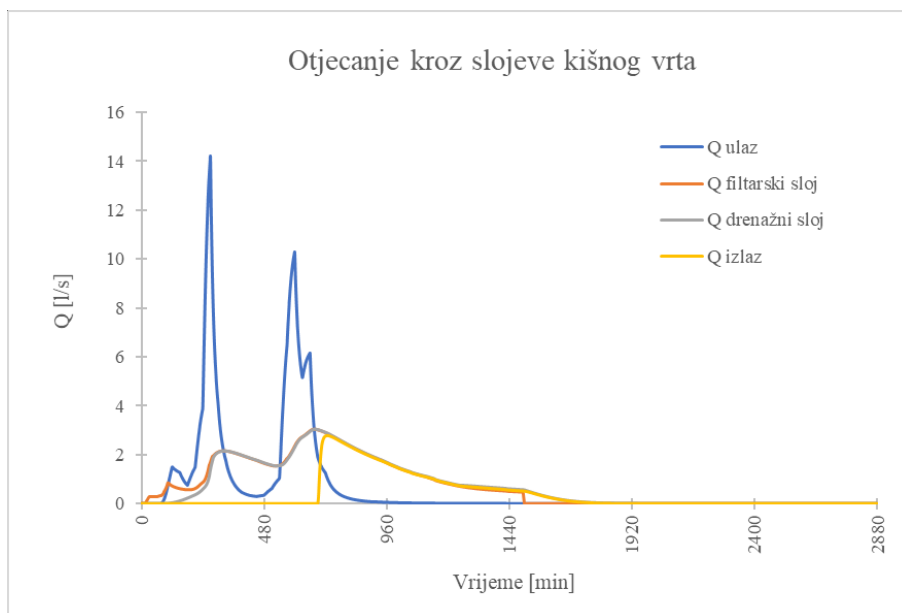
Slika 42: Model 1, 4.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Na izlazu se aktivirala drenažna cijev i u 1147-oj minuti je dostignut vršni protok od 1.5  $l/s$ , preliv se nije aktivirao. Projektni pljusak od trajanja 1080 minuta.



Slika 43: Model 1, 4.kriterij – razina vode u retenciji

Najveća razina vode u kišnom vrtu je 0.24 m u 1134-oj minuti za projektni pljusak od 1080 minuta.



Slika 44: Model 1, 5.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

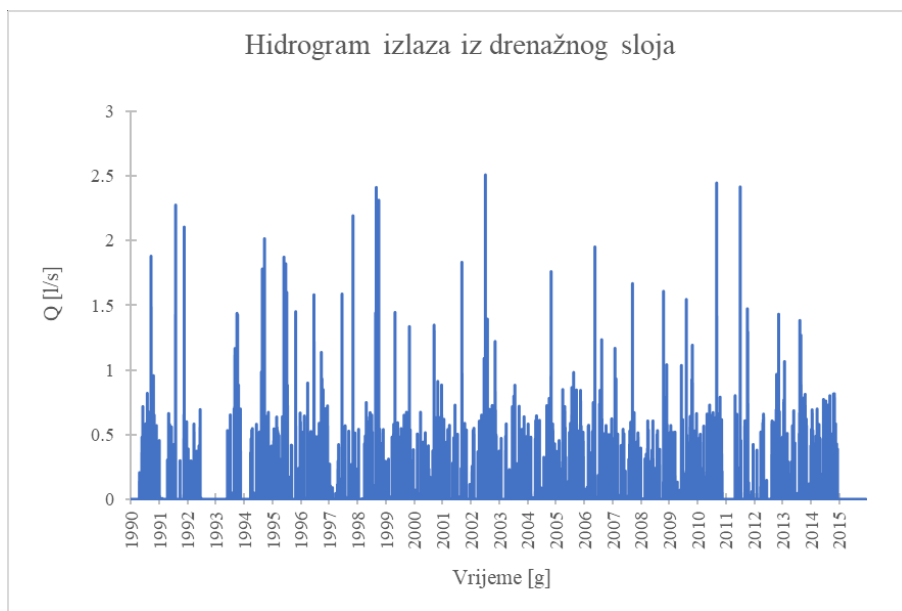
Za projektni pljusak trajanja 720 minuta vršni protok od 2.8 l/s se javio na izlazu drenažne cijevi u 729-oj minuti.



Slika 45: Model 1, 5.kriterij – razina vode u retenciji

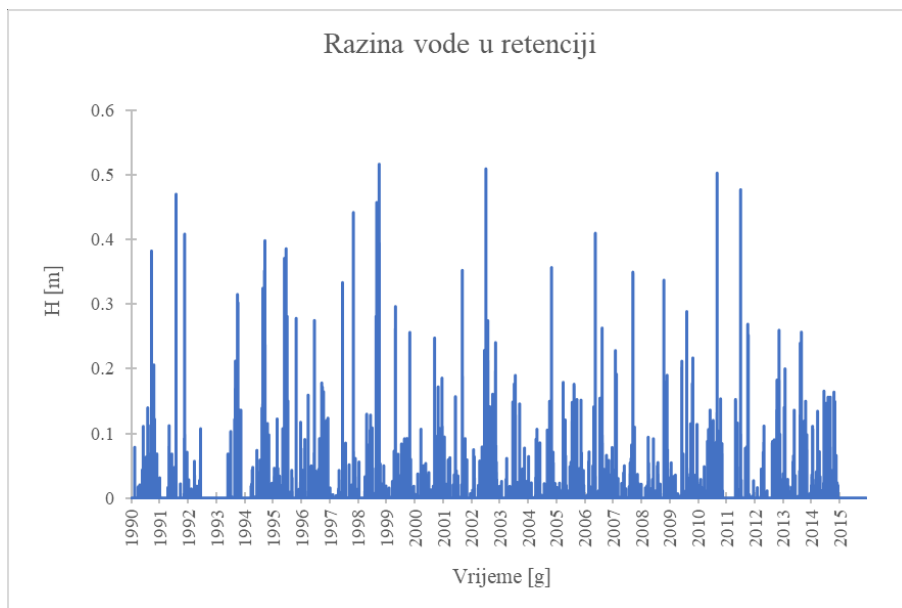
U 679-oj minuti postignuta je vršna razina vode od 0.59 m za trajanje oborine 720 minuta.





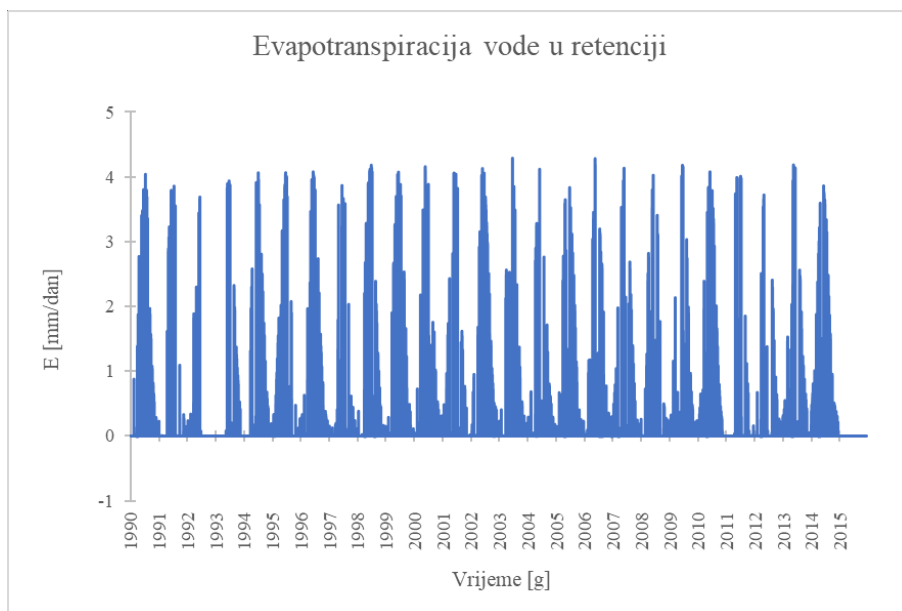
Slika 46: Model 1, dugogodišnji niz oborina – hidrogram izlaza

Najveći protok iznosi 2.5 l/s u srpnju 2002 godine za niz oborina od 26 godina u gradu Poreču. Preljevna cijev nije se aktivirala.



Slika 47: Model 1, dugogodišnji niz oborina – razina vode u retenciji

Maksimalna razina vode u retenciji je dostignuta u listopadu 1998. godine u iznosu od 0.52 m za dugogodišnji niz oborina u gradu Poreču.



Slika 48: Model 1, dugogodišnji niz oborina – evapotranspiracija

Najveći iznos evapotranspiracije je 4.3 mm/dan u lipnju 2003 godine za dugogodišnji niz oborina u Poreču.

### 8.1.1. Analize osjetljivosti

Za izradu analiza osjetljivosti odabran je projektni pljusak trajanja 180 minuta, 100 godišnjeg povratnog perioda jer je imao znatnu količinu protoka preljevanjem i dreniranjem. Tablica 9 prikazuje odabrane parametre za provođenje analiza osjetljivosti.

Tablica 9: Parametri analiza osjetljivosti i pripadajući brojevi eksperimenata

Postotak slivne površine [%]	10	<b>1.</b>	5	<b>2.</b>	15
Visina filtarskog sloja [m]	0.3	<b>3.</b>	0.1	<b>4.</b>	0.5
Visina drenažnog sloja [m]	1	<b>5.</b>	0.5	<b>6.</b>	1.5
Razina preljevne cijevi [m]	+0.65	<b>7.</b>	+0.3	<b>8.</b>	+1
Razina drenažne cijevi [m]	-0.4	<b>9.</b>	-0.7	<b>10.</b>	-1
Razina izlaza [m]	-1.5	<b>11.</b>	-1	<b>12.</b>	-2
Hidraulička provodljivost filtra [m/dan]	1.0608	<b>13.</b>	0.5	<b>14.</b>	1.5
Hidraulička provodljivost tla [m/dan]	0.048	<b>15.</b>	0.1	<b>16.</b>	0.3

U prikazanoj tablici žutom bojom su označeni parametri prethodno dimenzioniranog vrta, zelenom i plavom bojom su označene promjene parametara i brojevi njihovog eksperimenta. Sve dimenzije i parametri modela u eksperimentima su prema dimenzioniranom vrtu (označeno žutom bojom) osim parametra pod brojem svog eksperimenta. U tablicama 10 i 11 prikazani su postotci promjena otjecanja u preljevnoj i drenažnoj cijevi te razini vode u retenciji prema broju eksperimenta.

*Tablica 10: Analiza osjetljivosti za eksperimente 1. – 8.*

Br. eksperimenta	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Preljevna cijev	170%	-100%	-100%	114%	3%	3%	119%	-100%
Drenažna cijev	-29%	-43%	144%	-53%	51%	-52%	-85%	8%
Razina vode	56%	-29%	-16%	3%	0%	0%	-18%	3%

*Tablica 11: Analiza osjetljivosti za eksperimente 9. – 16.*

Br. eksperimenta	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
Preljevna cijev	0%	0%	-11%	0%	140%	-100%	0%	-14%
Drenažna cijev	27%	14%	-4%	0%	-67%	51%	-4%	-11%
Razina vode	0%	0%	0%	0%	4%	-4%	0%	0%

### **8.1.2. Pregled analiza osjetljivosti**

Postotak površine kišnog vrta pokazao je znatnu osjetljivost na protoke izlaza i razinu vode u kišnom vrtu. Visina filtarskog sloja pokazala je znatnu osjetljivost na protoke izlaza te relativno slabu osjetljivost na razinu vode u kišnom vrtu. Promjena visine drenažnog sloja pokazala je slabu osjetljivost na protoke u preljevnoj cijevi i nikakvu osjetljivost na razinu vode, ali značajnu osjetljivost na protok kroz drenažnu cijev. Položaj preljevne cijevi pokazao je jaku osjetljivost na protok kroz preljevnu i drenažnu cijev smanjenjem njene razine, dok je njenim povećanjem pokazao znatnu osjetljivost na protok kroz preljevnu cijev, ali slabu osjetljivost protoka drenažne cijevi, osjetljivost na promjenu razine vode također je relativno slaba. Razina drenažne cijevi pokazala je osjetljivost na protok kroz drenažnu cijev dok kod protoka preljevnom cijevi i razine vode nije došlo do nikakve promjene. Razina izlaza iz preljevne i drenažne cijevi pokazala je slabu osjetljivost smanjenjem protoka iz preljevne i drenažne cijevi spuštanjem njene razine. Hidraulička

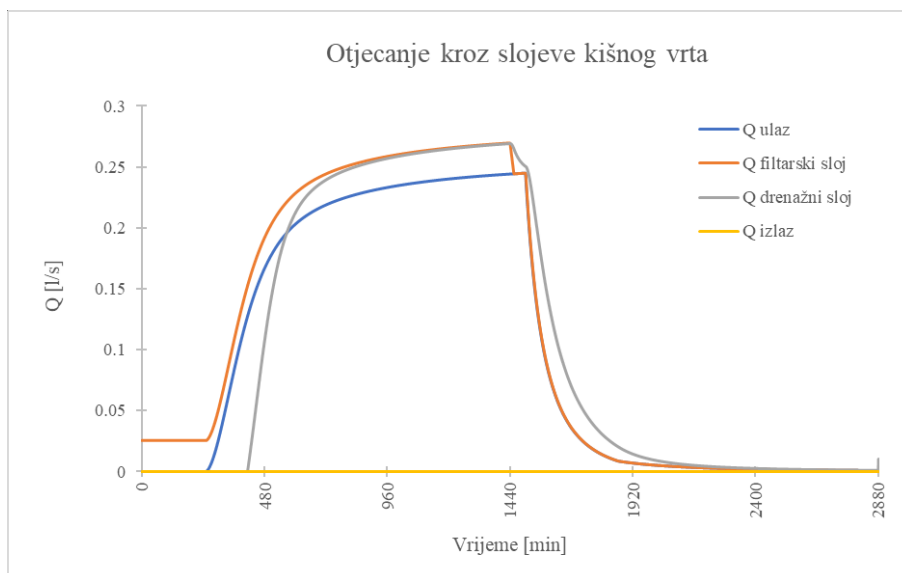
provodljivost filtarskog sloja pokazala je znatnu osjetljivost na protoke iz preljevne i drenažne cijevi i manju osjetljivost na razinu vode. Hidraulička provodljivost tla pokazala je relativno malu osjetljivost na protoke izlaza iz kišnog vrta dok kod promjene razine vode nije došlo do nikakve promjene.

## 8.2. Model 2 – prikaz rezultata

U tablici 12 prikazana su rješenja simulacija projektnih pljuskova svih trajanja za Model 1 povratnih perioda 1, 10 i 100 godina. Ovi rezultati su se koristili za ispunjavanje kriterija 3., 4. i 5. Zelenom su označeni vršni protoci na izlazu iz kišnog vrta i razine vode u retencijskom sloju za mjerodavna trajanja projektnih pljuskova.

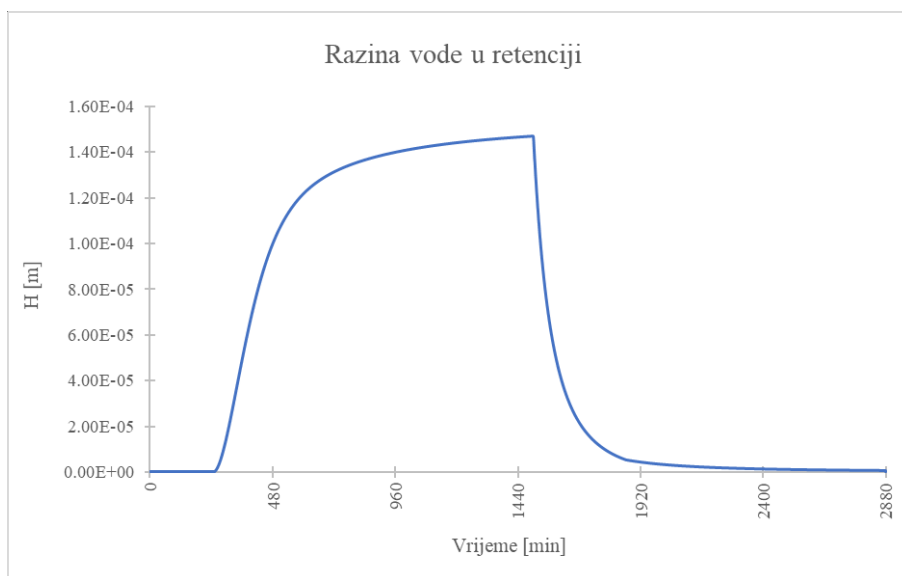
Tablica 12: Analize razina vode i vršnih protoka projektnih pljuskova Modela 2

Trajanje pljuska [min]	Vršni protok PP 1 g. [l/s]	Razina vode [m]	Vršni protok PP 10 g. [l/s]	Razina vode [m]	Vršni protok PP 100 g. [l/s]	Razina vode [m]
60	0	0.07	0.00	0.23	1.50	0.39
120	0	0.09	1.16	0.26	2.01	0.42
180	0	0.12	1.45	0.29	4.09	0.45
270	0	0.04	1.70	0.23	2.47	0.31
360	0	0.08	1.72	0.24	2.69	0.39
540	0	0.07	1.52	0.2	2.25	0.35
720	0	0.05	1.94	0.13	2.72	0.22
1080	0	0.05	1.78	0.09	2.16	0.17
1440	0	0.03	1.89	0.17	2.33	0.3



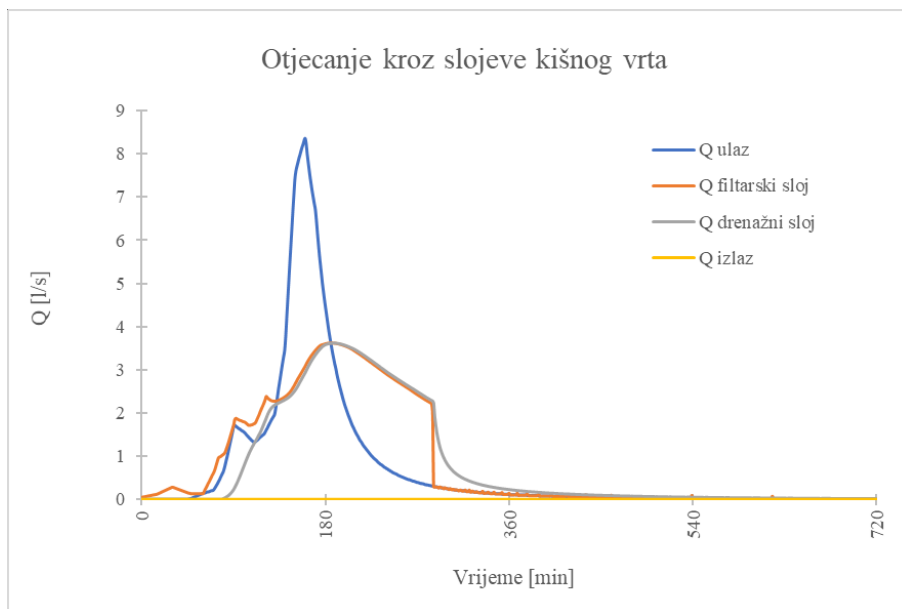
Slika 49: Model 2, 1. i 2.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Kišni vrt je u potpunosti prihvatio svu vodu za oborinu 90-og percentila i pritom se izlazne cijevi nisu ni aktivirale (slika 49).



Slika 50: Model 2, 1. i 2.kriterij – razina vode u retenciji

Najveća razine vode u retenciji postignuta je u 1502 minuti, a iznosi  $1.47 \cdot 10^{-4}$  m za volumen oborine 90-og percentila (slika 50).



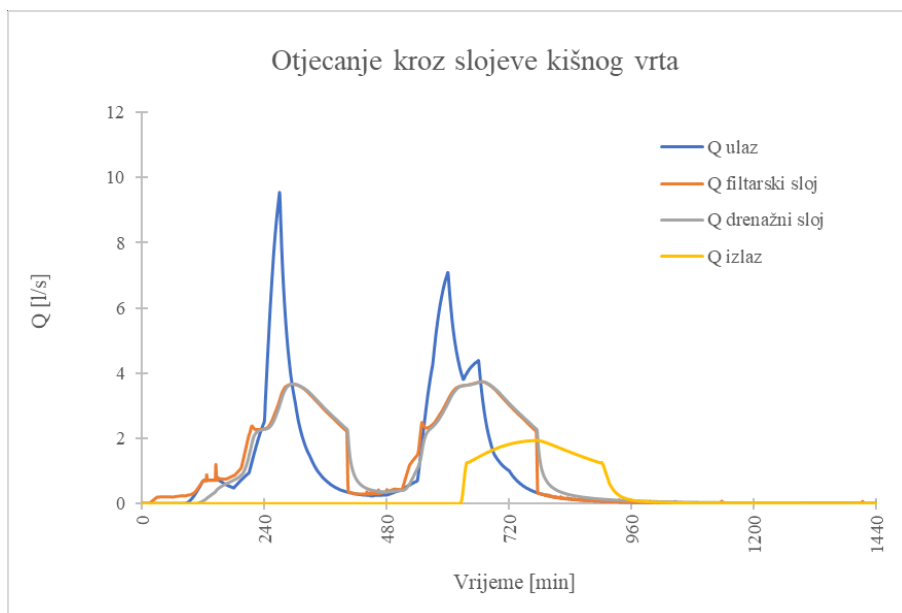
Slika 51: Model 2, 3.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Preljevna i drenažna cijev nisu osjetila nikakav protok; kišni vrt je prihvatio u potpunosti svu oborinu. Mjerodavni projektni pljusak je trajanja 180 minuta (slika 51).



