

Универзитет у Београду  
Грађевински факултет



Мастер рад  
Хидроинформатика

Израда и калибрација модела кишне  
каналације на делу слива Новог  
Београда

Кандидат:  
Милан Петровић 559/11

Ментор:  
Доц. др Милош Станић

# Садржај

Увод.....	4
Методологија .....	5
Увод.....	5
Опис слива.....	6
Улазни подаци и подаци коришћени у калибрацији модела.....	7
Одабрани програмски пакети и основе математичког модела .....	8
Елементи мреже.....	9
Моделирање отицаја.....	9
Моделирање протицаја кроз канализациону мрежу.....	12
Формирање модела слива .....	14
Подаци о мрежи.....	14
Подаци о терену .....	15
Обрада података о падавинама .....	17
Мерења на терену.....	21
Одабир локације.....	21
Мерна опрема.....	22
Калибрација сонде .....	23
Подешавање логера.....	24
Проблеми.....	25
Резултати .....	27
Обрада података о отицају .....	28
Тумачење измерених нивоа.....	28
Количине препумпаних вода .....	31
Хидрограм кишне епизоде .....	34
Калибрација математичког модела .....	35
Увод.....	35
Калибрација .....	36
Модел са једним типом терена .....	36
Модел са различитим типовима терена.....	41
Упоредивање добијених резултата .....	43
Резултати симулације у програму Infoworks CS.....	43
Резултати симулације у програму 3DNet .....	45

Модел са једним типом терена .....	45
Модел са различитим типовима терена.....	49
Коментар резултата .....	52
Закључак .....	53
Опште .....	53
Предлог даљих радова.....	53
Литература .....	54

## Увод

У Београду, на делу општине Нови Београд, издвојен је део слива са делом кишног канализационог система. Дефинисани су сви делови издвојеног система и представљени су одговарајућим елементима у математичком моделу, као и везе између њих. Математички модел је направљен коришћењем два различита програмска пакета, упоређени су добијени резултати и објашњени су разлози разлика у резултатима прорачуна.

Циљ овог рада је упоређивање две постојеће програмске платформе за прављење математичког модела кишне канализације, које користе различите приступе у рачунању отицаја са слива, и приказ методологије за израду и калибрацију модела кишне канализације.

У изради овог рада направљен је математички модел канализације и извршена су мерења на терену, чији су резултати коришћени у калибрацији модела. Прикупљени су подаци од ЈКП БВК-а о временима рада пумпи, канализационој мрежи и терену, и од РХМЗ-а о кишним епизодама. Објашњене су основе прорачуна у математичким моделима и методологија обраде прикупљених података. На крају су упоређени резултати добијени на основу симулација различитих модела.

# Методологија

## Увод

Градска канализациона мрежа представља сложен систем који се састоји од великог броја цеви, шахтова, прелива, црпних станица, испуста и ретензионих базена. Цеви су различитих пречника, дужина, старости, направљене од различитих материјала, неуједначених рапавости унутрашњих зидова и предвиђене за различите услове експлоатације. Сви остали елементи такође имају одређен број битних карактеристика по којима се разликују једни од других (нпр. висине дизања пумпи, дубине шахтова, висинске коте на којима се налазе испусти...). Поједине карактеристике се мењају у зависности од брзине воде (или неког другог параметра), а неке са временом експлоатације. Неке од њих је могуће измерити, док се друге претпостављају, што уноси одређене несигурности у анализу система. Као резултат наведених разноврсности и великог броја елемената у мрежи, анализа понашања система је веома сложена. Није лако предвидети како ће неке измене утицати на остатак система, или одредити узрок неког догађаја.

Поврх свега, канализационе цеви се налазе закопане испод тротоара и улица и углавном није могуће извршити визуелни преглед којим би се извршио увид у њихово стање или лако обавити одређене тестове са циљем детектовања карактеристика мреже.

Такође, на канализациони систем су повезани корисници са различитим навикама, који уносе додатне неодређености јер је тешко одредити њихов тачан број и њихово понашање у току дана. Како корисници константно испуштају одређене количине вода, а такође се у систему јављају и воде које су последица дренарања подземних вода или услед прилива атмосферских вода, није пожељно вршити пробе и испитивања на канализационој мрежи, јер није могуће спречити доток воде у систем.

Један од неопходних корака у процесу анализе и тестирања система је прављење математичког модела канализационе мреже, али не треба заборавити да је математички модел само реплика стварног система која са собом носи одређене неизвесности и ограничења.

Коришћењем математичког модела, могуће је изложити систем екстремним условима и открити места која представљају уска грла, на којима се могу јавити загушења, или где се очекују изливања канализације при јачим пљусковима. Такође, оптимизацијом рада црпних станица, може се смањити потрошња електричне енергије међусобним усклађивањем времена рада пумпи, или бољим коришћењем постојећих ретензија.