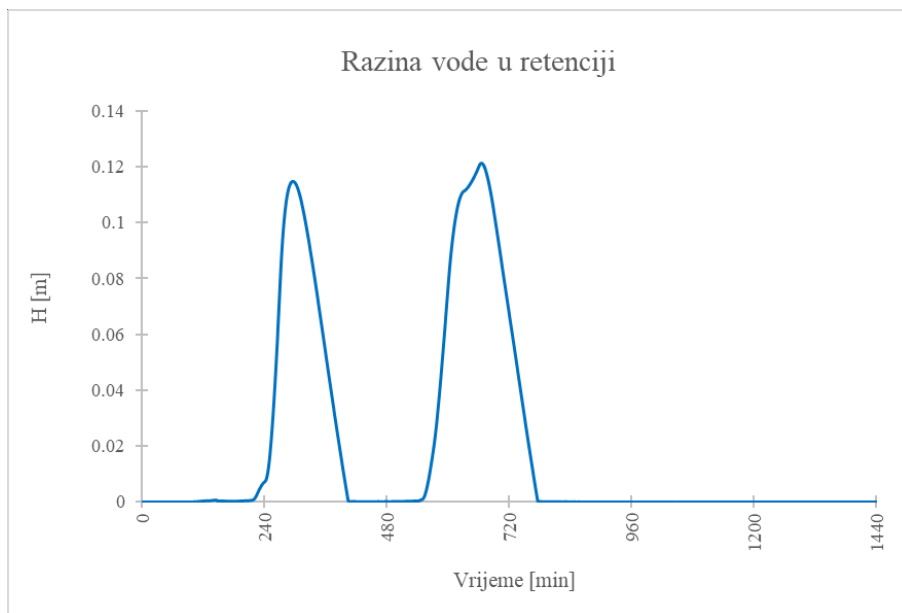
Slika 52: Model 2, 3.kriterij – razina vode u retenciji

Maksimalna razina vode u retenciji je 0.12 m, postignuta u 187-oj minuti projektnog pljuska trajanja od 180 minuta (slika 52).



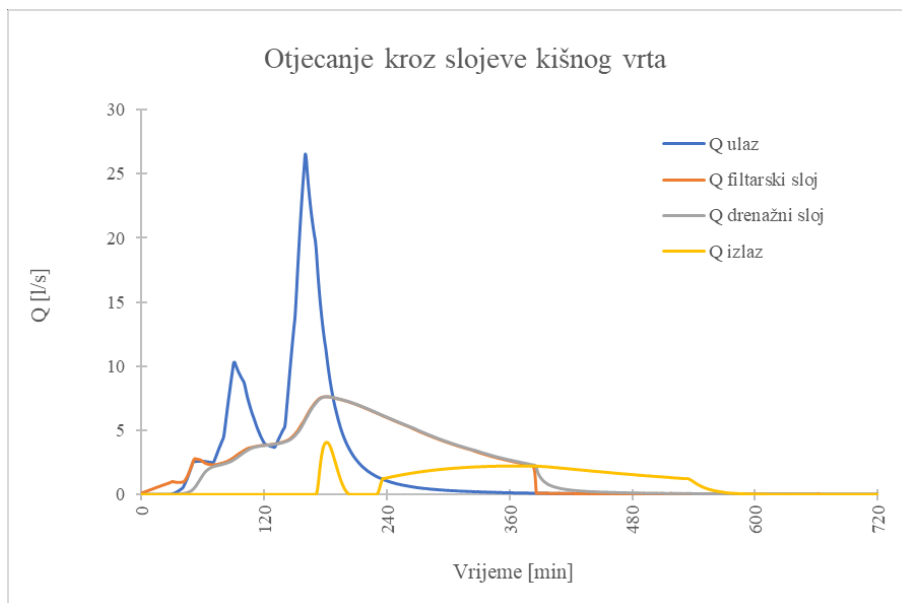
Slika 53: Model 2, 4.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Najveći protok od 2 l/s javio se u drenažnoj cijevi u 776-oj minuti, preljevna cijev se nije aktivirala. Trajanje projektnog pljuska od 720 minuta (slika 53).



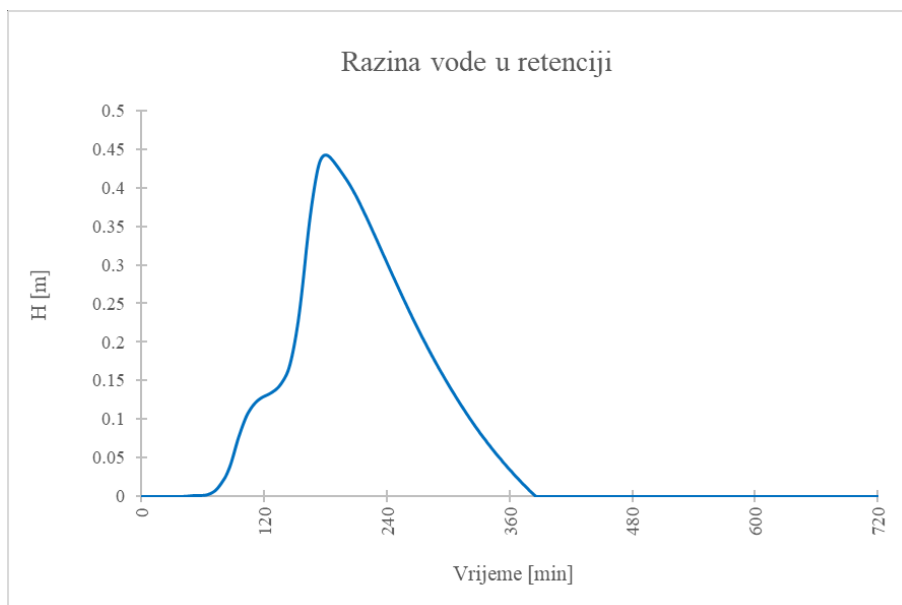
Slika 54: Model 2, 4.kriterij – razina vode u retenciji

Retencija dostiže vršnu razinu vode od 0.13 m u 666-oj minuti projektnog pljuska u trajanju od 720 minuta (slika 54).



Slika 55: Model 2, 5.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

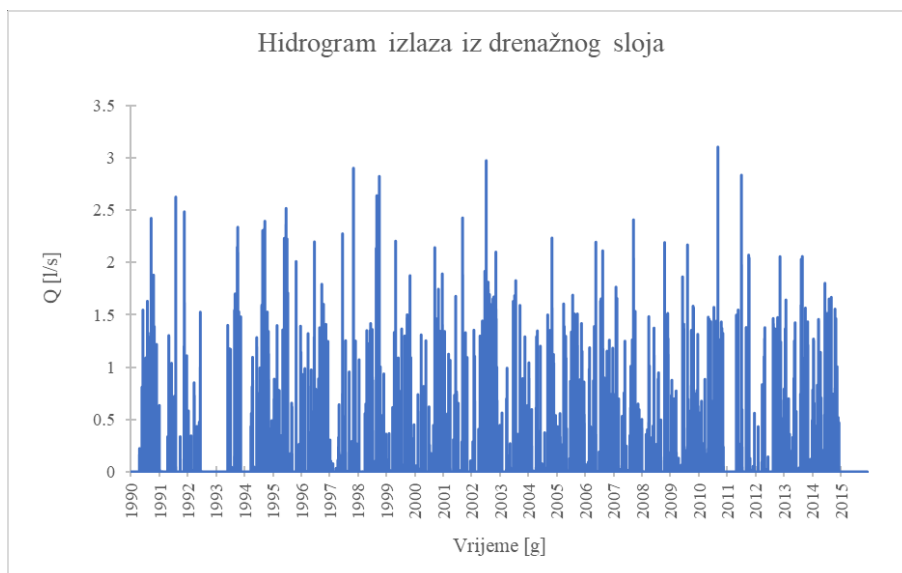
Vršni protok od 4.1 l/s dostignut je u 181 minuti preljevom. Mjerodavan je projektni pljusak trajanja 180 minuta (slika 55).



Slika 56: Model 2, 5.kriterij – razina vode u retenciji

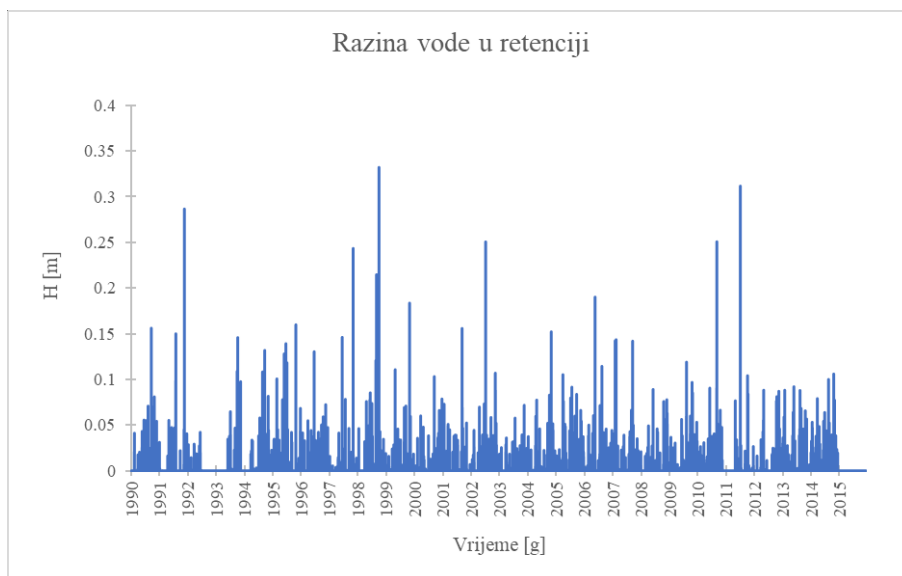
Za projektni pljusak trajanja 180 minuta, u 181 minuti dostignuta je razina vode od 0.45 m (slika 56).





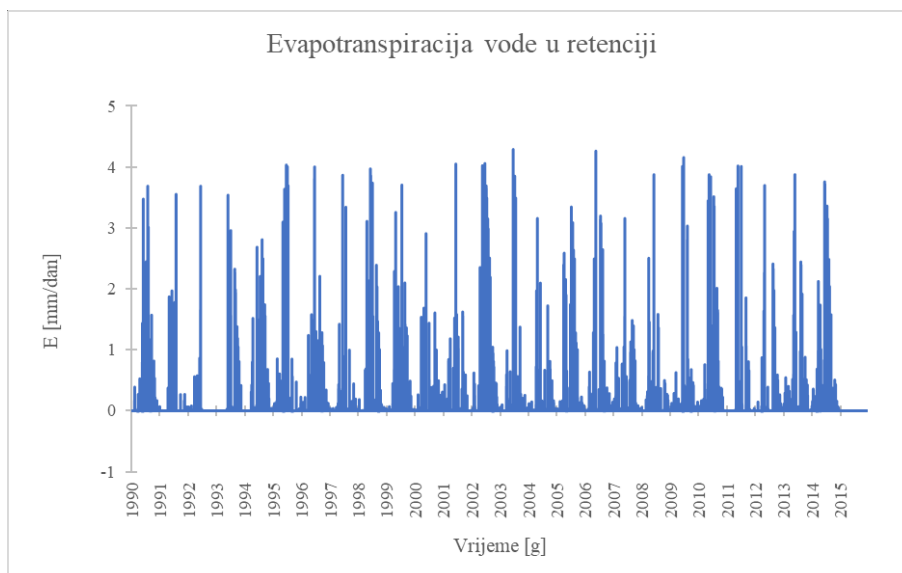
Slika 57: Model 2, dugogodišnji niz oborina – hidrogram izlaza

Za dugogodišnji niz oborina u gradu Poreču vršni protok iznosi 3.2 l/s, a dostignut je u rujnu 2010 godine (slika 57).



Slika 58: Model 2, dugogodišnji niz oborina – razina vode u retenciji

Najveća razine vode za dugogodišnji niz oborina u gradu Poreču iznosi 0.33 m, a javila se u listopadu 1998 godine (slika 58).



Slika 59: Model 2, dugogodišnji niz oborina – evapotranspiracija

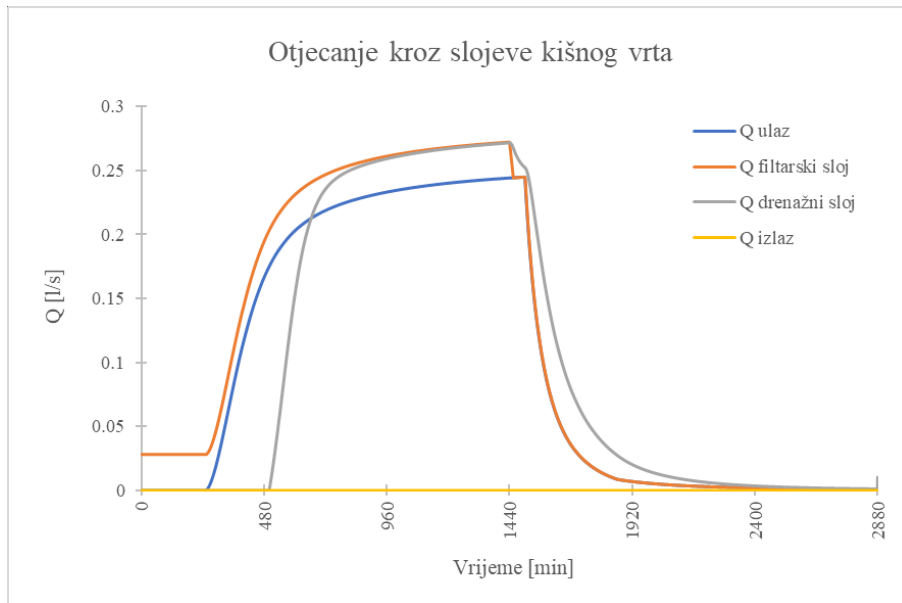
Maksimalan iznos evapotranspiracije iznosi 4.3 mm/dan, a postignut je u lipnju 2003 godine (slika 59).

### 8.3. Model 3 – prikaz rezultata

Tablica 13 prikazuje rezultate provedenih simulacija za sva trajanja projektnih pljuskova 1, 10 i 100 godišnjih povratnih perioda. Zelenom bojom su označeni vršni izlazni protoci i pripadajuće razine vode u kišnom vrtu.

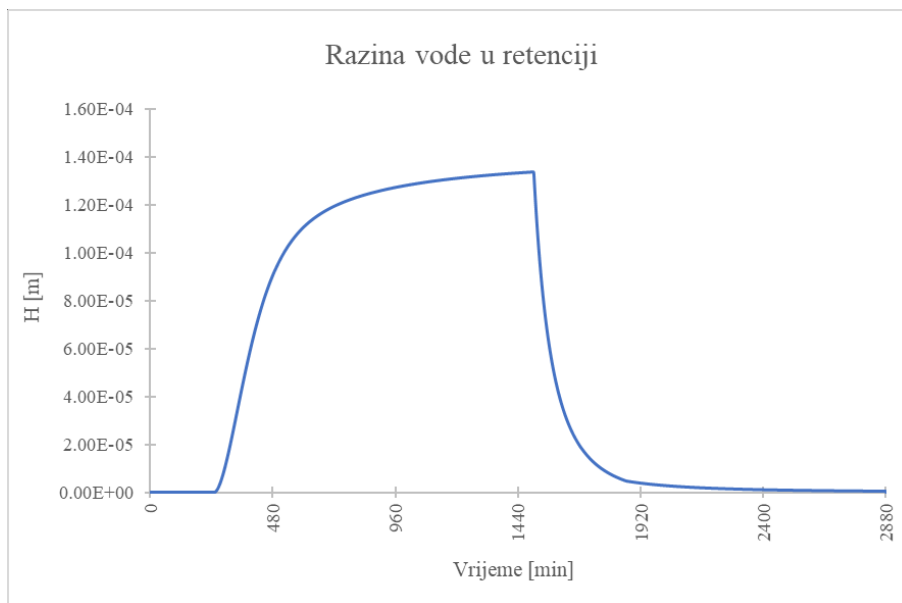
Tablica 13: Analize razina vode i vršnih protoka projektnih pljuskova Modela 3

Trajanje pljuska [min]	Vršni protok PP 1 g. [l/s]	Razina vode [m]	Vršni protok PP 10 g. [l/s]	Razina vode [m]	Vršni protok PP 100 g. [l/s]	Razina vode [m]
60	0	0.1	0.00	0.27	0.97	0.43
120	0	0.14	0.00	0.33	1.93	0.51
180	0	0.17	0.93	0.37	4.47	0.55
270	0	0.11	1.44	0.31	2.89	0.44
360	0	0.14	1.48	0.32	3.21	0.5
540	0	0.15	1.69	0.3	2.66	0.48
720	0	0.1	1.94	0.24	3.33	0.39
1080	0	0.11	1.69	0.15	2.25	0.25
1440	0	0.08	1.45	0.25	2.30	0.4



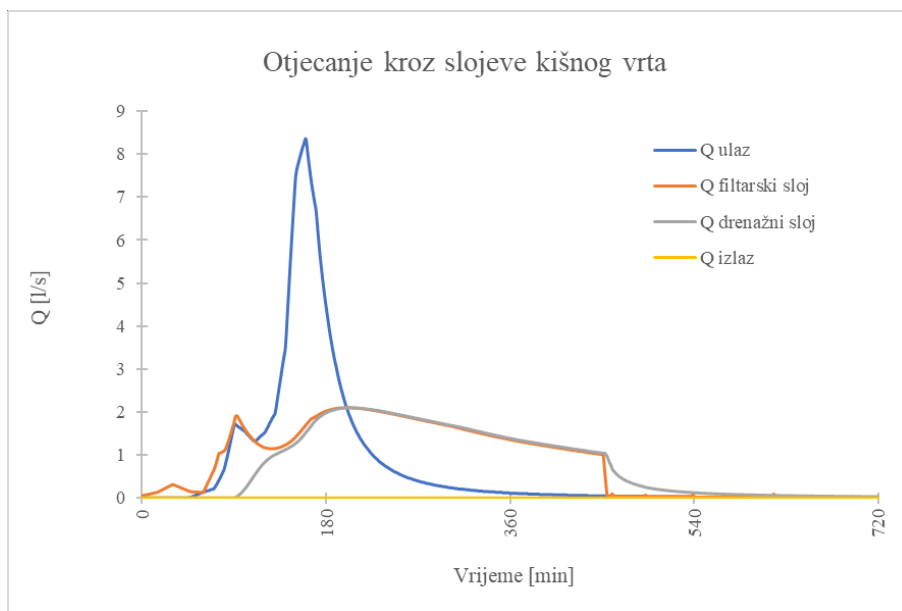
Slika 60: Model 3, 1. i 2.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Volumen oborina 90-og percentila nije aktiviran izlazne cijevi, već je kišni vrt prihvatio svu oborinu (slika 60).



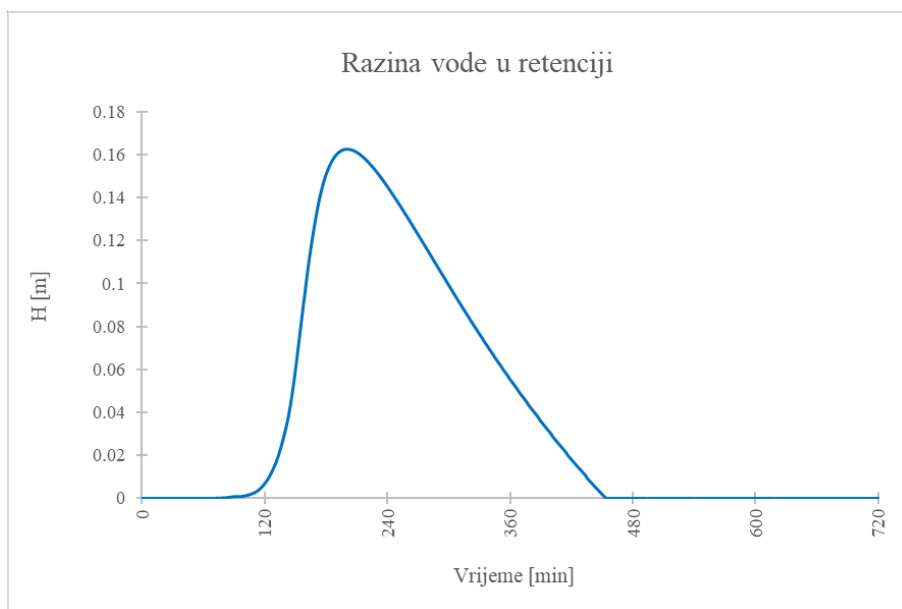
Slika 61: Model 3, 1. i 2.kriterij – razina vode u retenciji

Najviša razina vode u retenciji iznosi  $1.34 \cdot 10^{-4}$  m, a postignuta je u 1501 minuti za oborinu 90-og percentila (slika 61).



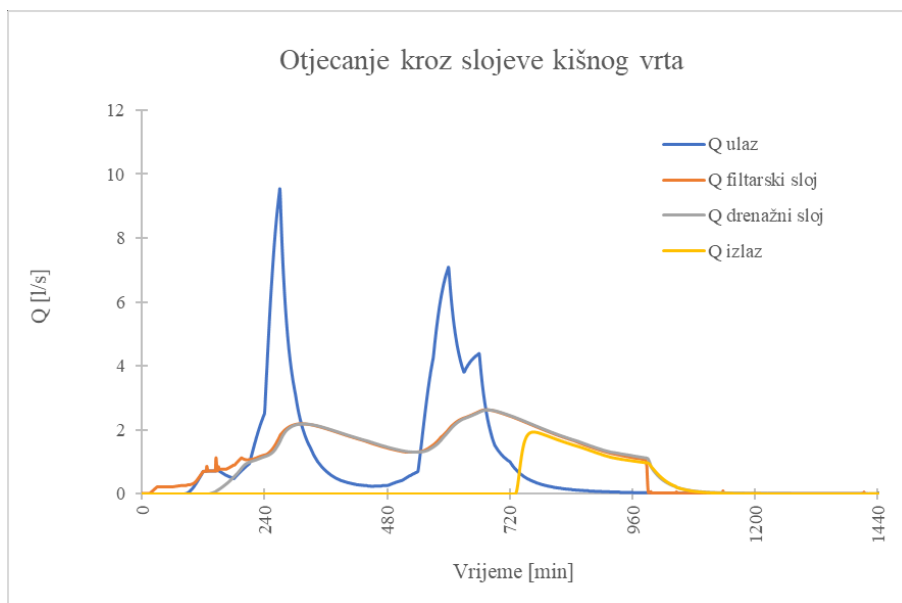
Slika 62: Model 3, 3.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Kišni vrt prihvatio je cijeli volumen oborine. Mjerodavan je projektni pljusak trajanja 180 minuta (slika 62).



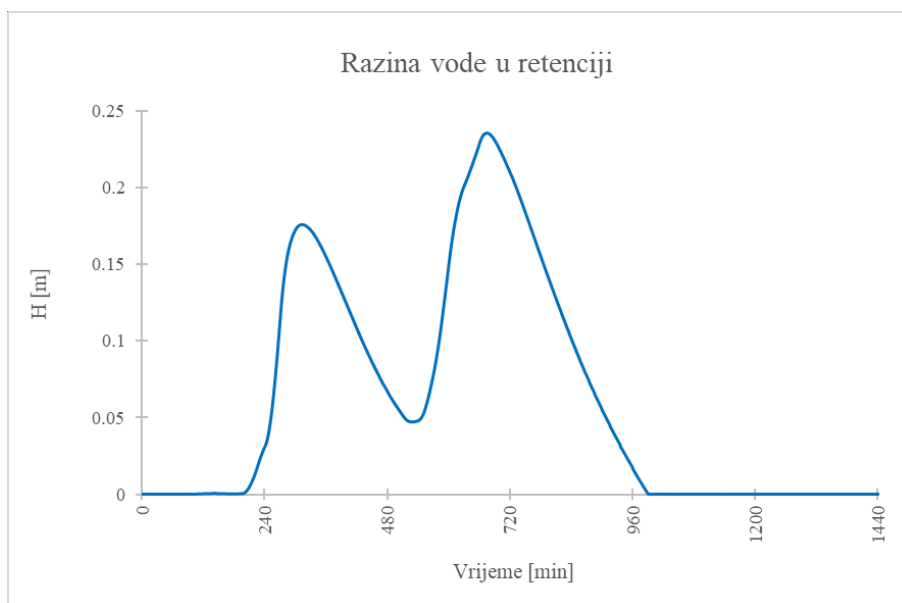
Slika 63: Model 3, 3.kriterij – razina vode u retenciji

Za oborinu projektnog pljuska od 180 minuta dostignuta je maksimalna razina vode od 0.17 m u 202-oj minuti (slika 63).



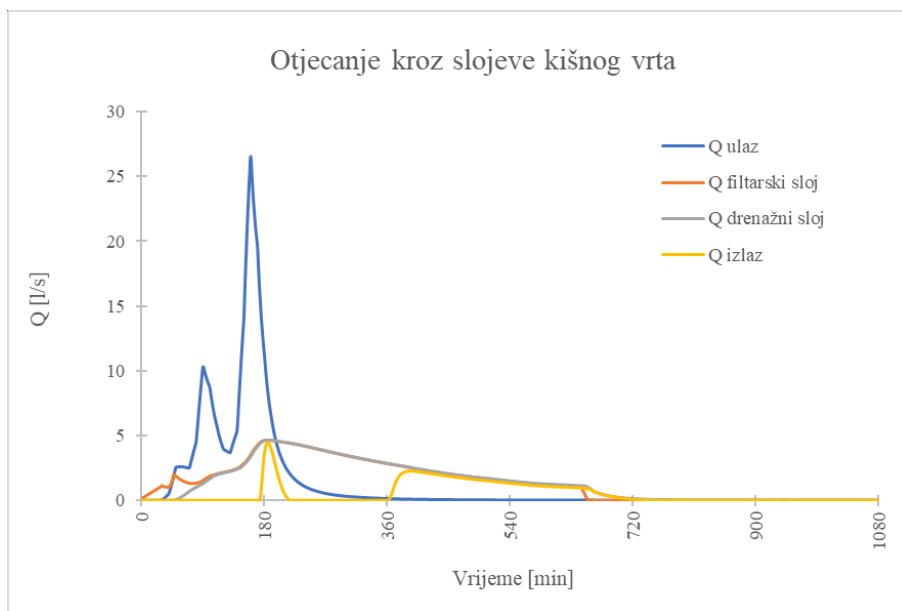
Slika 64: Model 3, 4.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

U drenažnoj cijevi javlja se vršni protok od 2 l/s u 767-oj minuti za mjerodavan projektni pljusak u trajanju od 720 minuta (slika 64).



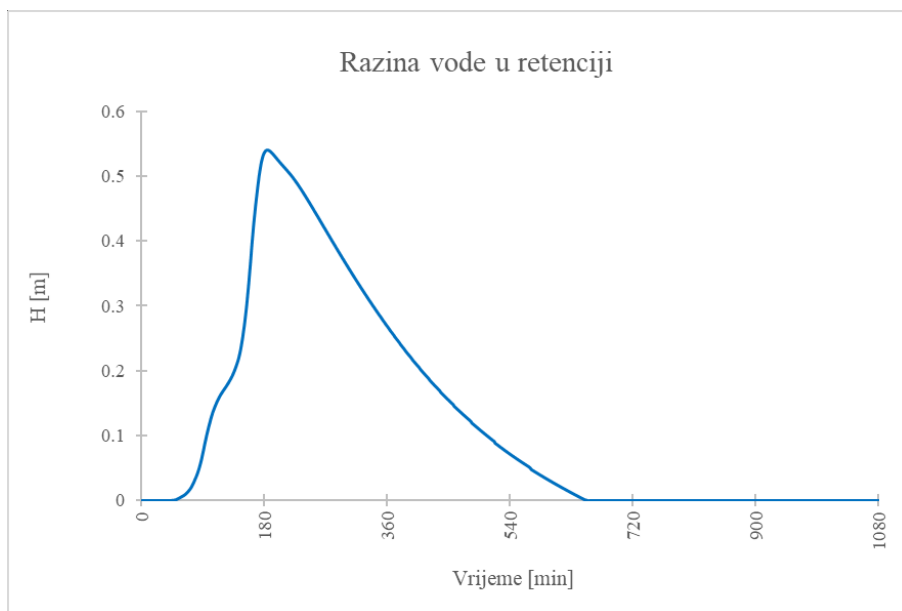
Slika 65: Model 3, 4.kriterij – razina vode u retenciji

Najveća razina vode u retenciji iznosi 0.24 m, a javila se u 675 minuti za trajanje projektnog pljuska od 720 minuta (slika 65).



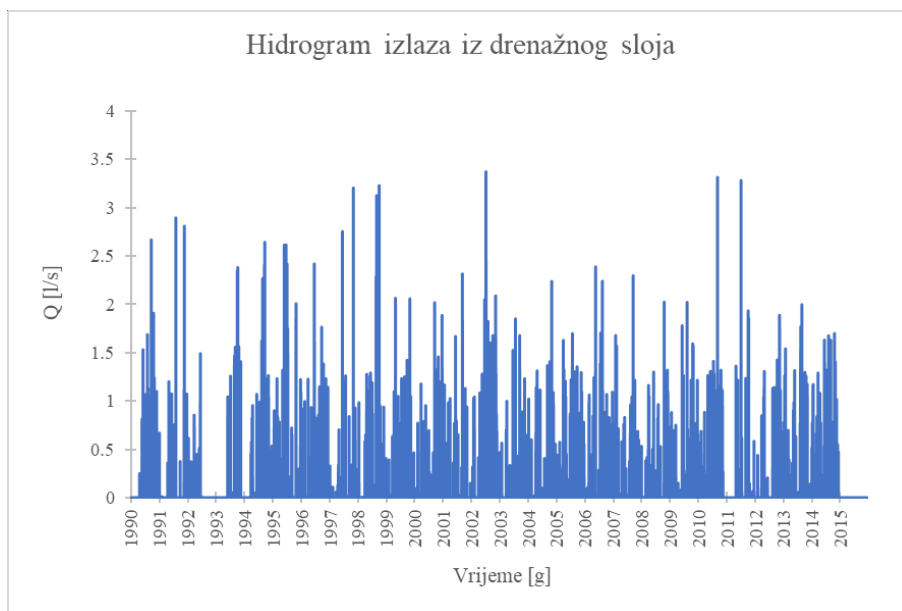
Slika 66: Model 3, 5.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Vršni protok je dostignut preljevanjem u 186-oj minuti projektnog pljuska trajanja 180 minuta, a njegov iznos je 4.5 l/s (slika 66).



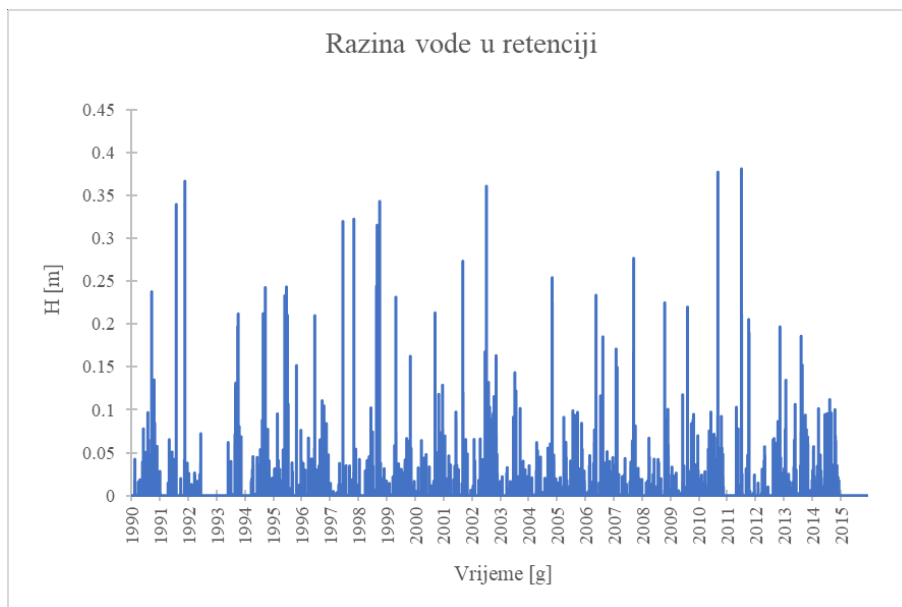
Slika 67: Model 3, 5.kriterij – razina vode u retenciji

Maksimalna razina vode u retenciji je 0.55 m, a pojavila se u 185-oj minuti za trajanje projektnog pljuska od 180 minuta (slika 67).



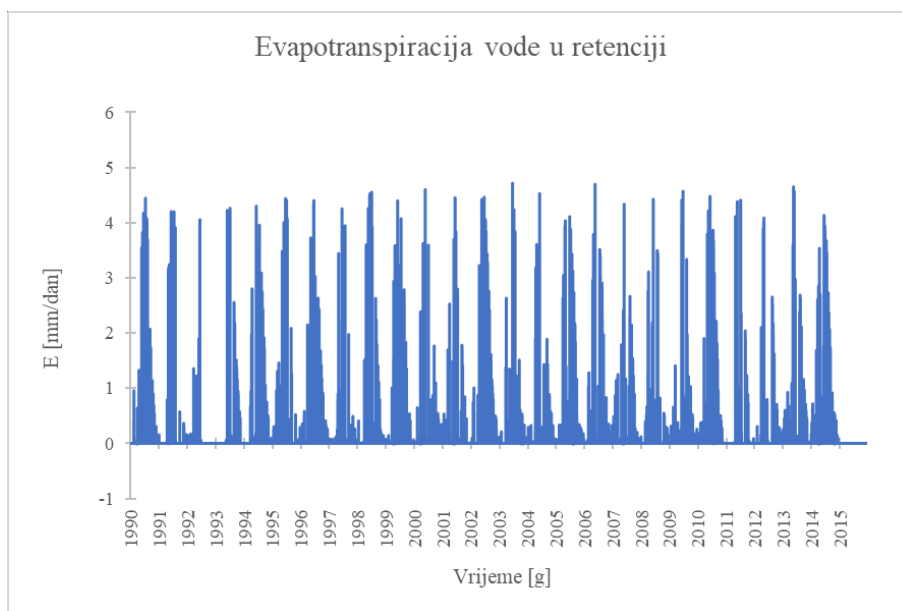
Slika 68: Model 3, dugogodišnji niz oborina – hidrogram izlaza

Najveći protok dugogodišnjeg niza oborina u gradu Poreču doseže vrijednost od 3.4 l/s u srpnju 2002 godine (slika 68).



Slika 69: Model 3, dugogodišnji niz oborina – razina vode u retenciji

Maksimalna razina vode u retenciji javila se u srpnju 2011 godine, a dosegla je visinu od 0.38 m (slika 69).



Slika 70: Model 3, dugogodišnji niz oborina – evapotranspiracija

U lipnju 2006 godine postignut je najveći iznos evapotranspiracije od 4.8 mm/dan (slika 70).

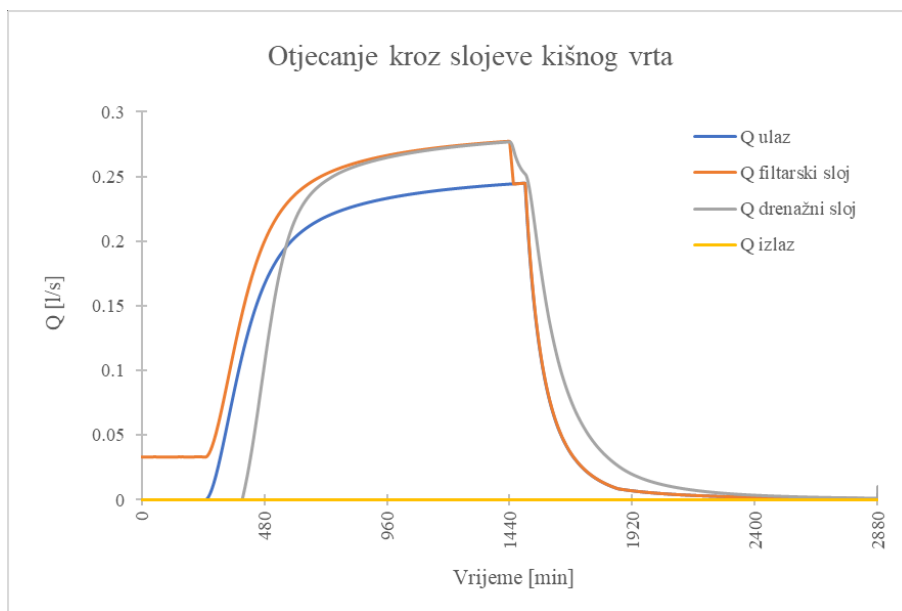
#### 8.4. Model 4 – prikaz rezultata

Tablica 14 prikazuje rezultate provedenih simulacija za sva trajanja projektnih pljuskova 1, 10 i 100 godišnjih povratnih perioda. Zelenom bojom su označeni vršni izlazni protoci i pripadajuće razine vode u kišnom vrtu.

Tablica 14: Analize razina vode i vršnih protoka projektnih pljuskova Modela 4

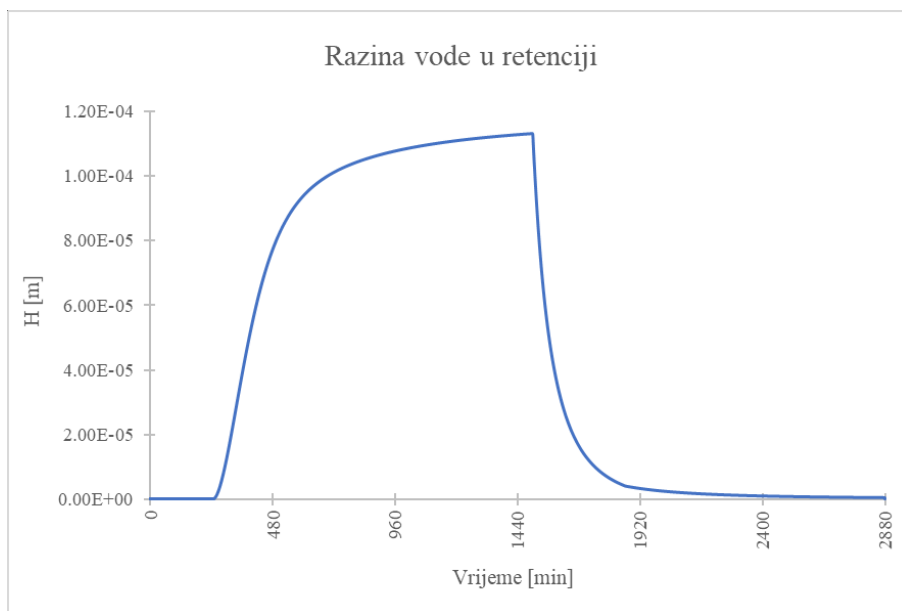
Trajanje pljaska [min]	Vršni protok PP 1 g. [l/s]	Razina vode [m]	Vršni protok PP 10 g. [l/s]	Razina vode [m]	Vršni protok PP 100 g. [l/s]	Razina vode [m]
60	0	0.11	0.00	0.26	0.96	0.4
120	0	0.15	0.60	0.32	1.68	0.49
180	0	0.17	0.94	0.36	2.77	0.54
270	0	0.14	1.31	0.34	2.36	0.47
360	0	0.16	1.35	0.34	2.62	0.52
540	0	0.16	1.55	0.31	2.43	0.47
720	0	0.11	1.71	0.28	2.85	0.44
1080	0	0.12	1.37	0.15	2.01	0.25
1440	0	0.09	1.44	0.25	1.91	0.39





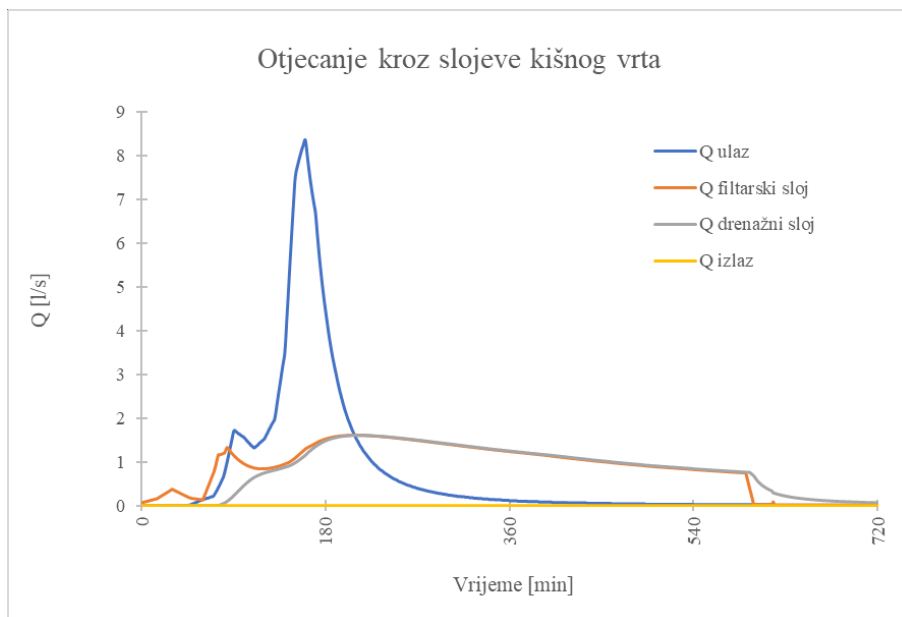
Slika 71: Model 4, 1. i 2.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Izlazne cijevi nisu aktivirane te je cijeli volumen oborine 90-og percentila infiltriran (slika 71).