У математичком моделу могуће је направити реплику општег (или комбинованог) канализационог система, система за отпадне или атмосферске воде. У овом раду је представљен процес израде модела канализационог система за одвођење атмосферских вода, али се наведена методологија може искористити и за прављење осталих типова, уз мале измене.

## Опис слива

Територија општине Нови Београд се одликује равничарским типом терена, са малим нагибима терена, великим растојањима између објеката, углавном јасно дефинисаном сепарационом канализационом мрежом и мањим бројем нелегалних прикључака, што знатно олакшава израду математичког модела.

Издвојен је део територије између улица Шпанских бораца, Булеvara уметности, Булеvara Арсенија Чарнојевића и Булеvara Михајла Пупина, који припада једном истом сливу, а може се видети на слици 1. Канализациона мрежа је направљена тако да се вода у њој гравитационо слива ка северу, ка Дунаву, до црпне станице ЦС Нова 1, која се налази у близини Ју бизнис центра, у Булевару Николе Тесле. Од црпне станице, цевовод одлази ка Дунаву, где се непречишћена канализација излива у реку. Вода са дела ауто-пута који се налази унутар споменутог подручја, и нешто шире, се слива у црпну станицу Ауто-пут, одакле се препумпава у цев која је повезана са остатком мреже и даље се слива гравитационо.



Слика 1: Локација издвојеног сливног подручја

Канализациона мрежа за кишну и употребљену воду је на том делу јасно раздвојена, без мешања на целој дужини цевовода. У разматраној области су објекти подизани плански и са одговарајућим пројектима и дозволама, па је било очекивано да нема нелегалних прикључака (или да их има мало) и да вода која се јавља у мрежи потиче од продирања подземних вода у канализациону мрежу, прања улица и као последица атмосферских падавина.

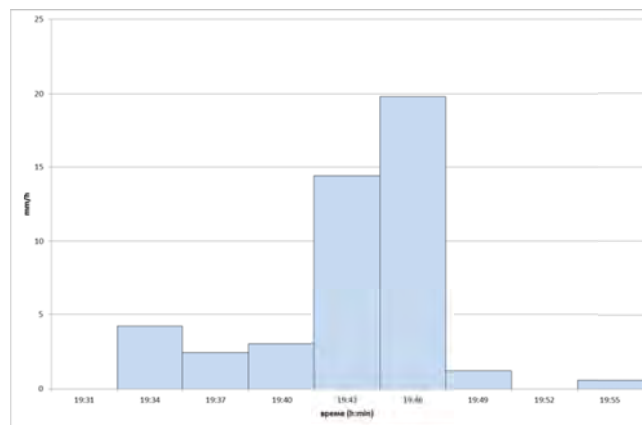


У зони се налазе стамбене и пословне зграде, са веома малим бројем кућа. Улице су широке, са урађеном мрежом за одвођење вода. Између и око зграда се налазе паркови, зелене површине и паркинзи, а постоје и неизграђене парцеле. Укупно гледано, целокупно подручје слива је уређено и постоје велике зелене површине које знатно смањују отицај са слива.

## Улазни подаци и подаци коришћени у калибрацији модела

Постојале су три врсте података: о падавинама, отицају (у виду количине препумпаних вода са слива) и нивоу воде у базену црпилишта.

РХМЗ је уступио податке са својих кишомера, за 3 различите кишне епизоде. Добијене су вредности са мреже аутоматских импулсних и интервалних кишомера на територији Београда, на основу којих су одређени хидрограми кишних епизода, тј. трајање и интензитет киша. Импулсни кишомери бележе време када се у њиховим посудама прикупи одређена, фиксна, количина воде, док интервални кишомери бележе колико су воде прикупили у одређеном, фиксном, временском интервалу. Са интернет презентације РХМЗ-а су скинути снимци са LAWR радара, на коме се може видети кретање и трансформација кишноносних облака, као што се види на слици 2.