Slika 72: Model 4, 1. i 2.kriterij – razina vode u retenciji

U 1501-oj minuti oborine 90-og percentila dostignuta je razina vode od  $1.13 \times 10^{-4}$  m (slika 72).



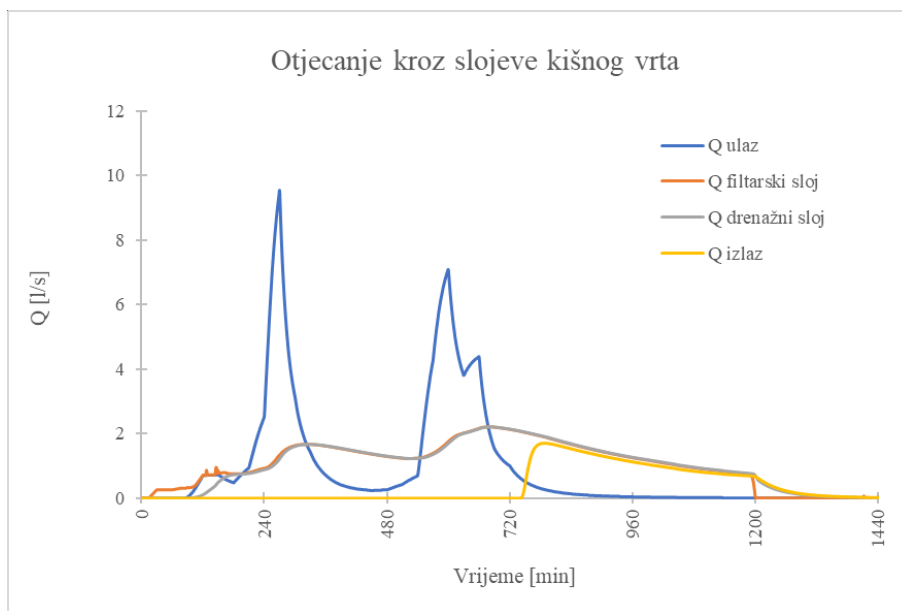
Slika 73: Model 4, 3.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Protok se nije javio u izlaznim cijevima kišnog vrta te je vrt prihvatio cijelu oborinu. Mjerodavni projektni pljusak je od trajanja 180 minuta (slika 73).



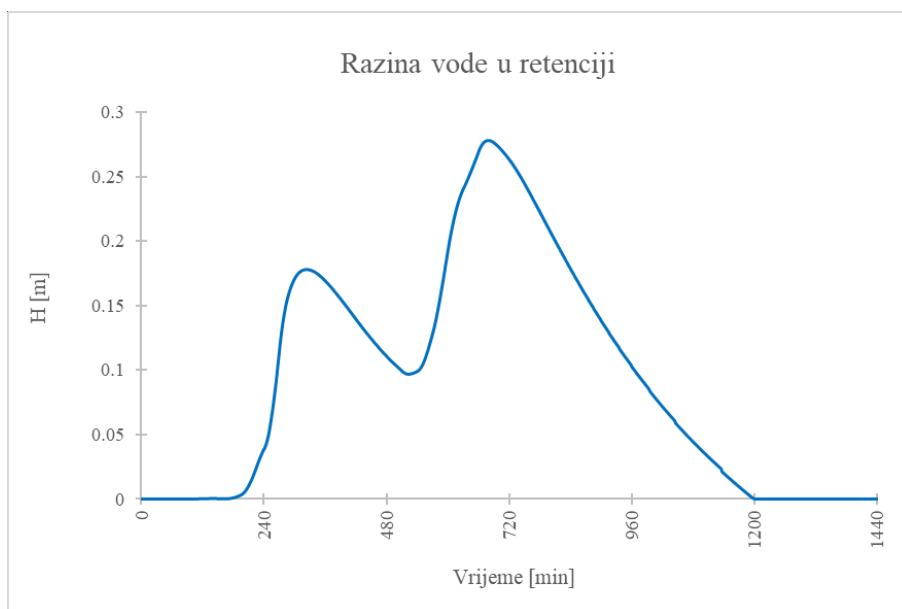
Slika 74: Model 4, 3.kriterij – razina vode u retenciji

Maksimalna razina vode iznosi 0.17 m u 210 minuti projektnog pljuska trajanja 180 minuta (slika 74).



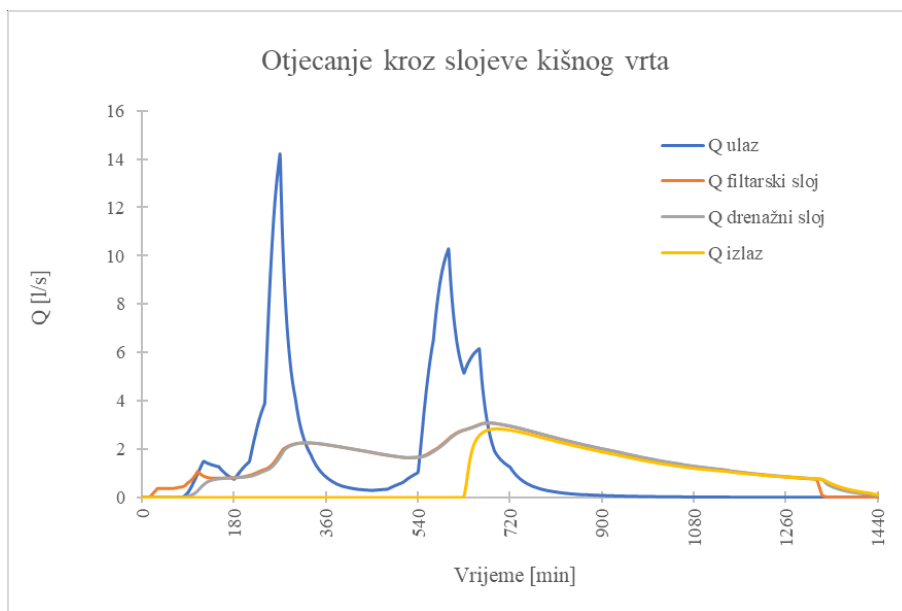
Slika 75: Model 4, 4.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Vršni protok javio se u drenažnoj cijevi, iznosi 1.8 l/s, a dostignut je u 789-oj minuti za mjerodavan projektni pljusak u trajanju od 720 minuta (slika 75).



Slika 76: Model 4, 4.kriterij – razina vode u retenciji

Najveća razine vode postignuta je u 680-oj minuti, a njena visina je 0.28 m za projektni pljusak trajanja 720 minuta (slika 76).



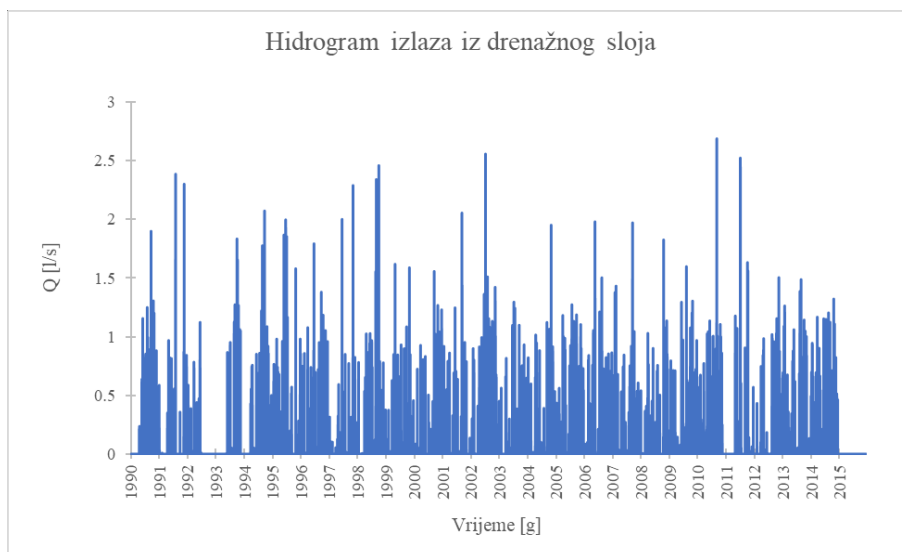
Slika 77: Model 4, 5.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Maksimalni protok iznosi 2.9 l/s, a dostiže se u drenažnoj cijevi u 695 minuti projektnog pljuska trajanja 720 minuta (slika 77).



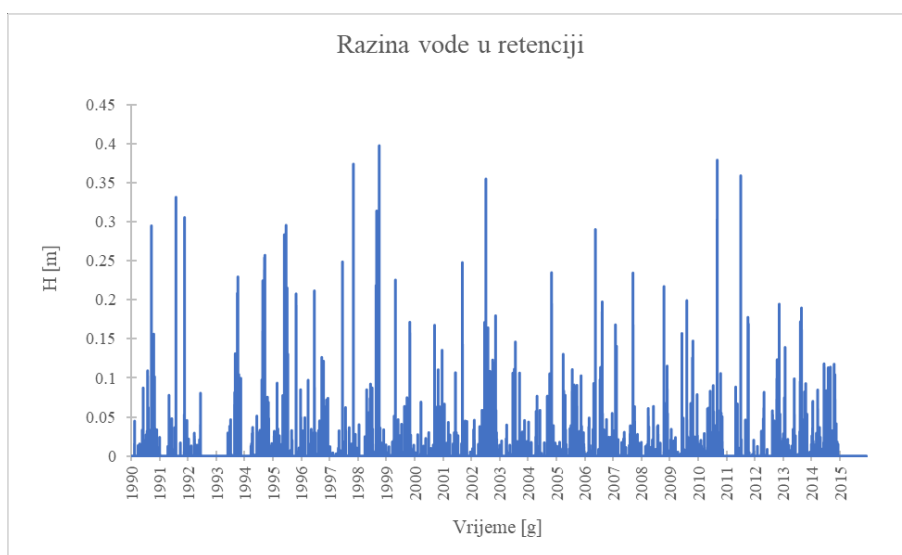
Slika 78: Model 4, 5.kriterij – razina vode u retenciji

Za projektni pljusak u trajanju od 720 minuta, vršna razina vode iznosi 0.44 m, a dostignuta je u 678-oj minuti (slika 78).



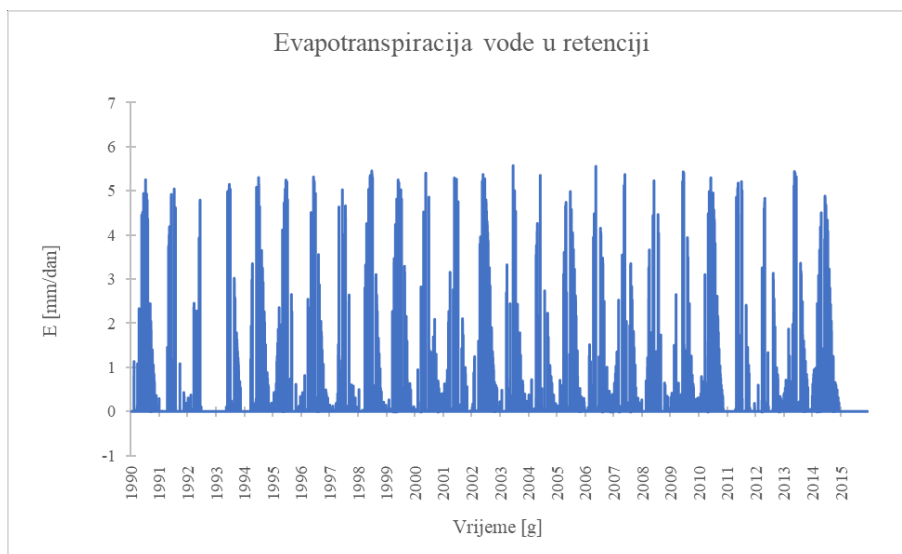
Slika 79: Model 4, dugogodišnji niz oborina – hidrogram izlaza

Vršni protok javlja se u rujnu 2010 godine dugogodišnjeg niza oborina, a iznosi 2.7 l/s (slika 79).



Slika 80: Model 4, dugogodišnji niz oborina – razina vode u retenciji

U listopadu 1998 godine dostignuta je najveća razina vode u kišnom vrtu od 0.4 m za dugogodišnji niz oborina u gradu Poreču (slika 80).



Slika 81: Model 4, dugogodišnji niz oborina – evapotranspiracija

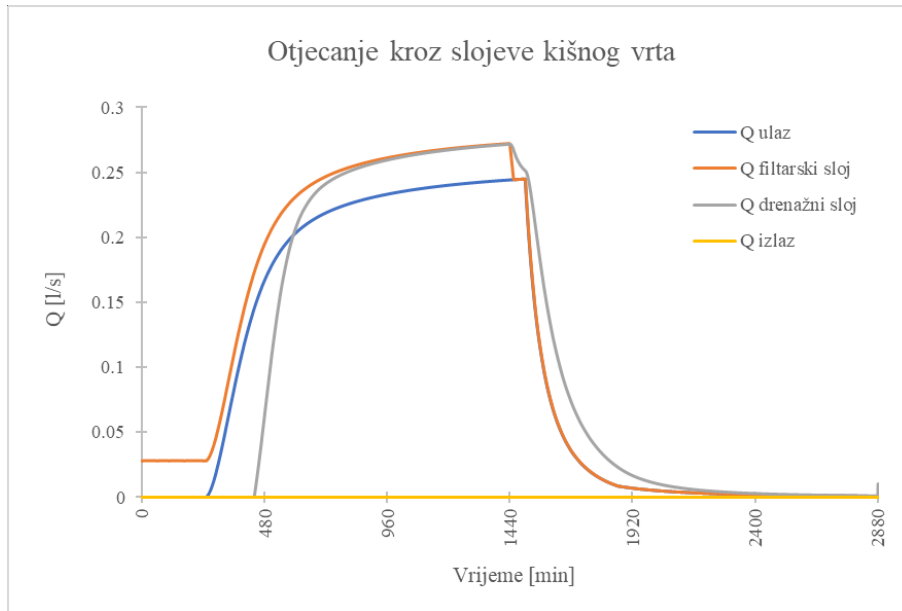
Maksimalni iznos evapotranspiracije iznosi 5.6 mm/dan, a javila se u lipnju 2006 godine dugogodišnjeg niza oborina na području grada Poreča (slika 81).

### 8.5. Model 5 – prikaz rezultata

Tablica 15 prikazuje rezultate provedenih simulacija za sva trajanja projektnih pljuskova 1, 10 i 100 godišnjih povratnih perioda. Zelenom bojom su označeni vršni izlazni protoci i pripadajuće razine vode u kišnom vrtu.

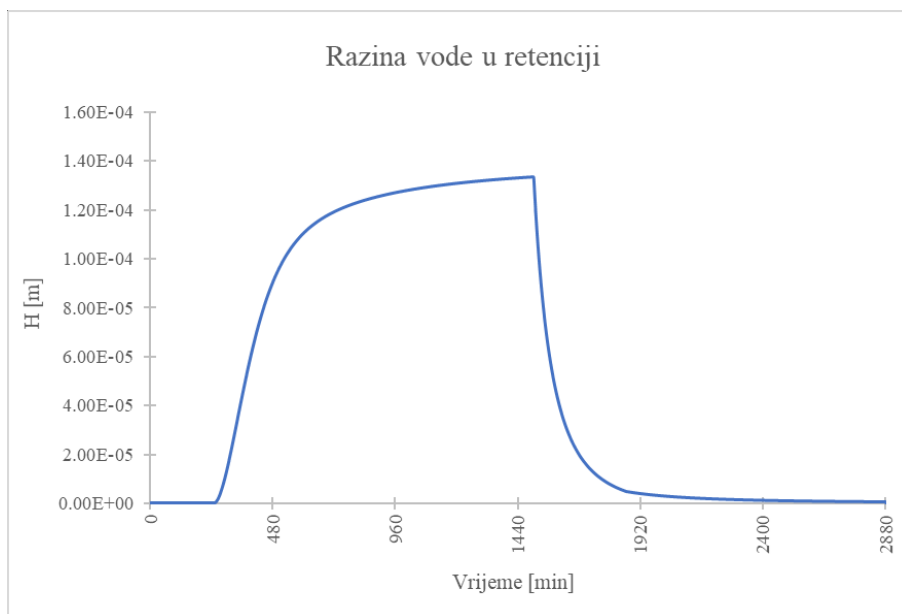
Tablica 15: Analize razina vode i vršnih protoka projektnih pljuskova Modela 5

Trajanje pljuska [min]	Vršni protok PP 1 g. [l/s]	Razina vode [m]	Vršni protok PP 10 g. [l/s]	Razina vode [m]	Vršni protok PP 100 g. [l/s]	Razina vode [m]
60	0	0.1	0.00	0.2.6	0.00	0.41
120	0	0.13	0.00	0.3	0.00	0.48
180	0	0.15	0.00	0.34	1.76	0.53
270	0	0.08	0.00	0.27	2.25	0.37
360	0	0.12	0.00	0.29	2.63	0.45
540	0	0.12	0.00	0.27	2.89	0.43
720	0	0.09	0.58	0.19	3.33	0.32
1080	0	0.09	1.78	0.13	2.57	0.22
1440	0	0.07	1.94	0.23	2.58	0.37



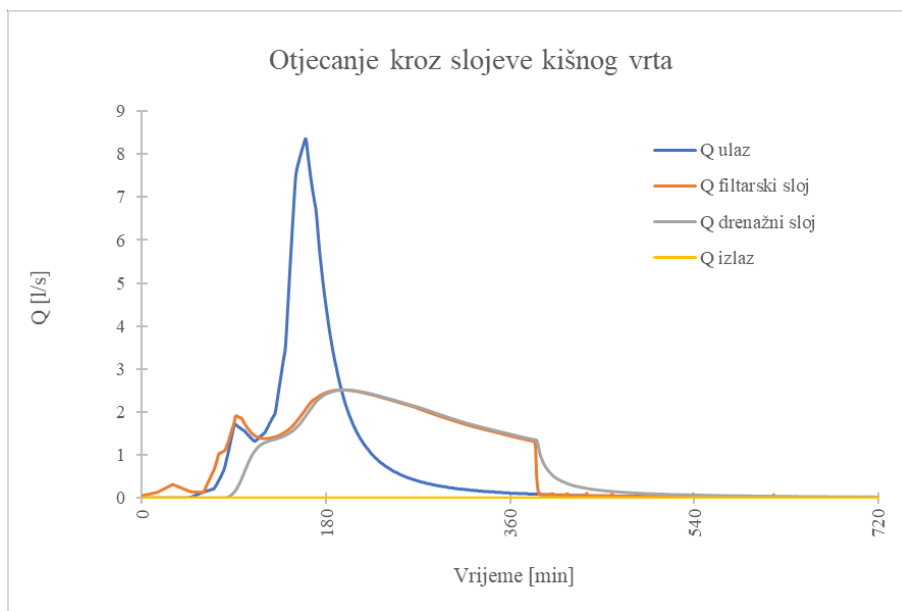
Slika 82: Model 5, 1. i 2.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Volumen oborine 90-og percentila u potpunosti je prihvaćen u kišnom vrtu (slika 82).



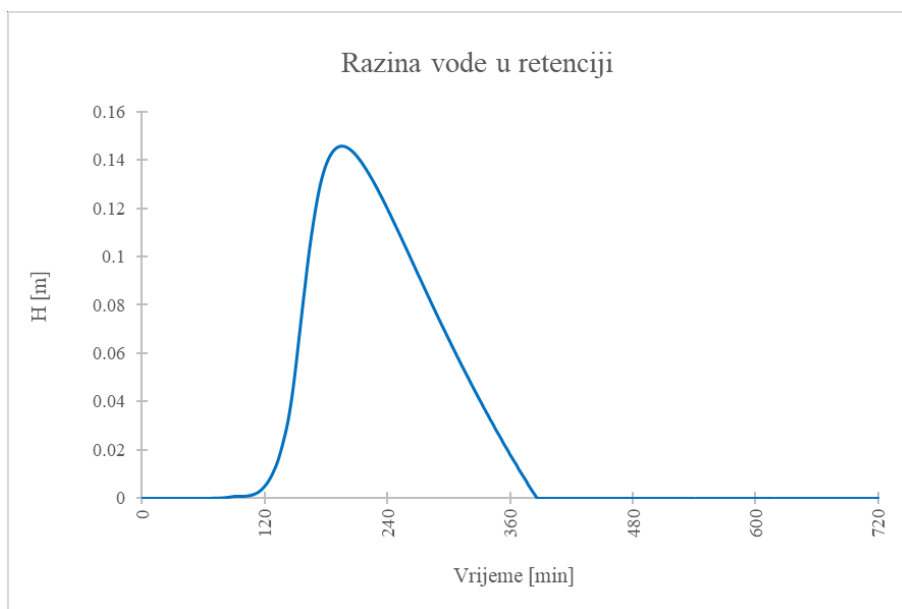
Slika 83: Model 5, 1. i 2.kriterij – razina vode u retenciji

Najviša razina vode u retenciji je  $1.34 \cdot 10^{-4}$  m, a dostignuta je u 1501 minuti oborine 90-og percentila (slika 83).



Slika 84: Model 5, 3.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

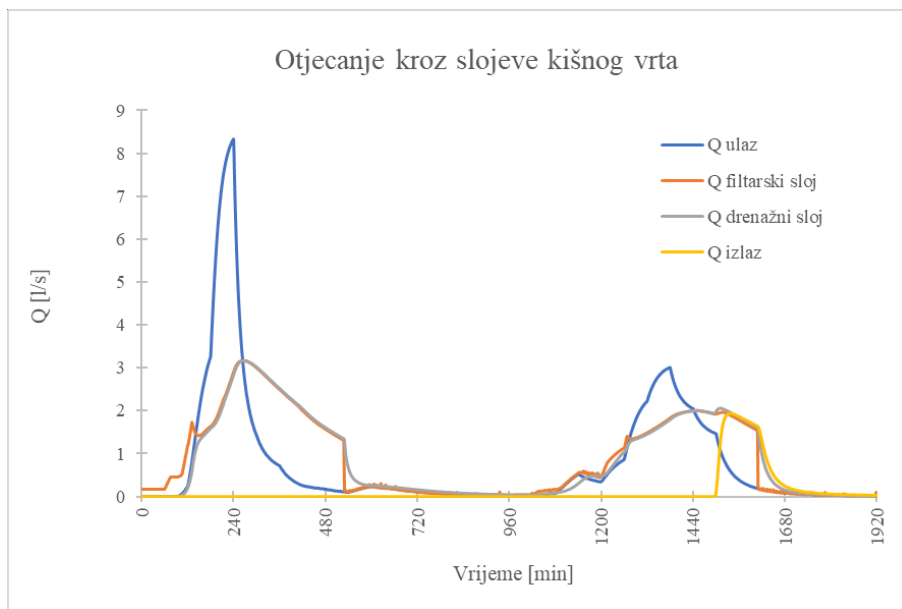
Volumen oborine mjerodavnog projektnog pljusaka trajanja 180 minuta u cijelosti je infiltriran u kišnom vrtu, izlazne cijevi nisu aktivirane (slika 84).



Slika 85: Model 5, 3.kriterij – razina vode u retenciji

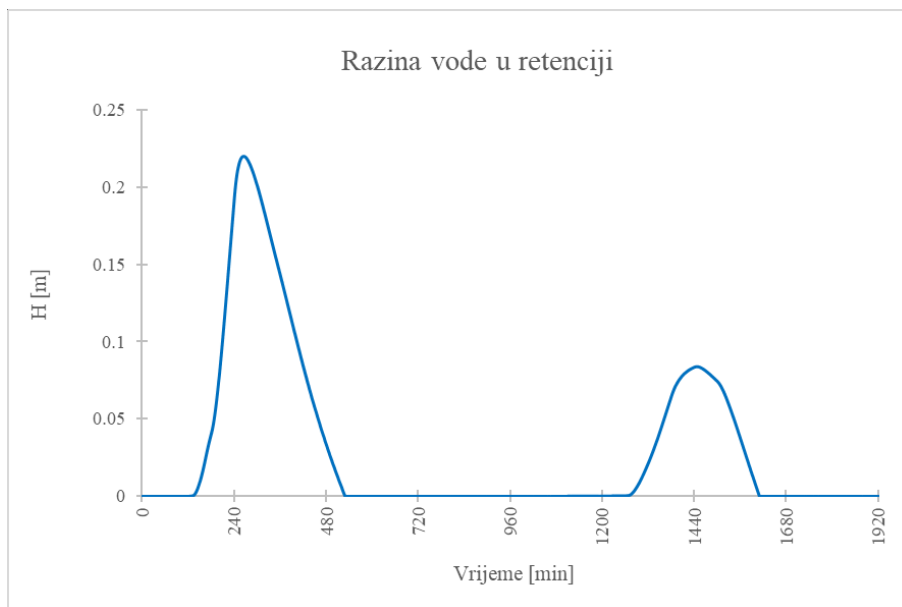
U 197-oj minuti projektnog pljuska trajanja 180 minuta, dostignuta je najveća razina vode od 0.15 m (slika 85).





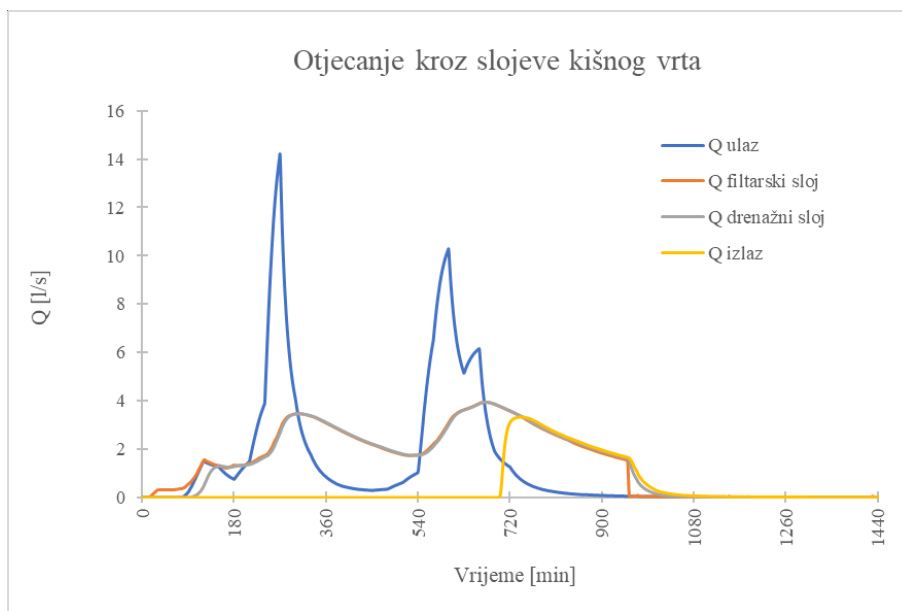
Slika 86: Model 5, 4.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Za mjerodavni projektni pljusak trajanja 1440 minuta, dostignut je vršni protok u drenažnoj cijevi u iznosu od 2 l/s. Protok se javio u 1538-oj minuti (slika 86).



Slika 87: Model 5, 4.kriterij – razina vode u retenciji

Najviša razina vode u retenciji je 0.23 m, postignuta u 266-oj minuti projektnog pljuska trajanja 1080 minuta (slika 87).



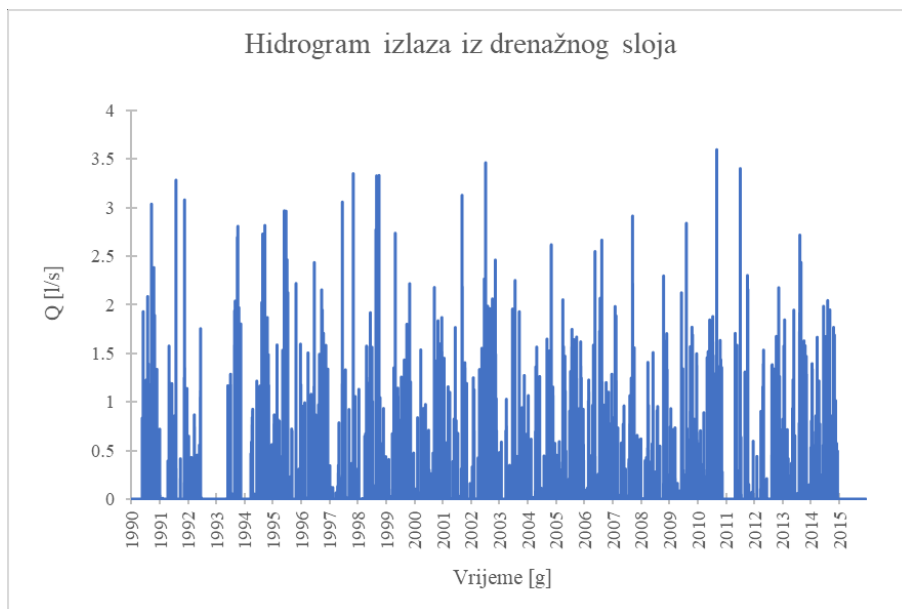
Slika 88: Model 5, 5.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Vršni protok od 3.4 l/s javlja se u 743-oj minuti za trajanje projektnog pljuska od 720 minuta (slika 88).



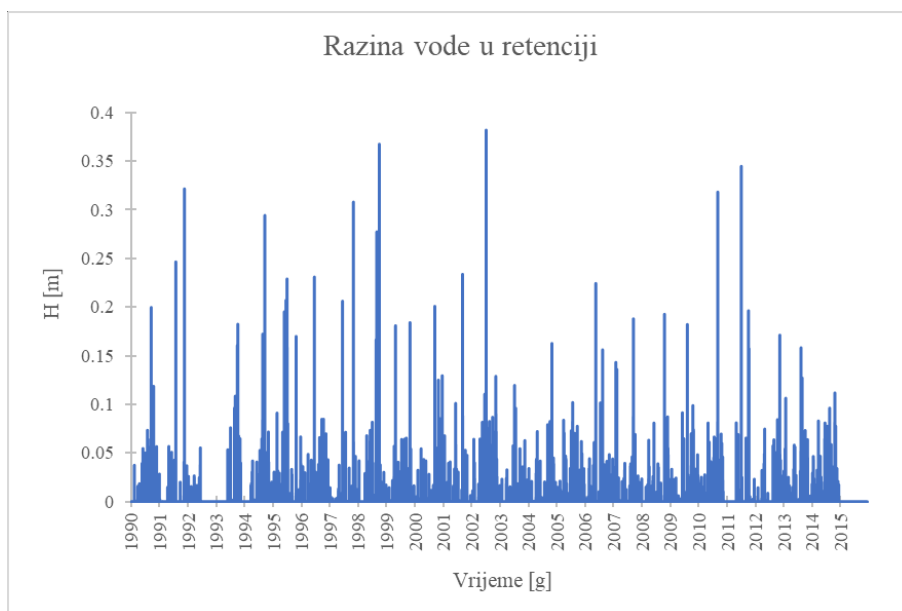
Slika 89: Model 5, 5.kriterij – razina vode u retenciji

Maksimalna razina vode je dostignuta u 672-oj minuti projektnog pljuska od 720 minuta, a njena vrijednost je 0.32 m (slika 89).



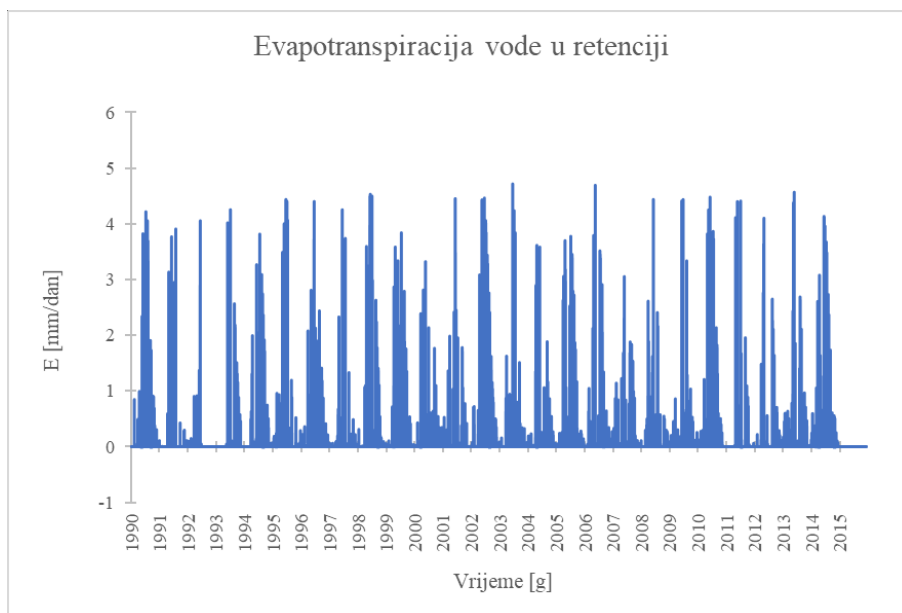
Slika 90: Model 5, dugogodišnji niz oborina – hidrogram izlaza

Za volumen dugogodišnjeg niza oborina grada Poreča dostignut je vršni protok od 3.6 l/s u rujnu 2010 godine (slika 90).



Slika 91: Model 5, dugogodišnji niz oborina – razina vode u retenciji

U srpnju 2002 godine dostignuta je maksimalna visina vode u retenciji od 0.38 m za volumen dugogodišnjeg niza oborina (slika 91).



Slika 92: Model 5, dugogodišnji niz oborina – evapotranspiracija

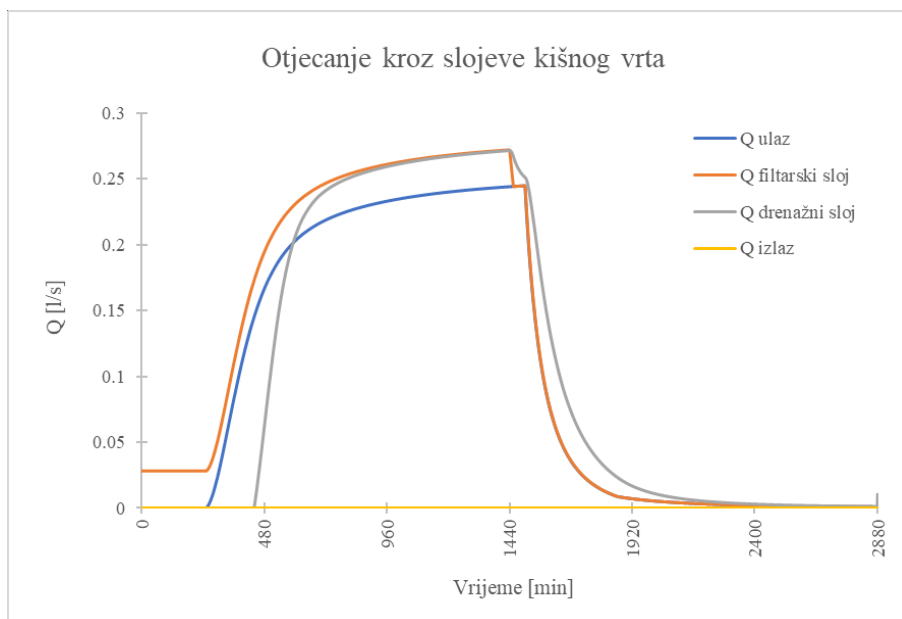
Najveća evapotranspiracija iznosi 4.8 mm/dan, a dostignuta je u lipnju 2003 godine za dugogodišnji niz oborina na području grada Poreča (slika 92).

## 8.6. Model 6 – prikaz rezultata

Tablica 16 prikazuje rezultate provedenih simulacija za sva trajanja projektnih pljuskova 1, 10 i 100 godišnjih povratnih perioda. Zelenom bojom su označeni vršni izlazni protoci i pripadajuće razine vode u kišnom vrtu.

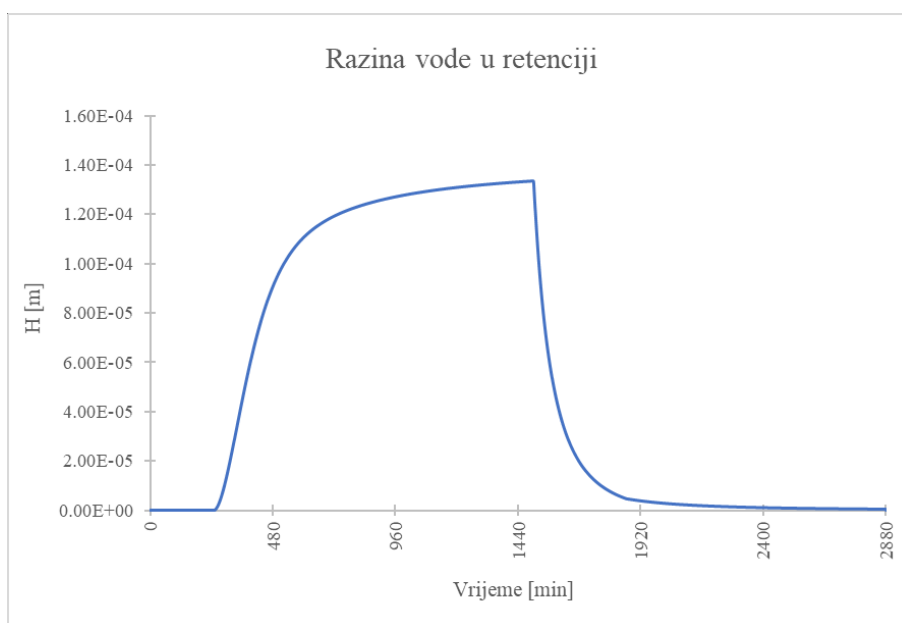
Tablica 16: Analize razina vode i vršnih protoka projektnih pljuskova Modela 6

Trajanje pljuskova [min]	Vršni protok PP 1 g. [l/s]	Razina vode [m]	Vršni protok PP 10 g. [l/s]	Razina vode [m]	Vršni protok PP 100 g. [l/s]	Razina vode [m]
60	0	0.1	0.00	0.26	0.00	0.41
120	0	0.13	0.00	0.3	1.84	0.48
180	0	0.15	0.00	0.34	2.49	0.53
270	0	0.08	1.37	0.27	3.02	0.37
360	0	0.13	1.41	0.29	3.34	0.45
540	0	0.12	1.64	0.27	2.78	0.43
720	0	0.09	1.88	0.19	3.39	0.32
1080	0	0.09	1.85	0.13	2.45	0.22
1440	0	0.07	1.97	0.23	2.56	0.37



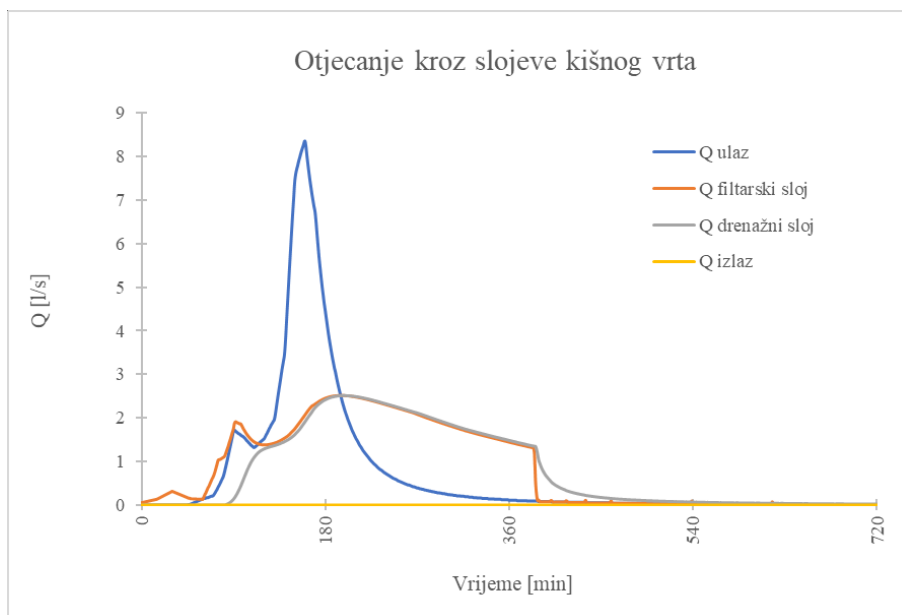
Slika 93: Model 6, 1. i 2.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Kišni vrt je u potpunosti infiltrirao cjelokupni volumen oborine 90-og percentila (slika 93).



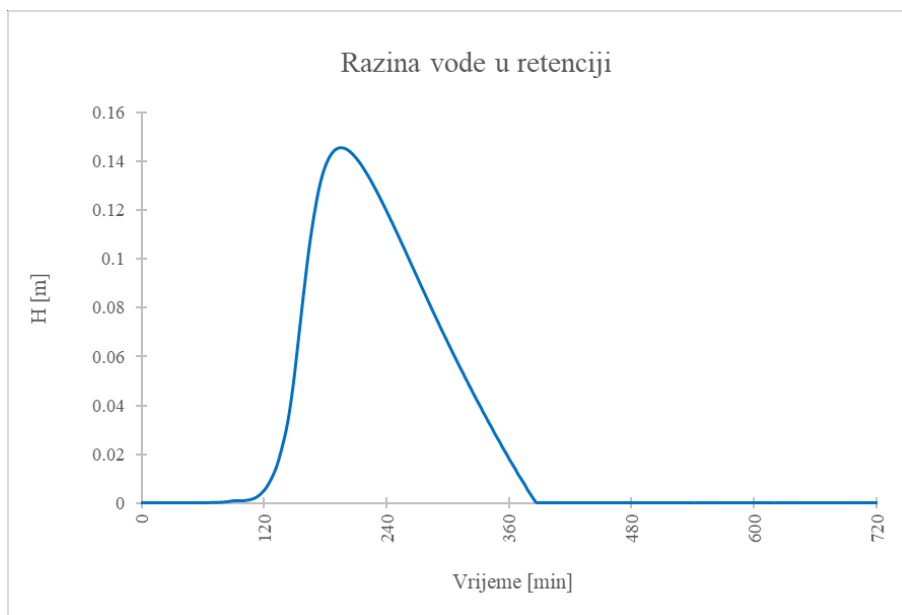
Slika 94: Model 6, 1. i 2.kriterij – razina vode u retenciji

Najveća razina vode u retenciji za volumen oborine 90-og percentila je  $1.34 \cdot 10^{-4}$  m, a dostignuta je u 1501-joj minuti (slika 94).