Слика 2: Подаци о кишама

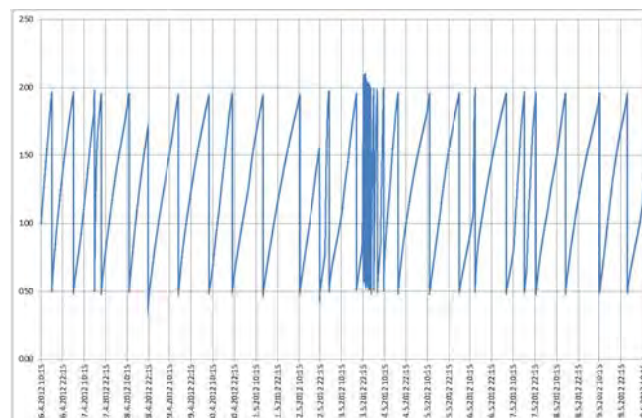
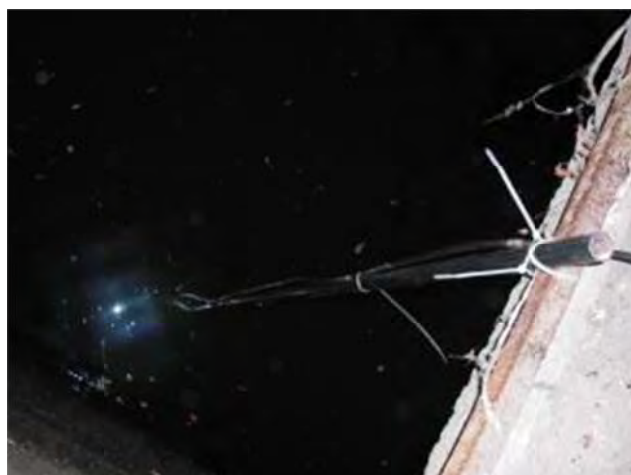
Подаци о кишама су представљали улазне податке симулације. Калибрација је рађена на основу посматрања излазних резултата модела, као реакције на задате падавине.

Од ЈКП БВК су добијени подаци о временима рада црпних станица на посматраном сливу, приказани на слици 3. Подаци садрже време читавања стања мерача на пумпама, прочитано време рада и процењене количине препумпане воде, појединачно за сваку пумпу. Преко ових података су контролисане количине воде које су стизале до црпне станице и, после њихове обраде, су коришћени у калибрацији система.

KCS	Vrsta	Naziv_agregata	Tip_agregata	Datum	Brojac	Pravak
KCS 1-Nova	Kišne	1 grupa	Lk: Lk 4/70:11000			
				01-jan-12	0.05	130
				02-jan-12	0.06	130
				03-jan-12	0.03	130
				04-jan-12	0.03	130
				05-jan-12	0.06	130
				06-jan-12	0.06	130
				07-jan-12	0.03	130
				08-jan-12	0.03	130
				09-jan-12	0.03	130
				10-jan-12	0.05	130
				11-jan-12	0.03	130
				12-jan-12	0.03	130
				13-jan-12	0.02	12
				14-jan-12	0.06	130
				15-jan-12	0.03	130
				16-jan-12	0.03	130
				17-jan-12	0.02	12
				18-jan-12	0.06	130
				19-jan-12	0.03	130
				20-jan-12	0.02	12
				21-jan-12	0.06	130
				22-jan-12	0.11	400
				23-jan-12	0.43	1476
				24-jan-12	0.06	130
				25-jan-12	0.02	12
				26-jan-12	0.06	130
				27-jan-12	0.11	412
				28-jan-12	0.05	130
				29-jan-12	0.06	130
				30-jan-12	0.03	130
				31-jan-12	0.03	130
				01-feb-12	0.03	130
				02-feb-12	0.03	130
				03-feb-12	0.03	130

Слика 3: Подаци о временима рада пумпи

У базену црпилишта црпне станице Нова 1 је постављена мерна опрема за мерење нивоа воде. Мерна опрема и резултати мерења се могу видети на слици 4. Измерене вредности су коришћене за одређивање протока пумпи и величине базног отицаја, израчунавање излазног хидрограма слива и количина воде коју производе нелегално прикључени корисници.



Слика 4: Постављена мерна опрема и резултати мерења

## Одабрани програмски пакети и основе математичког модела

Коришћена су два различита комерцијална програмска пакета: InfoWorks CS и 3DNet. Ови програми су намењени моделирању канализационих система и имају сличне основне могућности, као што су: рад са GIS организованим подацима, увоз података из других програма, рачунање отицаја коришћењем различитих математичких модела, аутоматско цртање подужних пресека, приказ резултата прорачуна у лако схватљивом, графичком, облику... Оба програма могу у прорачунима да користе различите математичке моделе, али су у њима покретани само унапред одрабрани модели, у сваком програму по један.



## Елементи мреже

Елементи који су коришћени при изради модела су цеви, шахтови, пумпе, изливи и сливне површине.

Шахтови се постављају на почетку и крају цеви, на местима где долази до промене пречника или нагиба, на местима спајања или раздвајања цеви и на одређеном размаку. Шахтови могу бити направљени да примају одређену количину воде и ублажавају улазни талас. Они омогућавају спајање смакнутих цеви, код којих се крај једне цеви не поклапа са улазом следеће цеви. Дефинисани су са координатама у простору, висином дна и врха шахта и запремином воде коју могу да приме.

Цеви се налазе испод терена, између два шахта, или између шахта и излива. Цеви су описане својим пречником, дужином, узводним и низводним шахтовима са којима су повезане, нагибом и коефицијентом трења.