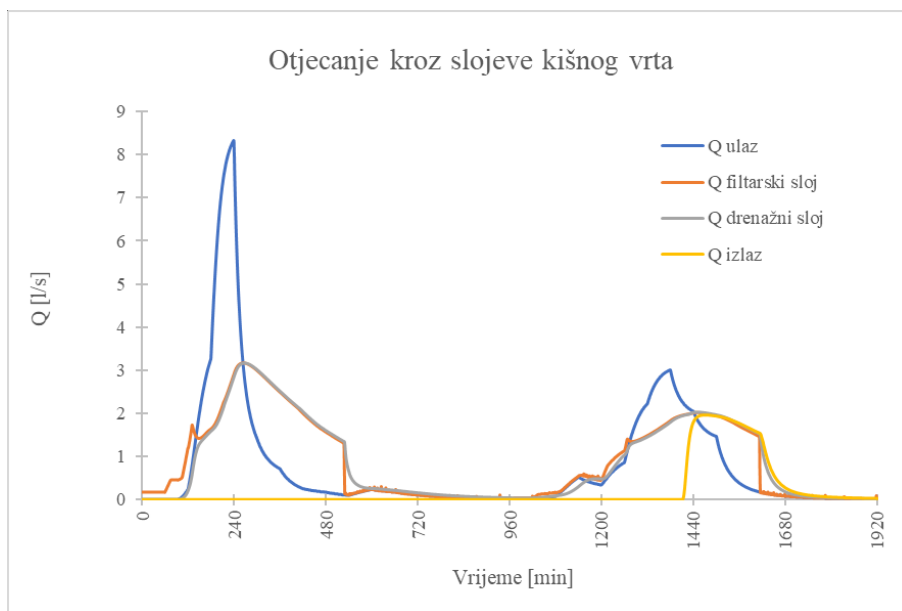
Slika 95: Model 6, 3.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Preljevna i drenažna cijev nisu aktivirane, sav volumen oborine je infiltriran u tlo. Mjerodavan projektni pljusak je trajanja 180 minuta (slika 95).



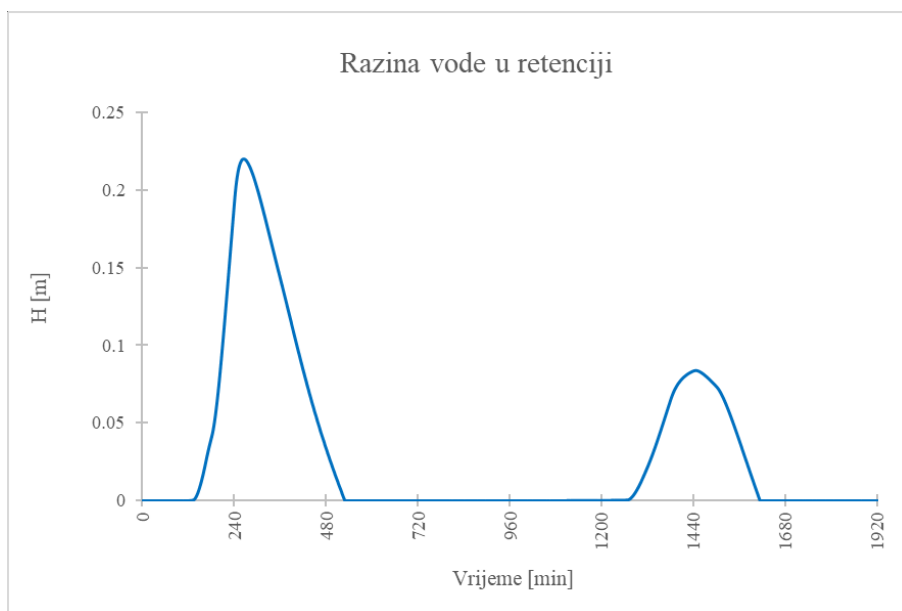
Slika 96: Model 6, 3.kriterij – razina vode u retenciji

U 197-oj minuti projektnog pljuska trajanja 180 minuta javlja se vršna razina vode od 0.15 m (slika 96).



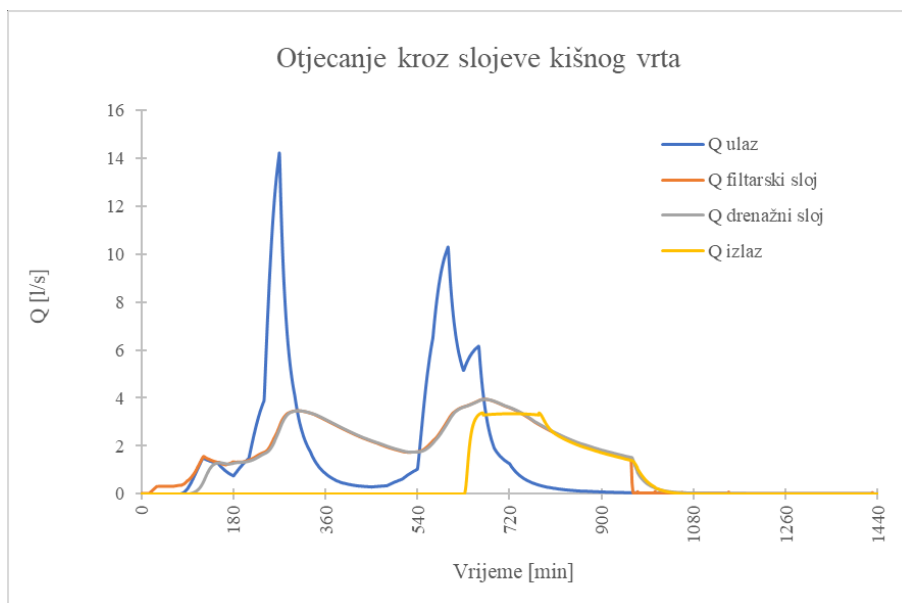
Slika 97: Model 6, 4.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Iznos vršnog protoka od 2 l/s javlja se u 1472-oj minuti oborine projektne pljuska trajanja 1440 minuta (slika 97).



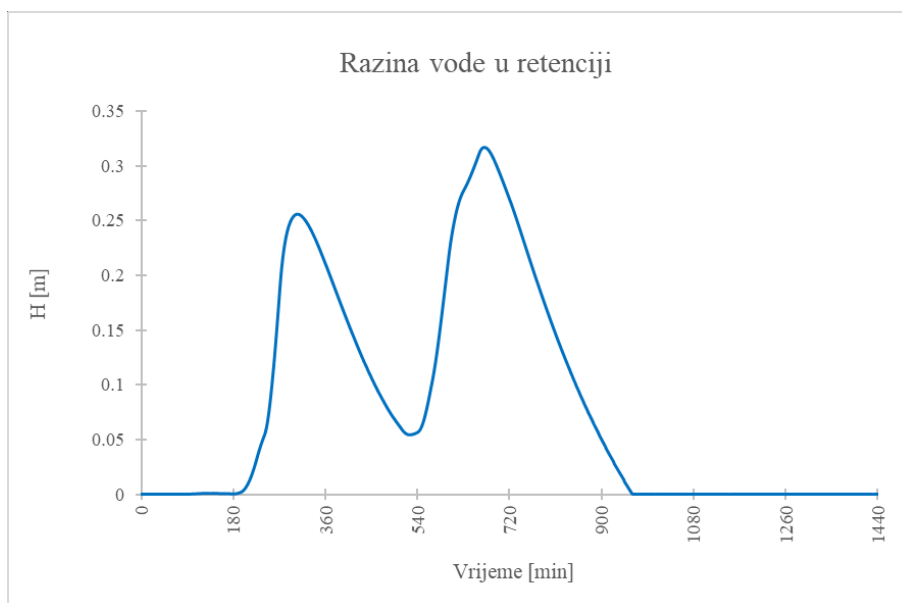
Slika 98: Model 6, 4.kriterij – razina vode u retenciji

Maksimalna razina vode u iznosu od 0.23 m dostignuta je u 266-joj minuti za projektne pljusak u trajanju od 1440 minuta (slika 98).



Slika 99: Model 6, 5.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

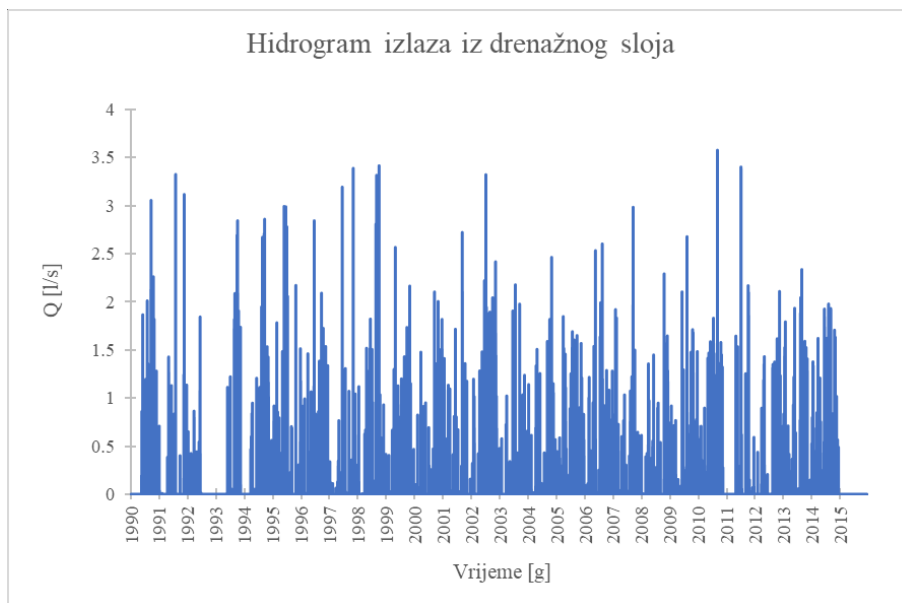
Za projektni pljusak trajanja 720 minuta javlja se protok u drenažnoj cijevi od 3.4 l/s, dostignut u 669-oj minuti (slika 99).



Slika 100: Model 6, 5.kriterij – razina vode u retenciji

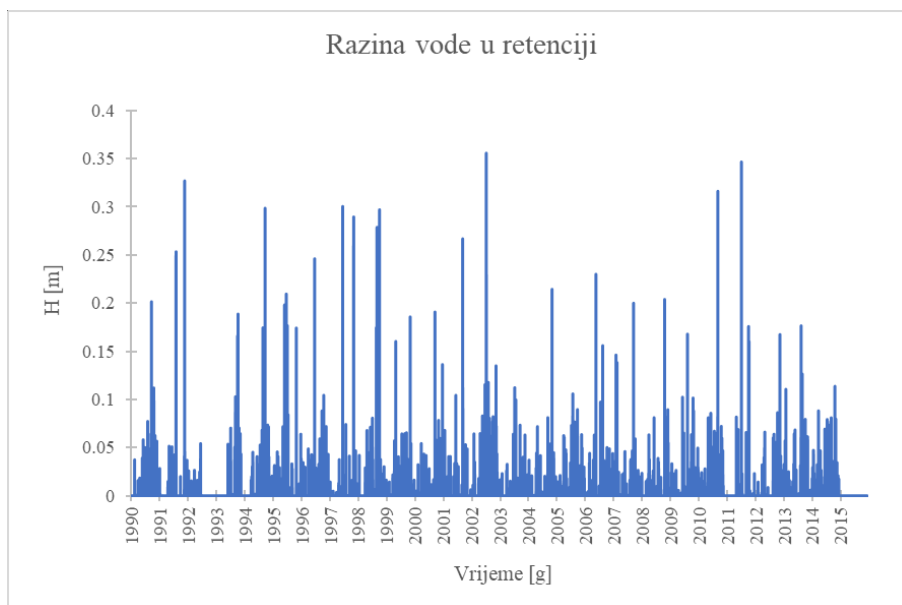
Vršna razina vode iznosi 0.32 m. Postignuta je u 672-oj minuti projektnog pljuska trajanja 720 minuta (slika 100).





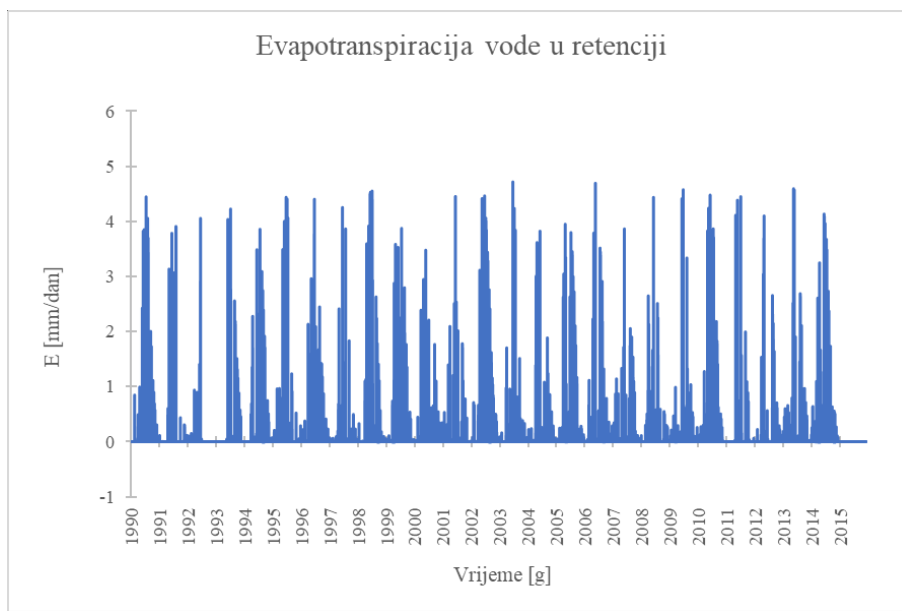
Slika 101: Model 6, dugogodišnji niz oborina – hidrogram izlaza

Za volumen dugogodišnjeg niza oborina grada Poreča javlja se najveći protok iznosa 3.6 l/s u rujnu 2010 godine (slika 101).



Slika 102: Model 6, dugogodišnji niz oborina – razina vode u retenciji

Najviša razina vode u retenciji iznosi 0.36 m, a javlja se u srpnju 2002 godine dugogodišnjeg niza oborina grada Poreča (slika 102).



Slika 103: Model 6, dugogodišnji niz oborina – evapotranspiracija

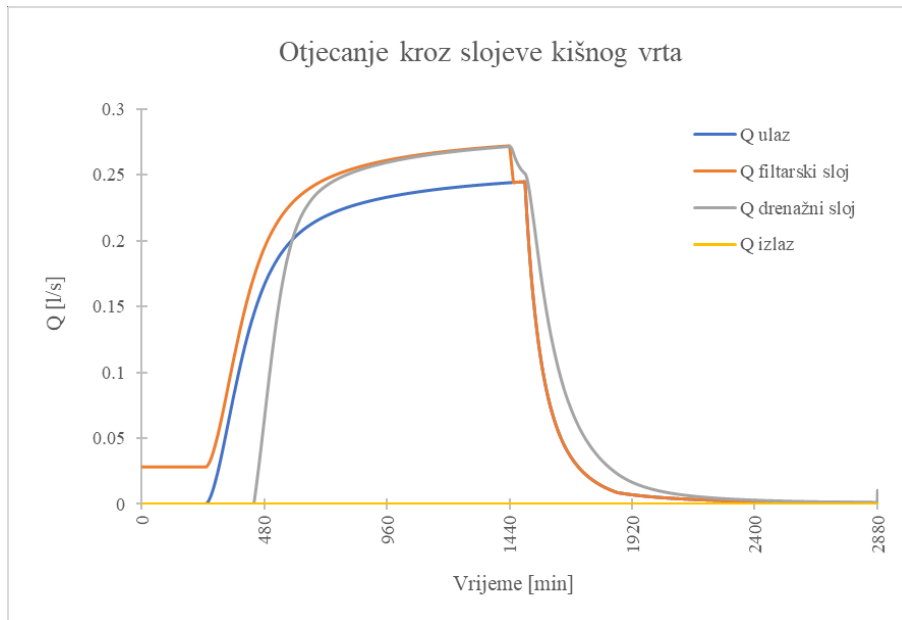
U lipnju 2003 godine postignut je najveći iznos evapotranspiracije od 4.8 mm/dan za dugogodišnji niz oborina na području Poreča (slika 103).

### 8.7. Model 7 – prikaz rezultata

Tablica 17 prikazuje rezultate provedenih simulacija za sva trajanja projektnih pljuskova 1, 10 i 100 godišnjih povratnih perioda. Zelenom bojom su označeni vršni izlazni protoci i pripadajuće razine vode u kišnom vrtu.

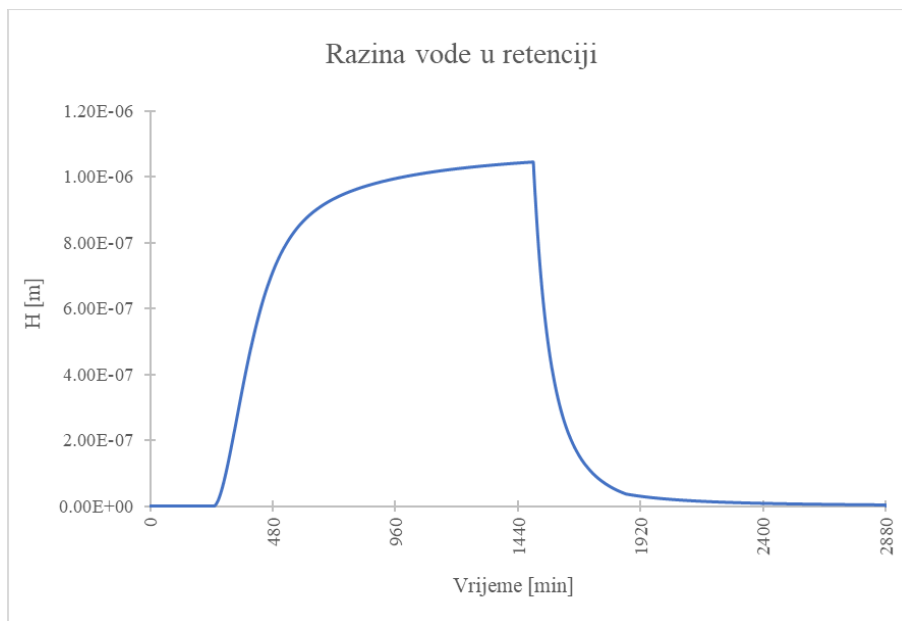
Tablica 17: Analize razina vode i vršnih protoka projektnih pljuskova Modela 7

Trajanje pljuska [min]	Vršni protok PP 1 g. [l/s]	Razina vode [m]	Vršni protok PP 10 g. [l/s]	Razina vode [m]	Vršni protok PP 100 g. [l/s]	Razina vode [m]
60	0	0.09	0.00	0.25	0.00	0.41
120	0	0.13	0.00	0.3	1.86	0.48
180	0	0.15	0.00	0.34	2.50	0.53
270	0	0.08	1.35	0.27	3.02	0.37
360	0	0.12	1.40	0.29	3.36	0.45
540	0	0.12	1.67	0.27	2.87	0.43
720	0	0.09	1.96	0.19	3.39	0.32
1080	0	0.09	1.96	0.13	2.25	0.49
1440	0	0.06	1.96	0.23	2.53	0.37



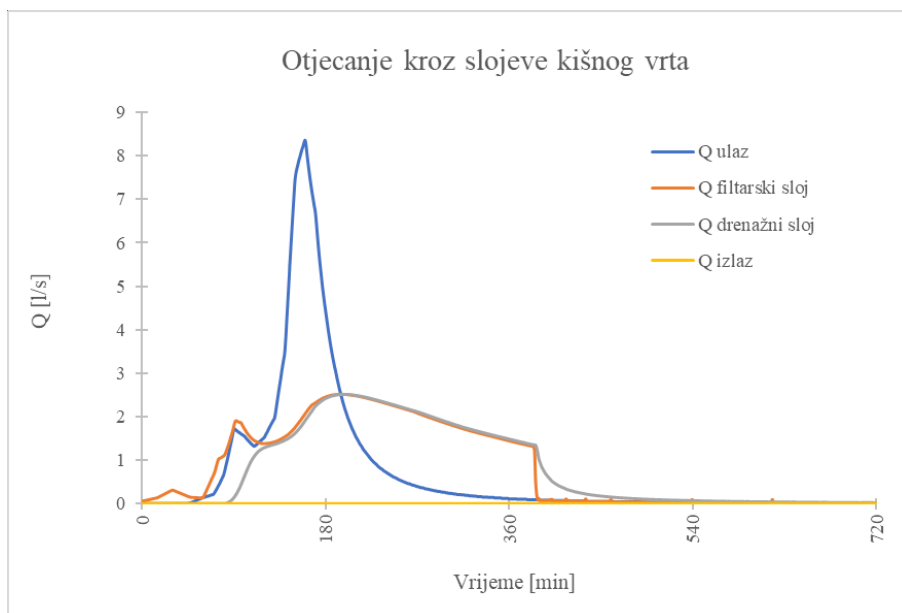
Slika 104: Model 7, 1. i 2.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Volumen oborine 90-og percentila sasvim je infiltriran u kišnom vrtu (slika 104).



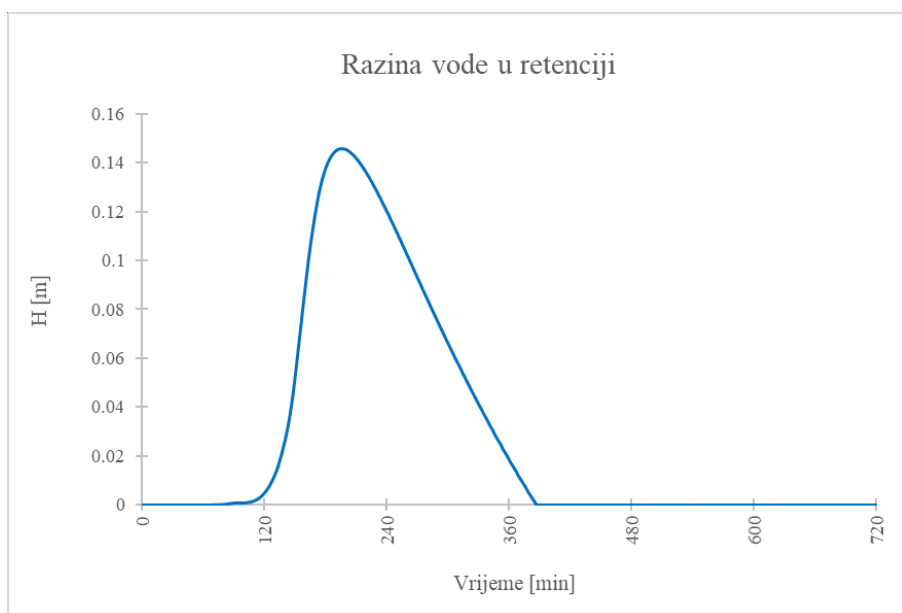
Slika 105: Model 7, 1. i 2.kriterij – razina vode u retenciji

Maksimalna razina vode javlja se u 1501-oj minuti oborine 90-og percentila. Iznosi  $1.04 \cdot 10^{-6}$  m (slika 105).



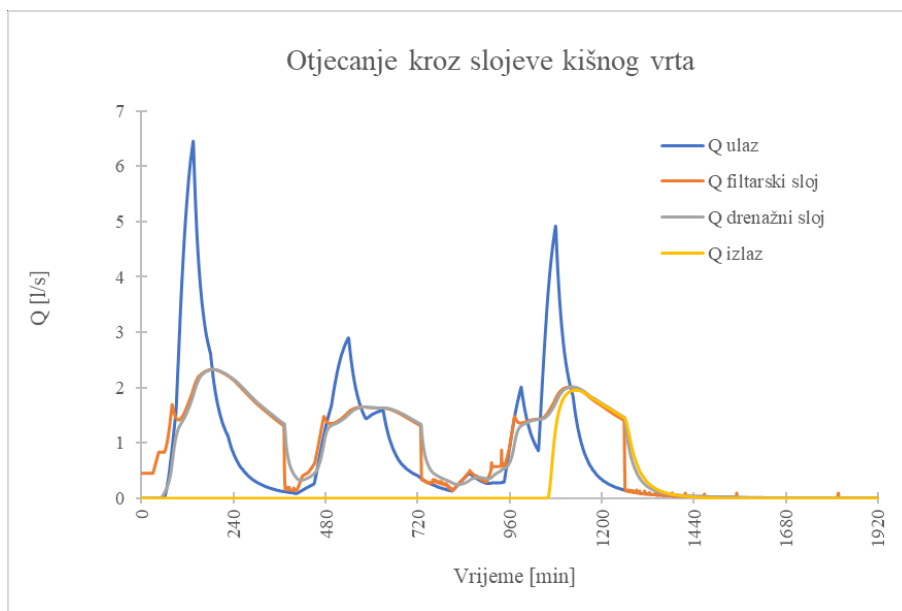
Slika 106: Model 7, 3.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Protok u izlaznim cijevima nije aktiviran za mjerodavan projektni pljusak trajanja 180 minuta (slika 106).



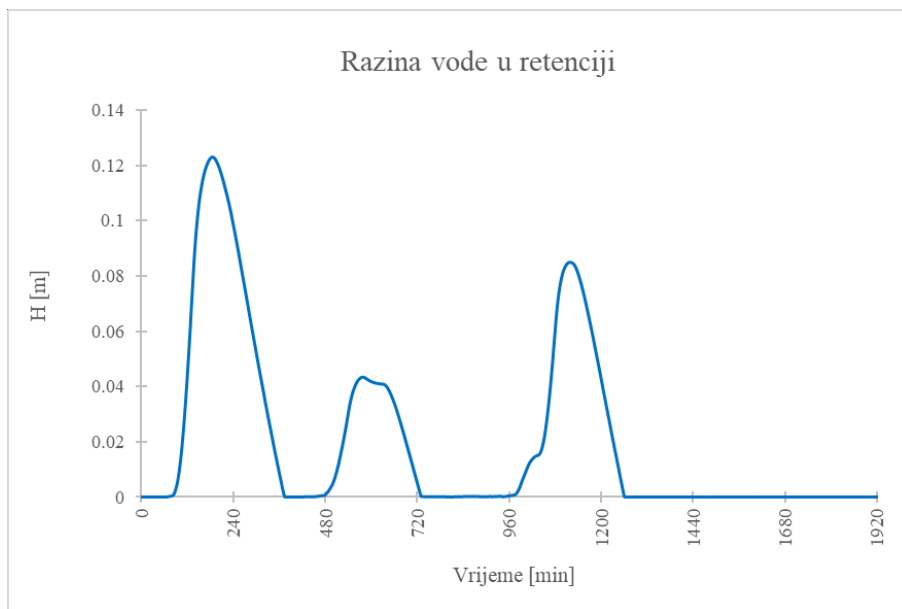
Slika 107: Model 7, 3.kriterij – razina vode u retenciji

Vršna razina vode u retenciji iznosi 0.15 m, a javila se u 197-oj minuti oborine projektnog pljuska trajanja 180 minuta (slika 107).



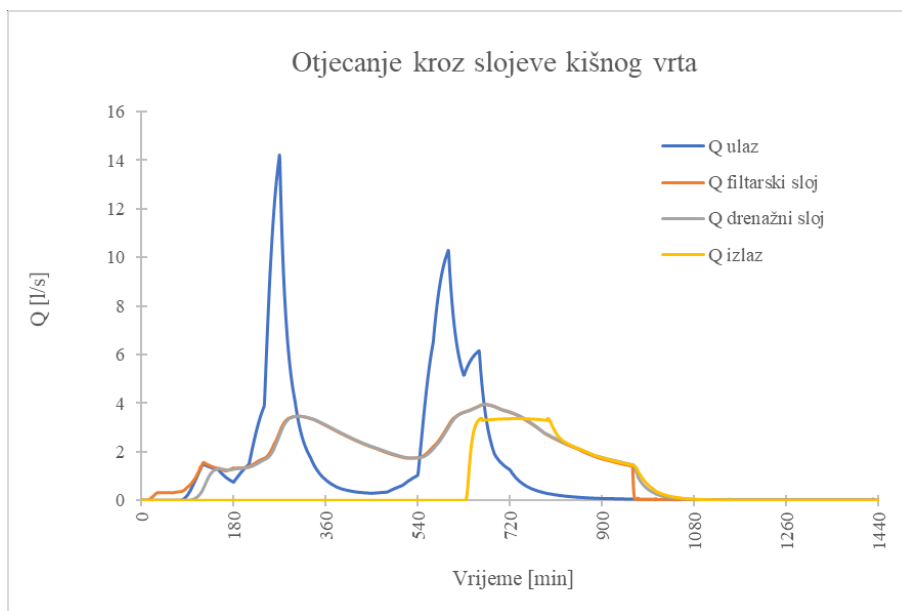
Slika 108: Model 7, 4.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

U drenažnoj cijevi javlja se najveći protok od 2 l/s u 1134-oj minuti projektnog pljuska trajanja 1080 minuta (slika 108).



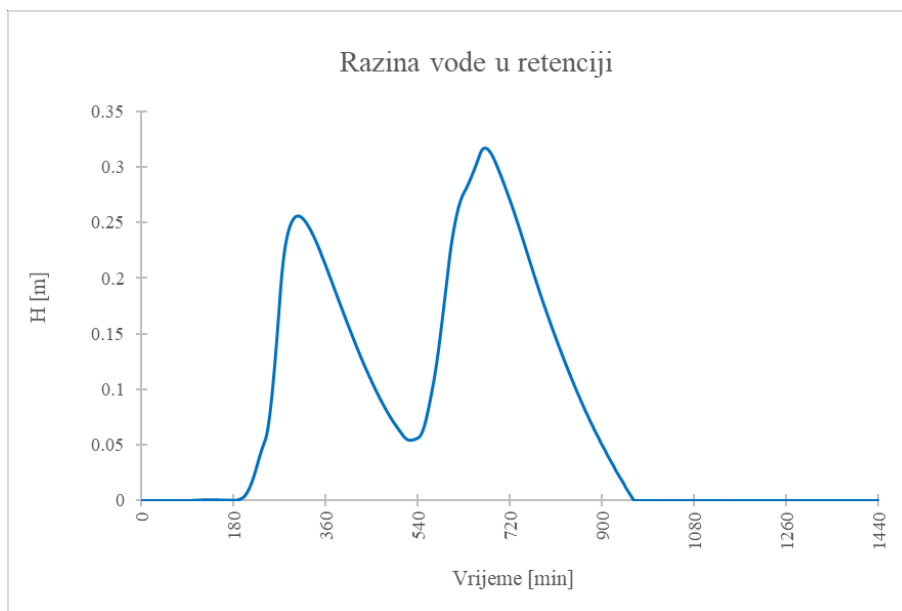
Slika 109: Model 7, 4.kriterij – razina vode u retenciji

Za projektni pljusak trajanja 1080 minuta, u 186-oj minuti javlja se maksimalna razina vode od 0.13 m (slika 109).



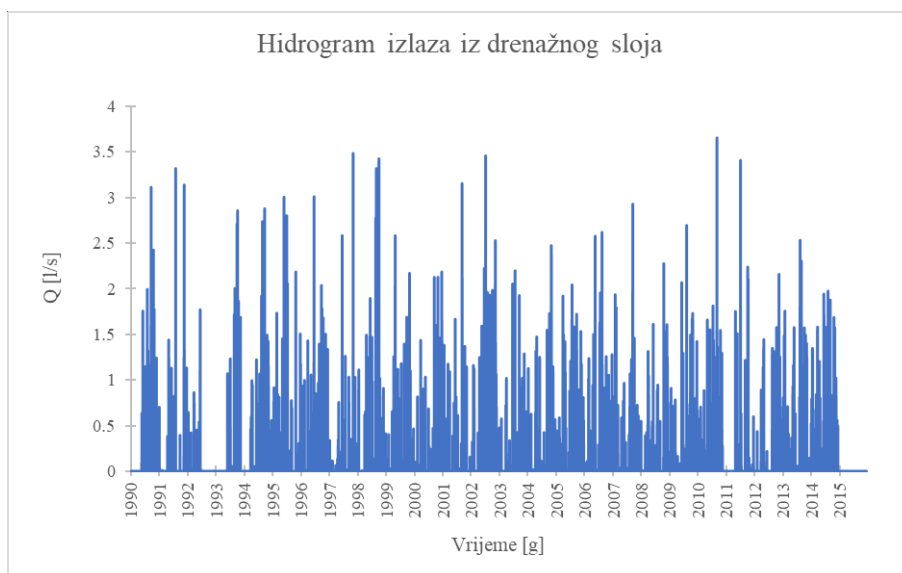
Slika 110: Model 7, 5.kriterij – otjecanje kroz slojeve kišnog vrta

Vršni protok od 3.4 l/s javlja se u drenažnoj cijevi, u 666-oj minuti projektnog pljuska trajanja 720 minuta (slika 110).



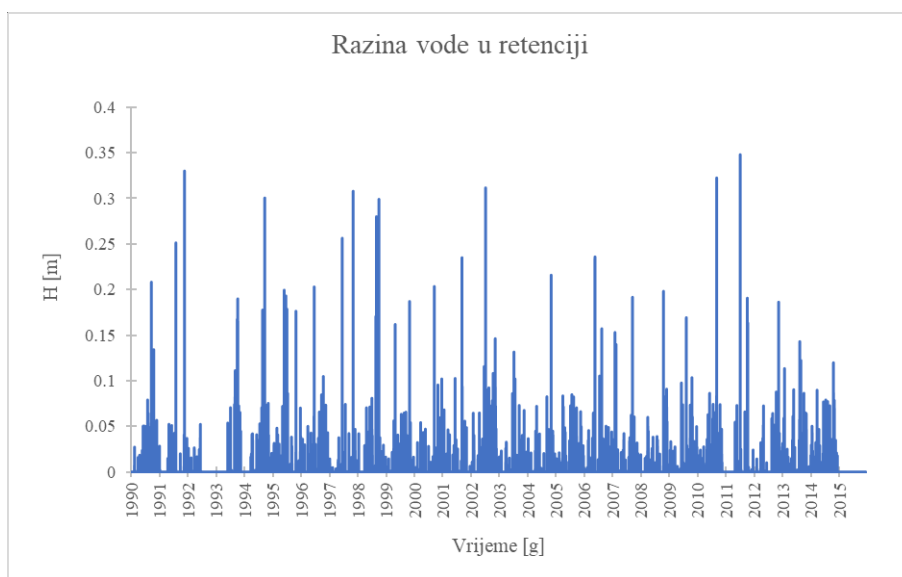
Slika 111: Model 7, 5.kriterij – razina vode u retenciji

Najveća razina vode u kišnom vrtu javlja se u 672-oj minuti projektnog pljuska trajanja 720 minuta, a njena razina je 0.32 m (slika 111).



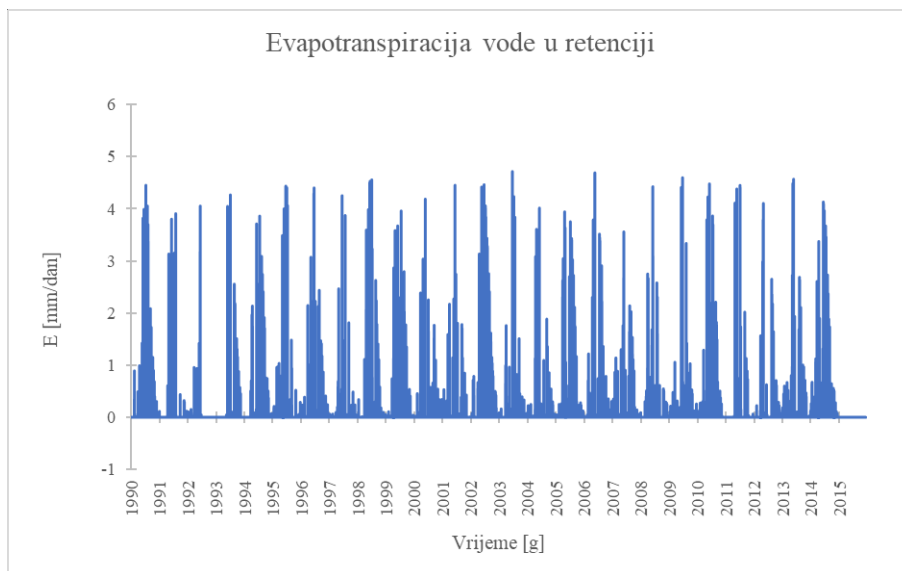
Slika 112: Model 7, dugogodišnji niz oborina – hidrogram izlaza

Maksimalni protok u iznosu od 3.7 l/s pojavljuje se u rujnu 2010 godine za volumen oborina dugogodišnjeg niza grada Poreča (slika 112).



Slika 113: Model 7, dugogodišnji niz oborina – razina vode u retenciji

Za dugogodišnji niz oborina na području grada Poreča doseže se najveća razina vode u retenciji u vrijednosti 0.35 m, u srpnju 2011 (slika 113).



Slika 114: Model 7, dugogodišnji niz oborina – evapotranspiracija

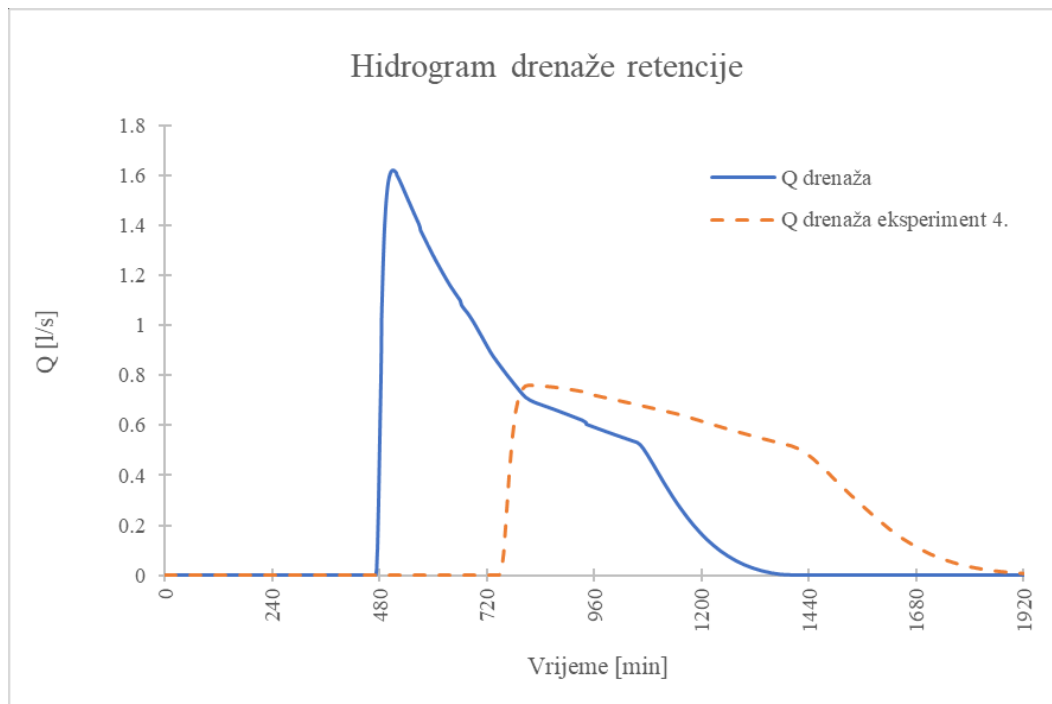
U lipnju 2003 godine postiže se maksimalna evapotranspiracija od 4.8 mm/dan za dugogodišnji niz oborina (slika 114).



## 9. DISKUSIJA REZULTATA

Provedene analize omogućile su detaljniji uvid u funkcioniranje i razumijevanje procesa u kišnim vrtovima te u postupak dimenzioniranja i odabira odgovarajućih parametara.

Odabir filterskog sloja visoke propusnosti u pravilu rezultira s vrlo niskim razinama vode u površinskoj retenciji, zbog vrlo brze infiltracije u drenažni sloj. Visoke propusnosti materijala filtarskih slojeva predstavljaju izazov kod zadovoljavanja trećeg kriterija, pošto se oborinske vode vrlo brzu infiltriraju. U ovim dimenzioniranjima propusnosti materijala su fiksne što znači da ne možemo iskoristiti materijal niže propusnosti koji bi produljio vrijeme protjecanja i time pomaknuo težište izlaznog hidrograma. Također, većom visinom filtarskog sloja moguće je pomaknuti težište izlaznog hidrograma jer će se produljiti otjecanje kroz filtarski sloj (slika 115 prikazuje graf analize osjetljivosti 4. gdje se visina filtarskog sloja povećala sa 0.3 na 0.5 m). Međutim, pokazalo se da povećanjem visine sloja podzemne retencije dok se sva oborina ne infiltrira u tlo (da se ne pojavi izlazni protok) dobije kišni vrt optimalnijih dimenzija (u smislu manje ukupne dubine vrta).



Slika 115: Model 1, analiza osjetljivosti – eksperiment br. 4.