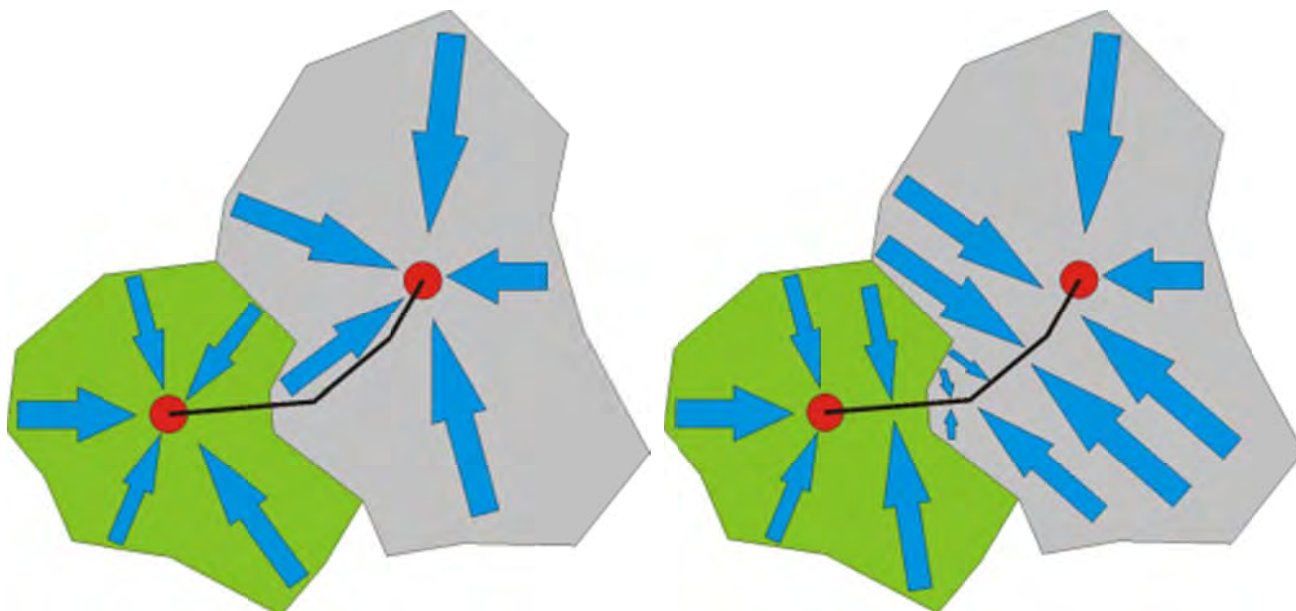
Пумпе додају механичку енергију воденом току и коришћене су за подизање воденог тока са нижег нивоа на вишљи. Пумпе карактерише јачина пумпе, коте укључења и искључења, висина дизања воде и чворови између којих се налазе.

Изливи се налазе на крају цеви, на крају мреже и кроз њих вода излази из канализационе мреже и модела. Дефинисани су координатама, котом на којој се налази излив и врстом излива (слободно или потопљено истицање).

Сливне површине ограничавају део слива са кога се сва вода слива ка истом колектору. Сливне површине, тј. границе подсливова, су описане колектором коме припадају, површином коју обухватају, обликом површине и врстом земљишта на којој се налазе. Програми одређују границе сливних површина, на основу нагиба земљишта, типа и удаљености колектора, а могуће су касније измене и мануелно одређивање њихових граница. У моделу, у програму InfoWorks CS, је на појединим местима искоришћена та опција и ручно је одређено неколико подсливова, док су у моделу, у програму 3DNet, границе одређене аутоматски, израчунавањем преко убачених образаца.

## Моделирање отицаја

Приликом симулације канализације, одвијају се две различите фазе у прорачунима. Прво се узимају у обзир подаци о земљишту (тип земљишта, инфилтрација, коефицијент отицаја, нагиб...) и о кишама (јачина и време трајања кише), како би се израчунале количине воде које ће се појавити у моделу и које је потребно одвести са земљишта. У зависности од типа модела, вода може са терена прећи у канализациони систем на местима шахтова, или целом дужином цеви, као што је приказано на слици 5. У овој анализи је први случај коришћен у програму InfoWorks CS, а други у програму 3DNet.



Слика 5: Случај одвођења воде преко шахтова и преко цеви

InfoWorks CS подржава већи број математичких модела за рачунање отицаја и инфилтрације, а за овај рад је одабран Wallingford Procedure модел отицаја.

Wallingford Procedure модел је погодан за коришћење у урбаним сливовима и приликом израчунавања отицаја узима у обзир изграђеност, врсту земљишта и почетну влажност земљишта. Модел предвиђа отицај са целокупног слива, тако да се не може комбиновати са другим методама, унутар једног слива.