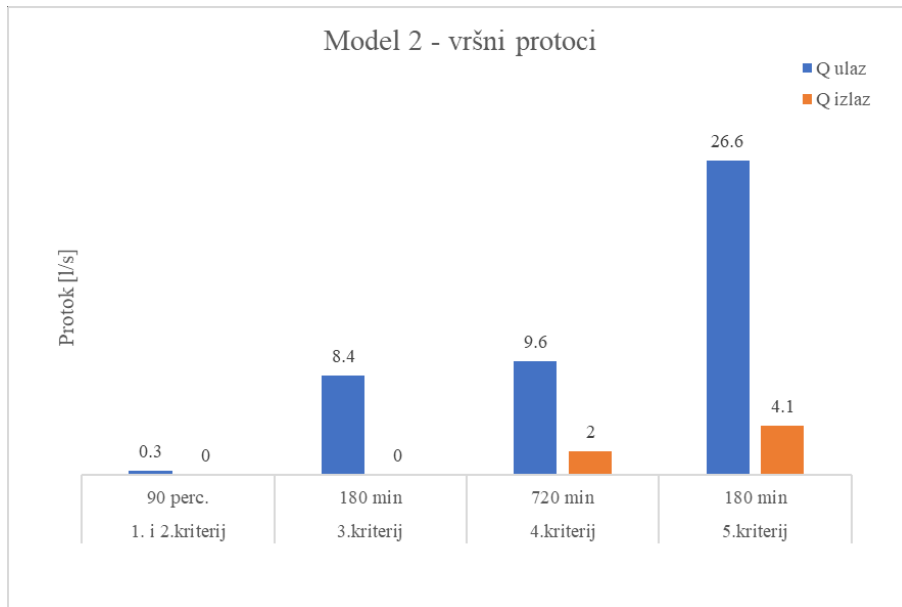
Oborine visokih intenziteta su se javljale za projektne pljuskove kraćih trajanja, pogotovo za trajanje od 180 minuta, što je i očekivano s obzirom na veličinu sliva i vrlo kratko vrijeme koncentracije. Projektni pljusak trajanja 180 minuta se pokazao mjerodavnim u zadovoljavanju trećeg kriterija za sve modele. Također za sve pete kriterije gdje je vršni protok nastao u preljevnoj cijevi mjerodavan je upravo projektni pljusak trajanja 180 minuta. Za zadovoljavanje četvrtih kriterija u modelima mjerodavnim su se pokazali pljuskovi velikih volumena oborina. To su pljuskovi duljih trajanja; 720, 1080 i 1440 minuta. Slike 116 – 121 prikazuju vršne protoke ulaznih i izlaznih hidrograma modela kišnih vrtova 2 – 7 po mjerodavnim projektnim pljuskovima za svaki kriterij.

Iako se očekivalo da će se za veće vrijednosti hidrauličkih provodljivosti, visine slojeva modela biti manje s obzirom da modeli 5, 6 i 7 imaju jednaku površinu, pokazalo se suprotno. To vjerojatno polazi iz toga da model 5 ima vrlo niski stupanj saturacije, a za model 7 su parametri propusnosti preuzeti iz predefiniраниh materijala GIFMod programa, tablica 18 prikazuje sve parametre propusnosti korištene za dimenzioniranje Modela 2 – 7.

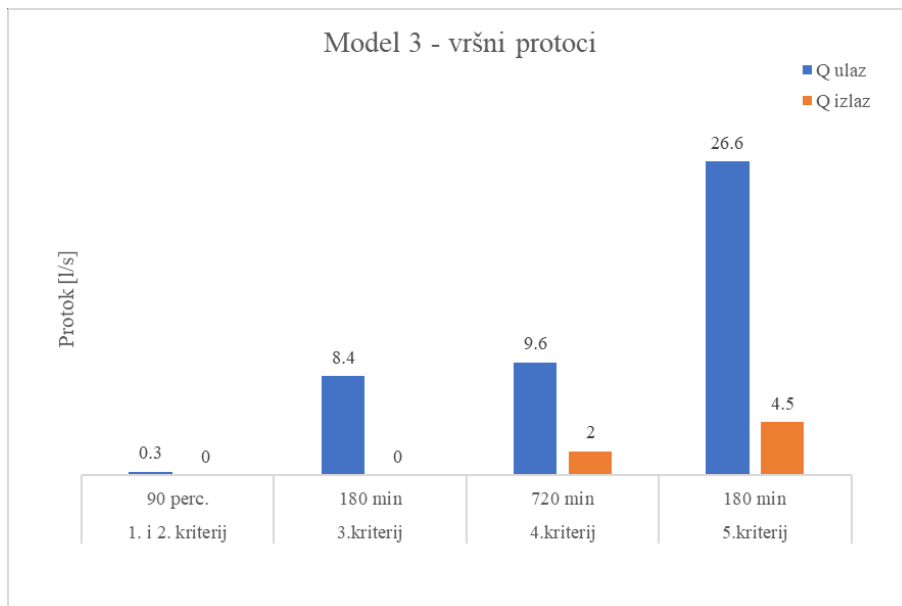
Za dugogodišnje nizove oborina grada Poreča u niti jednom modelu nije došlo do aktiviranja sigurnosnog preljeva. Za dugogodišnje nizove oborina na području grada Poreča, evapotranspiracija je ovisila pretežito o površini kišnog vrta; veća površina je rezultirala većom vršnom evapotranspiracijom i obratno.

Tablica 18: Parametri propusnosti filtarskog sloja i prirodnog tla

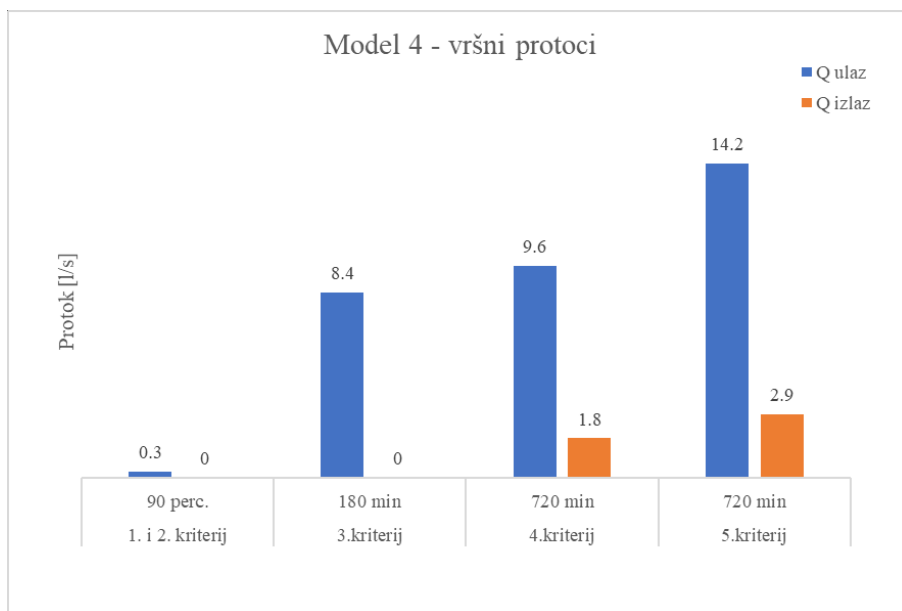
Filtarski sloj					Prirodno tlo				
$\theta_r$	$K_s$ [m/dan]	$\theta_s$	$\alpha$ [m <sup>-1</sup> ]	n	$\theta_r$	$K_s$ [m/dan]	$\theta_s$	$\alpha$ [m <sup>-1</sup> ]	n
0.05	3	0.34	3.2	2.7	0.02	0.15	0.15	3	1.5
0.06	1.5	0.35	3.1	2.1	0.05	0.07	0.29	2.9	1.2
0.05	1	0.29	2.9	1.9	0.068	0.036	0.38	0.8	1.09
prosjeck					prosjeck				
0.053	1.833	0.327	3.067	2.233	0.046	0.085	0.273	2.233	1.263



Slika 116: Model 2 – vršni protoci ulaznih i izlaznih protoka prema kriterijima

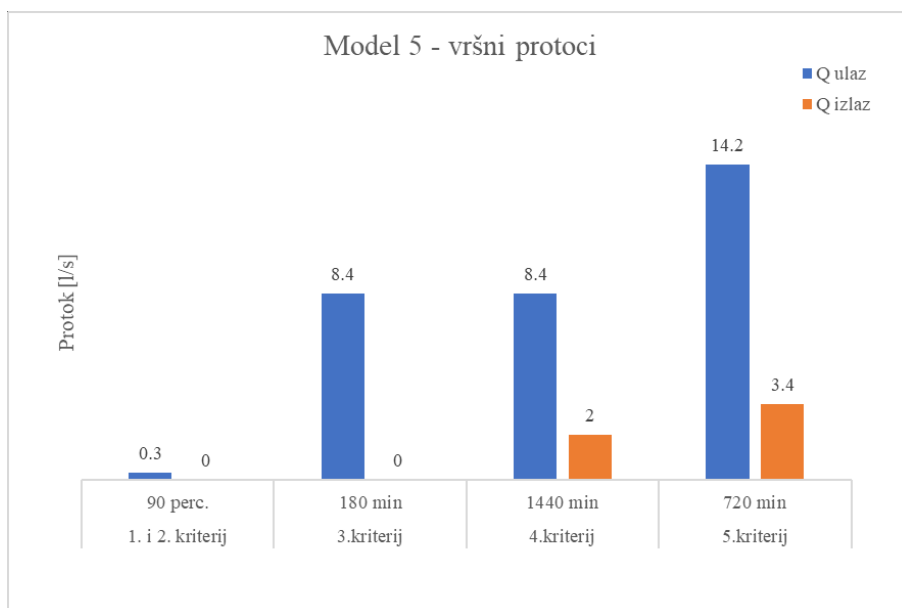


Slika 117: Model 3 – vršni protoci ulaznih i izlaznih protoka prema kriterijima

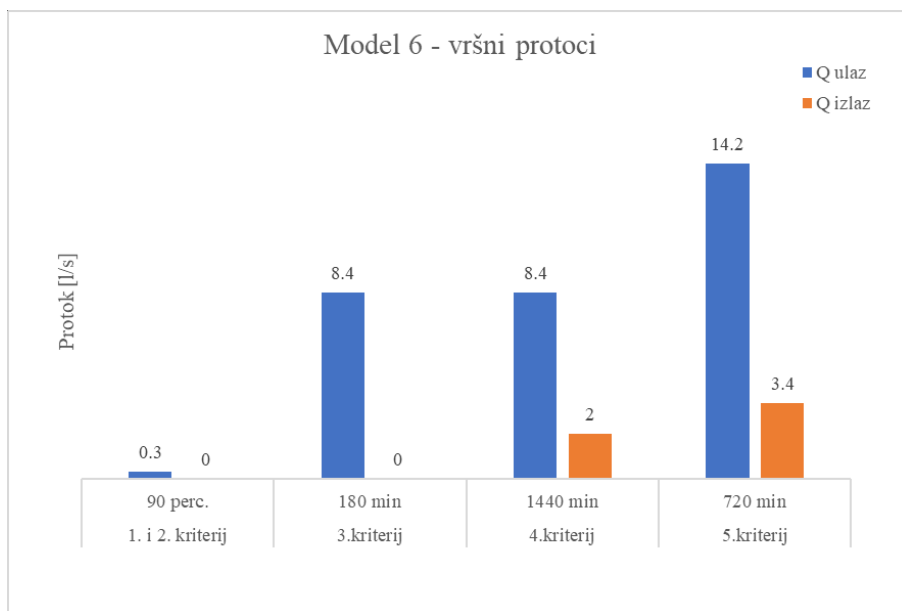


Slika 118: Model 4 – vršni protoci ulaznih i izlaznih protoka prema kriterijima

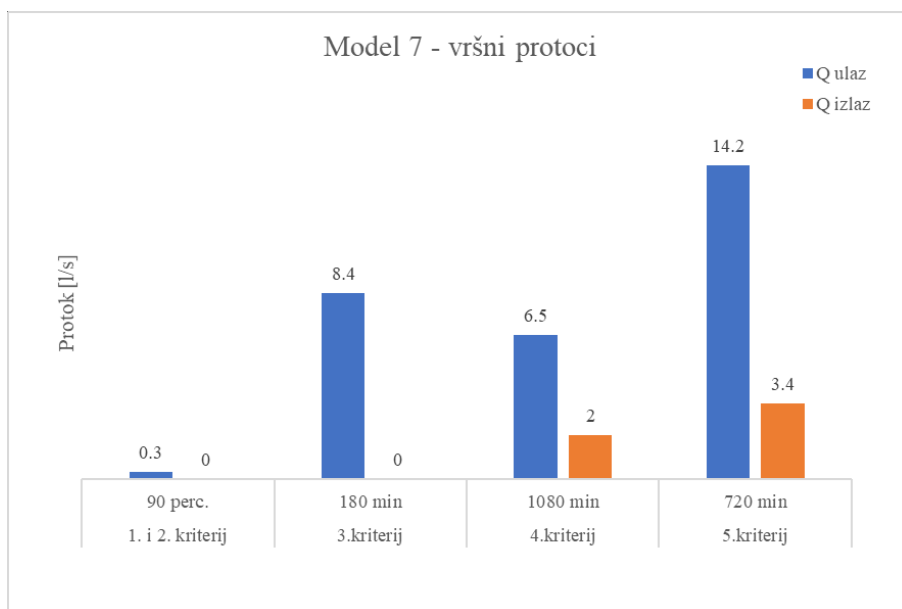
Vidljivo je da je za modele 2 – 4; gdje je varijabilna propusnost filtarskog sloja, vršni protok modela 4 znatno manja od modela 2 i 3 za 5.kriterij. Kod modela 4 vršni protok izazvan je u drenažnoj cijevi dok je kod modela 2 i 3 izazvan u preljevnoj cijevi.



Slika 119: Model 5 – vršni protoci ulaznih i izlaznih protoka prema kriterijima



Slika 120: Model 6 – vršni protoci ulaznih i izlaznih protoka prema kriterijima



Slika 121: Model 7 – vršni protoci ulaznih i izlaznih protoka prema kriterijima

Vidljivo je da su na modelima 5 – 7 vršne vrijednosti izlaznih hidrograma vrlo slične (naravno to su zaokružene vrijednosti). Teško je zaključiti da je propusnost prirodnog tla ovdje nebitna s obzirom na prethodno opisane potencijalne probleme kod razlika u propusnostima.



## 10. ZAKLJUČAK

U okviru ovoga rada provedeno je modeliranje nekoliko kišnih vrtova s obzirom na različite propusnosti filtarskog sloja kišnog vrta i prirodnog tla, kako bismo bolje razumjeli utjecaj vrste tla i njegove propusnosti na optimalno dimenzioniranje kišnih vrtova. Proračun dotoka oborine sa slivne površine u kišni vrt proveden je hidrauličkim modeliranjem u SWMM računalnom programu, dok je generiranje oborine nad kišnim vrtom u svrhu dobivanja podataka o procjeđivanju kroz slojeve kišnog vrta te ispuštanju iz kišnog vrta provedeno u GIFMod računalnom programu.

Pored modeliranja kišnih vrtova različitih propusnosti, provedene su i analize osjetljivosti kako bismo bolje razumjeli kako različiti parametri i geometrijske karakteristike kišnog vrta utječu na izlazne protoke, razine vode te infiltraciju vode u tlo. Cilj je bio dimenzionirati kišne vrtove tako da udovolje postavljenim kriterijima minimalnih dimenzija, čime smo postigli najoptimalniji oblik kišnog vrta.

GIFMod se istaknuo kao koristan alat zbog svog modularnog pristupa hidrauličkom proračunu, omogućavajući projektantu odabir različitih parametara i algoritama ovisno o raspoloživim podacima i složenosti projekta.

Analizom rezultata modeliranja može se zaključiti da brzina procjeđivanje oborinske vode kroz slojeve kišnog vrta ovisi o svim relevantnim parametrima tla, a ne samo hidrauličkoj provodljivosti tla; koja je ipak najznačajniji faktor. Preporuka je da bi trebalo provesti dodatna modeliranja kišnih vrtova sa manjim hidrauličkim provodljivostima filtarskih slojeva jer su velike provodljivosti predstavljale ograničenje kod zadovoljavanja 1. i 2. kriterija. Također bi se trebale provesti dodatne analize osjetljivosti za sve parametre propusnosti, pogotovo bi trebalo provesti dodatne analize za različite saturirane vlažnosti tla, modeliranja za tla različitih saturiranih vlažnosti te sličnih ostalih parametara propusnosti. Potencijalni nedostaci ovog rada upravo su u vidu izbora podataka propusnosti tla i filtarskog sloja i nedovoljan broj analiza osjetljivosti i provođenje analiza osjetljivosti za više projektnih pljuskova različitih povratnih perioda.

Dodatna preporuka je da se provede detaljno modeliranje kišnog vrta za područje sa kojeg je moguće dobiti detaljne podloge o stvarnoj propusnosti prirodnog tla uz meteorološke podloge istog područja u svrhu dobivanja realnog modela kišnog vrta te provođenje analize učinkovitosti funkcioniranja istog za duži period oborina.

Ovaj rad je služio za dodatno upoznavanje integralnog pristupa dimenzioniranju te detaljnije upoznavanje sa procesima koji se odvijaju u sustavima za odvodnju oborinskih voda koje su temeljene na prirodnim rješenjima. Velik dio ovog rada proveo se na samostalno upoznavanje sa radom u GIFMod računalnom programu i proučavanjem različitih priručnika kako bi se moglo provesti modeliranje te dobiti razumijevanja o načinu rada računalnog programa što će biti vrijedno iskustvo za budući rad u struci.



## Literatura

- [1] Oborina, *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=44599>, pristupljeno 10.9.2023.
- [2] Minnesota Stormwater Steering Committee, *Minnesota Stormwater Manual*, Minnesota Pollution Control Agency, 2008.
- [3] U.S. Climate Resilience Toolkit, <https://toolkit.climate.gov/image/2907>, pristupljeno 10.9.2023.
- [4] Krvavica, N., *predavanja iz predmenta Urbani vodni sustavi*, prezentacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2023.
- [5] The Dirt, <https://dirt.asla.org/2021/08/04/kongjian-yu-defends-his-sponge-city-campaign/>, pristupljeno 10.9.2023.
- [6] Retencija, *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=52566>, pristupljeno 10.9.2023.
- [7] Transpiracija, *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=62054>, pristupljeno 10.9.2023.
- [8] Isparavanje, *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=27953>, pristupljeno 10.9.2023.
- [9] Evapotranspiracija, *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021, <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=18696>, pristupljeno 10.9.2023.
- [10] Sharma R, Malaviya P., *Management of stormwater pollution using green infrastructure: The role of rain gardens*, Wiley Interdisciplinary Reviews: Water., 2021.
- [11] Marion SWCD, <https://www.marionswcd.net/why-install-a-rain-garden/>, pristupljeno 10.9.2023.
- [12] Resilient East, <https://www.resilienteast.com/raingardens>, pristupljeno 10.9.2023.

- [13] MPRnews, <https://www.mprnews.org/story/2015/07/27/rain-gardens-fight-pollution>, pristupljeno 10.9.2023.
- [14] Massoudieh A., Maghrebi M., Kamrani B., Nietch C., Tryby M., Aflaki S., Panguluri S., *A flexible modeling framework for hydraulic and water quality performance assessment of stormwater green infrastructure*, Environmental Modelling & Software, 2017.
- [15] Geoinformacijski sustav, *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=21696>, pristupljeno 10.9.2023.
- [16] Tablični kalkulator, *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=60117>, pristupljeno 10.9.2023.
- [17] Rossman, L., A., Simon, M., A., *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2*, Center for Environmental Solutions and Emergency Response, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, 2022.
- [18] ResearchGate, [https://www.researchgate.net/figure/Storm-water-management-model-SWMM-modeling-map-of-the-study-area\\_fig1\\_322904185](https://www.researchgate.net/figure/Storm-water-management-model-SWMM-modeling-map-of-the-study-area_fig1_322904185), pristupljeno 10.9.2023.
- [19] Massoudieh, A., Aflaki, S., *User's Manual for Green Infrastructure Flexible Model (GIFMod)*, US EPA, 2017.
- [20] Alikhani, J., Nietch, C., Jacobs, S., Shuster, B., Massoudieh, A., *Modeling and design scenario analysis of long-term monitored bioretention system for rainfall-runoff reduction to combined sewer in Cincinnati, OH*, Journal of sustainable water in the built environment., American Society of Civil Engineers, 2020.
- [21] Rossman, L., A., Huber W., C., *Stormwater Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology (Revised)*, National Risk Management Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, 2016.
- [22] Rossman, L., A., *Storm Water Management Model Reference Manual Volume II – Hydraulics*, National Risk Management Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, 2017.
- [23] New York State Department of Environmental Conservation, *Stormwater Management Design Manual*, NYSDEC, New York, 2022.

- [24] Parentium.com, <https://www.parentium.com/clanak/novi-lidl-se-otvara-9-prosinca>, pristupljeno 10.9.2023.
- [25] Town of Poreč – Parenzo, *Strategija prilagodbe klimatskim promjenama grada Poreča*, 2016.
- [26] DLS d.o.o. Rijeka, *Elaborat zaštite okoliša uz zahtjev za ocjenu o potrebi procjene utjecaja na okoliš za zahvat izgradnje kolektorske mreže sanitarne odvodnje naselja Baderna*, Odvodnja Poreč d.o.o., Rijeka, 2015.
- [27] Građevinski fakultet u Rijeci, Vodoprivredno-projektne biro d.d., Državni hidrometeorološki zavod, *Studija procjene opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina i djelovanja mora, Knjiga 2: Procjena od opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina na pilot područjima*, Rijeka, Zagreb, 2021.
- [28] Copernicus, <https://climate.copernicus.eu/>, pristupljeno 10.9.2023.
- [29] Newcomer, M., E., Gurdak, J., J., Sklar, L., S., Nanus, L., *Urban recharge beneath low impact development and effects of climate variability and change*, Water Resources Research, 2014.