Претпоставља се да је коефицијент отицаја константан за целу кишну епизоду и рачуна се преко формуле:

$$PR = 0.829 * PIMP + 25 * SOIL + 0.078 * UCWI - 20.7, \text{ где су:}$$

PR – проценат падавина који одлази на отицај, а не на инфилтрацију;

PIMP – проценат непропусности, који представља количник непропусних површина директно повезаних са канализацијом (то могу бити кровова кућа, путеви, паркинзи...) и укупне површине која доприноси отицају;

UCWI – индекс влажности градског земљишта;

SOIL – коефицијент који описује количину воде коју земљиште може да упије, а одређује се на основу типа земљишта, преко табеле 1.

Тип земљишта	Отицај	SOIL
1	Веома мали	0.15
2	Мали	0.30
3	Средњи	0.40
4	Велики	0.45
5	Веома велики	0.50

Табела 1: Вредности SOIL коефицијента

Овако израчунат отицај се расподељује између површина са различитим врстама тла, преко тежинских коефицијената. Уколико се на свим површинама јаве падавине чији интензитет премашује задате почетне губитке, онда ће се на свим површинама јавити отицај, а споменути тежински коефицијенти се рачунају на следећи начин:

$$PR_i = \frac{f_i A_i}{\sum_{n=1,3} f_n A_n} PR, \text{ где су:}$$

$f_i$  – тежински коефицијент за површину  $i$ ;

$PR_i$  – проценат отицаја са површине  $i$ ;

$A_i$  – је квадратура површине  $i$ .

Вредност тежинских коефицијената  $f_i$  износе:

Тежински коефицијент	Површина	Вредност
$f_1$	Непропусна	1.0
$f_2$	Кровови	1.0
$f_3$	Пропусна	0.1

Табела 2: Вредности тежинских коефицијената

Са друге стране, у 3DNet-у је отицај рачунат на другачији начин. На терену постоје неравнине и удубљења у којима се вода задржава (мини ретензије) и на тај начин се смањује запремина воде која одлази у канализацију. Од укупног слоја воде који је настао услед падавина, одузима се одређени део и добија се дебљина слоја воде који ефективно учествује у отицају, преко следеће формуле:

$$h_e(t) = h_i(t) - h_d[1 - \exp(-h_t/h_d)], \text{ где су:}$$

$h_e$  – висина ефективне кише у тренутку  $t$ , ефективна дебљина слоја воде услед падавина;

$h_i$  – укупна дебљина слоја воде услед падавина, у тренутку  $t$ ;

$h_d$  – коригована површинска депресија, емпиријска константа која зависи од врсте површине и представља дебљину слоја воде која остаје на терену .

Ефективна дебљина слоја воде се рачуна одвојено за пропусне и непропусне површине.

Један део воде отпада на инфилтрацију, која се рачуна преко Green-Ampt-ове једначине:

$$H = H_s + h_c \ln \left( \frac{h_{cr} + H}{h_{cr} + H_s} \right) + \frac{k_s}{\varepsilon_0} (t - t_s), \text{ где су:}$$

$H$  – дубина до које је стигао влажни фронт у тренутку  $t$ ;

$t_s$  – време од почетка падавина до потпуног засићења земљишта на површини;

$t$  – временски тренутак за који се обавља прорачун;

$H_s$  – дубина до које је стигао влажни фронт у тренутку  $t_s$ ;

$h_c$  – висина капиларног дизања;

$h_{cr}$  – референтна капиларна висина;

$k_s$  – Дарсијев коефицијент филтрације за засићену средину;

$\varepsilon_o$  – ефективна порозност земљишта;

Када се од укупне количине падавина одузму количине које остају на површини терена и оне које одлазе на инфилтрацију, остају нето количине падавина које завршавају у канализационом систему.

Површинско течење воде се рачуна нумеричким решавањем кинематског таласа, које је објашњено у књигама Марка Иветића „Рачунска хидраулика – Отворени токови“ (Иветић, 2000) и Миодрага Радојковића „Рачунари у комуналној хидротехници“ (Радојковић et. al, 1989).

Уколико се ради модел опште, или сепарационе канализационе мреже за употребљене воде, онда је потребно одредити и број људи који су прикључени на канализациону мрежу и количине отпадне воде коју они производе. У овом случају је рађена сепарациона кишна канализациона мрежа, па ти подаци нису били потребни.

### Моделирање протицаја кроз канализациону мрежу

Друга фаза прорачуна се одвија „испод терена“, у канализационим цевима. У цевима се увек налази одређена количина воде, као последица инфилтрације подземних вода, прања улица, атмосферских падавина, услед воде која долази од корисника (легално или илегално прикључених), као заостале воде услед контра нагиба цеви или услед успора воде на неком месту. У математичком моделу се такође задаје нека количина воде која ће стално протицати кроз цеви (у овом раду названа „базни отицај“), а на њу се додају вредности израчунате у претходном кораку.

У канализационим цевима се прорачун протицаја може рачунати на различите начине, коришћењем модела за потпуно решавање St. Venant-ових једначина, или делимичним (увођењем одређених претпоставки, других једначина или њиховим упрошћавањем).

Лиценца за коришћење програма InfoWorks CS и коришћени модел су власништво ЈКП БВК, па су коришћена подешавања која они користе у симулацијама канализационих модела, а то је је модел са потпуним решавањем St. Venant-ових једначина. Он се може користити и у цевима у којима се јавља слободно течење, и на местима где се јавља течење под притиском, а такође води рачуна о низводним и узводним граничним условима.

У 3DNet-у је коришћен модел кинематског таласа, у коме се занемарују поједини чланови у динамичкој једначини. Као последица избацивања дела формуле, модел кинематског таласа не узима у обзир низводне услове, па се не може моделирати утицај низводних граничних услова на течење у мрежи, као што је успор воде у цевоводу.

# Формирање модела слива

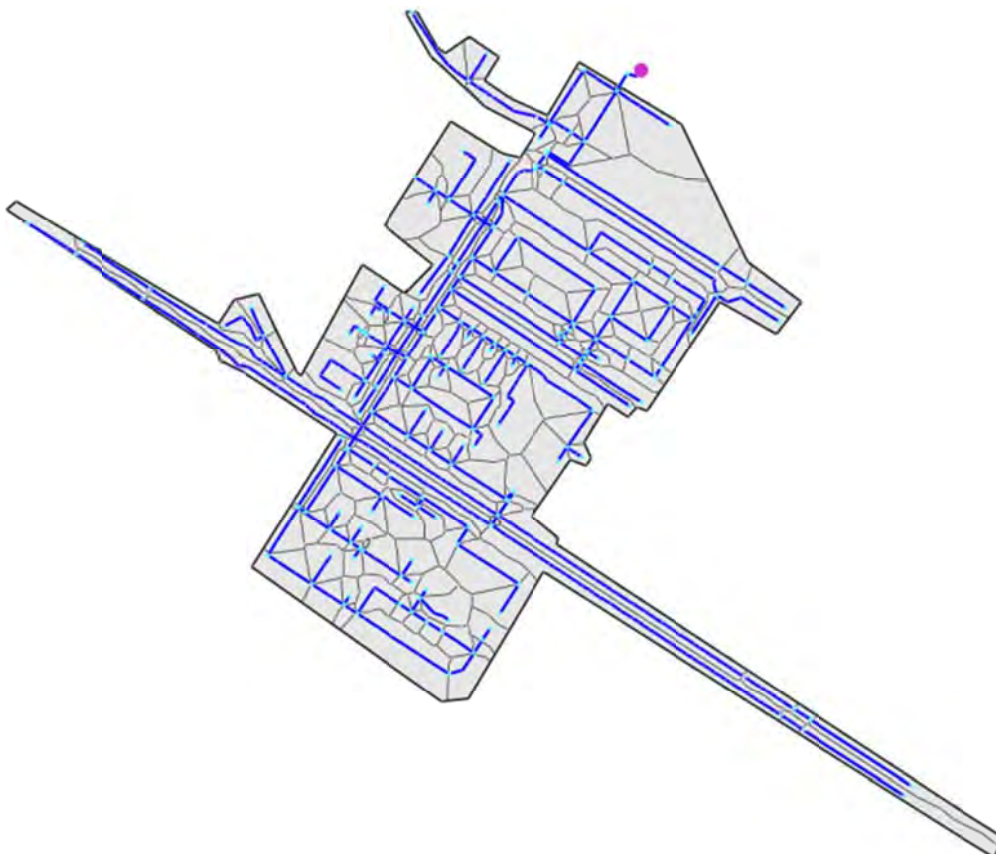
## Подаци о мрежи

ЈКП БВК је уступио податке о кишној канализационој мрежи на разматраној локацији и постојећи математички модел. Уз помоћ сектора за развој канализације, у Делиградској улици, подаци у моделу су проверени и кориговани, како би одговарали тренутном стању на терену.

Моделирање је урађено у програму Infoworks CS, јер београдски водовод користи споменути програм за моделирање комплетног београдског водовода, а и ради будуће употребне вредности модела неопходно је задржати компатибилност са остатком модела.

Из модела целине, модела комплетне београдске канализације, издвојена је разматрана област. У процесу провере података, уочене су бројне неправилности и грешке, које су откривене прегледом комплетне мреже и поређењем са постојећом документацијом о мрежи. Подаци о црпним станицама су, поред провере пројеката изведеног и тренутног стања, проверени одласком на терен и увидом у њихово стање.

Изглед канализационе мреже у моделу је приказан на слици 6. Плавим линијама су приказане канализационе цеви, светло плавим тачкама су обележени канализациони шахтови, а љубичастом тачком је обележен излив канализационе мреже. Дебелом црном линијом је приказана граница сливног подручја, а танким црним линијама су обележене ивице подсливова.



Слика 6: Приказ канализационе мреже



У оквиру издвојене канализационе мреже, налазе се две пумпне станице: Нова 1 и Ауто-пут. ЦС Нова 1 садржи три идентичне пумпе Litostroj Lvi 4/70, снаге 3 x 110 kW од којих се две користе, а једна служи као резерва. ЦС Ауто-пут поседује две пумпе типа CP 3201, снаге 2 x 30kW. Паљење и гашење пумпи се обавља аутоматски, преко сонди које се налазе у базенима црпилишта. Пумпе се пале и гасе независно једна од друге, а постоје и по три додатна сензора у базенима, којима се обезбеђује почетак или престанак рада пумпи у случају отказа неког од сензора, као и сигнализирање аларма у случају превеликог нивоа воде у базену. На слици 7 се могу видети пумпе и изглед командне собе у црпној станици Нова 1.



Слика 7: Пумпе и командна соба црпне станице Нова 1

Канализационе цеви су различитих пречника и обухваћене су цеви пречника од 150 mm, до 1500 mm. Већина цеви је кружног попречног пресека, сем неколико колектора који су правоугаоног попречног пресека. Подаци о материјалу од кога су направљене цеви нису били доступни, па је за све цеви усвојен исти Манингов коефицијент трења од  $0,015 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ , колико износе вредности трења у моделу ЈКП БВК-а. Укупна дужина канализационе мреже износи око 21,5 km, док се падови крећу од негативних на појединим деоницама, до максималних 7%.

У моделу се налази око 200 канализационих шахтова.

Није разматран утицај црпне станице Нова 1, тако да је, на месту где се она налази, постављен излив.

## Подаци о терену

Висинске коте терена се крећу од 73 mnm, до 79 mnm, са благим променама висине. У моделу направљеном у програму Infoworks CS је терен описан и коефицијентом отицаја, који представља количник воде која учествује у отицају и пале количине воде. Терен је подељен на пет различитих типова, са коефицијентима отицаја од 0,1; 0,4; 0,8; 0,85; 0,9. За сваку сливну површину је одређено процентуално учешће наведених пет типова земљишта, проценом извршеном на основу увида у ортофото снимке терена. Просечна вредност коефицијента отицаја са површина, за цео слив, износи 0,55.

У програму 3DNet се отицај рачуна на другачији начин, па није могуће одредити вредности које би могле да се упореде са споменутим коефицијентом отицаја. Намена површина у овом програму се своди на податке о процентуалном учешћу кровова, пропусних и непропусних површина у оквиру одређених граница. У почетном моделу је за целокупан слив постављена само једна намена површина, тако да су сви подсливови имали исте вредности у прорачуну отицаја, а у завршном моделу је убачена карта намене површина са различитим карактеристикама, која је приказана на слици 8.



Слика 8: Карта намене површина

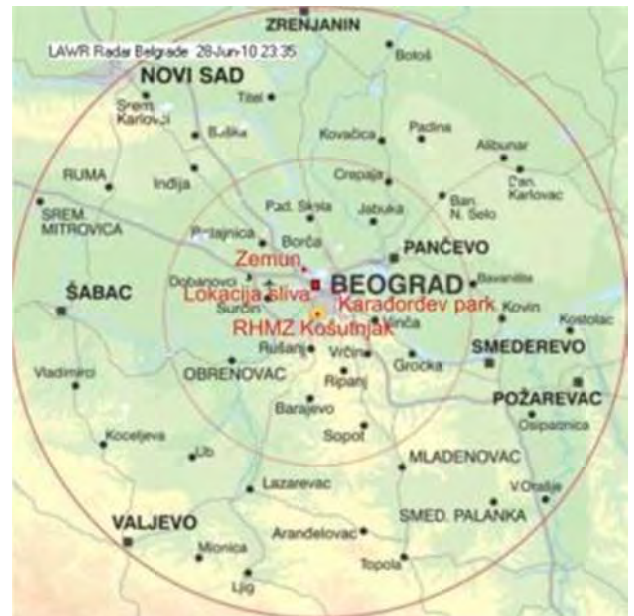
Зеленим линијама су обележене границе зелених површина, црвеним линијама ивице зграда и сличних објеката, тамно сивим линијама контуре непропусних површина, а светло сивим линијама подручја улица. Граница слива је обележена црном линијом.

## Обрада података о падавинама

Приликом посматрања података о падавинама, мора се обратити пажња на неколико фактора. Посматран је мали слив, који је доста удаљен од кишомера. Интензитет кише је просторно и временски неравномеран и може се десити да на раздаљини од једног километра интензитет падавина буде веома несразмеран, или да се чак на једном месту ни не забележе падавине, а на другом, блиском месту, измере екстремно велике вредности. Из наведених разлога се подаци о падавинама са даљих кишомера морају узети са резервом.

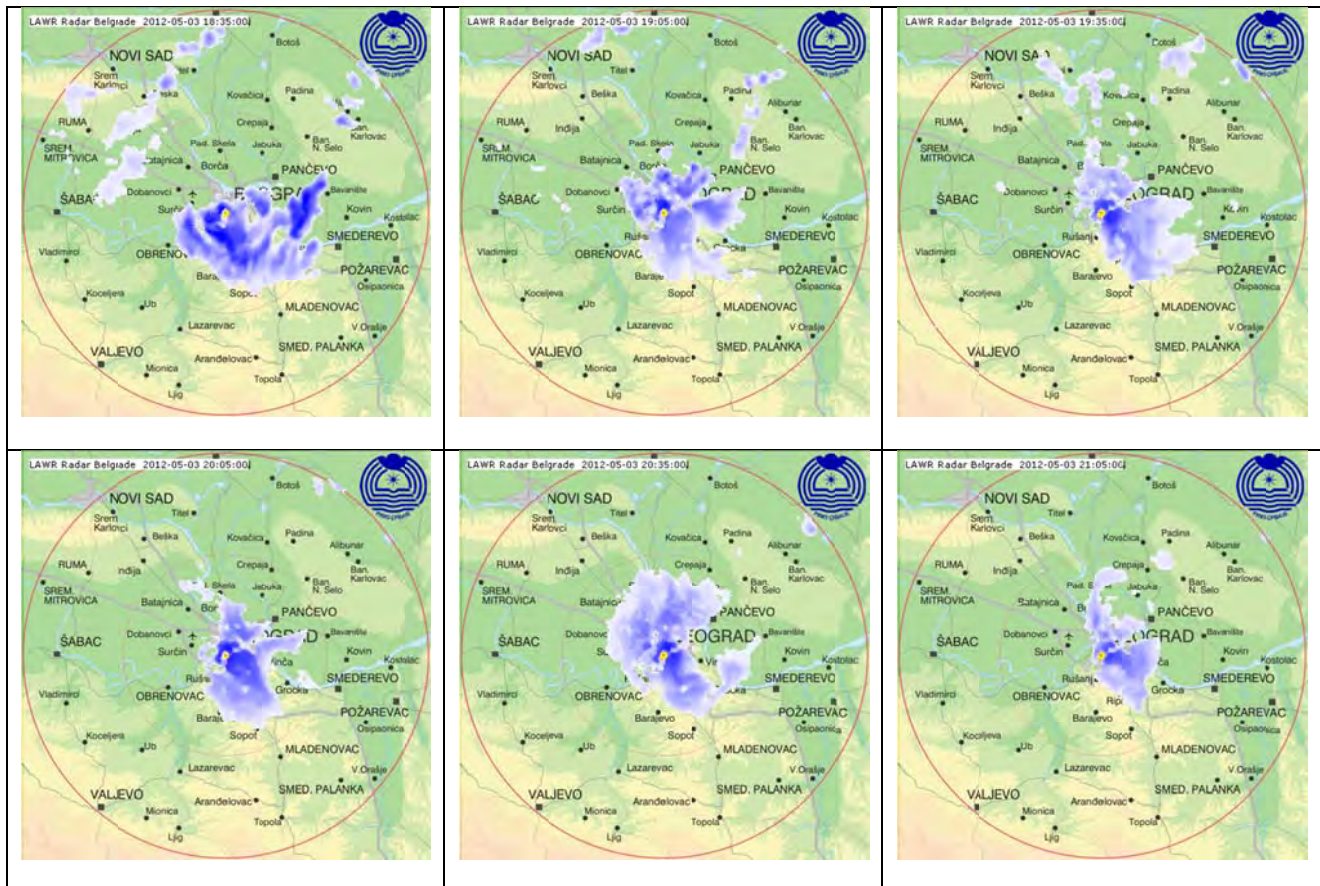
Као меродавни кишомери су одабрани кишомери у Земуну, на Кошутњаку и у Карађорђевом парку и посматране су три кишне епизоде. На слици 9 су приказане локације појединих кишомера и место на којој се у природи налази канализациона мрежа.

У процени веродостојности измерених вредности и могућности коришћења података са удаљених кишомера, могу се користити радарски снимци који приказују интензитет падавина и њихову трансформацију у току времена. На слици 10 је приказан део кишне епизоде од 03.05.2012, забележене радаром РХМЗ-а Србије.



НИХ

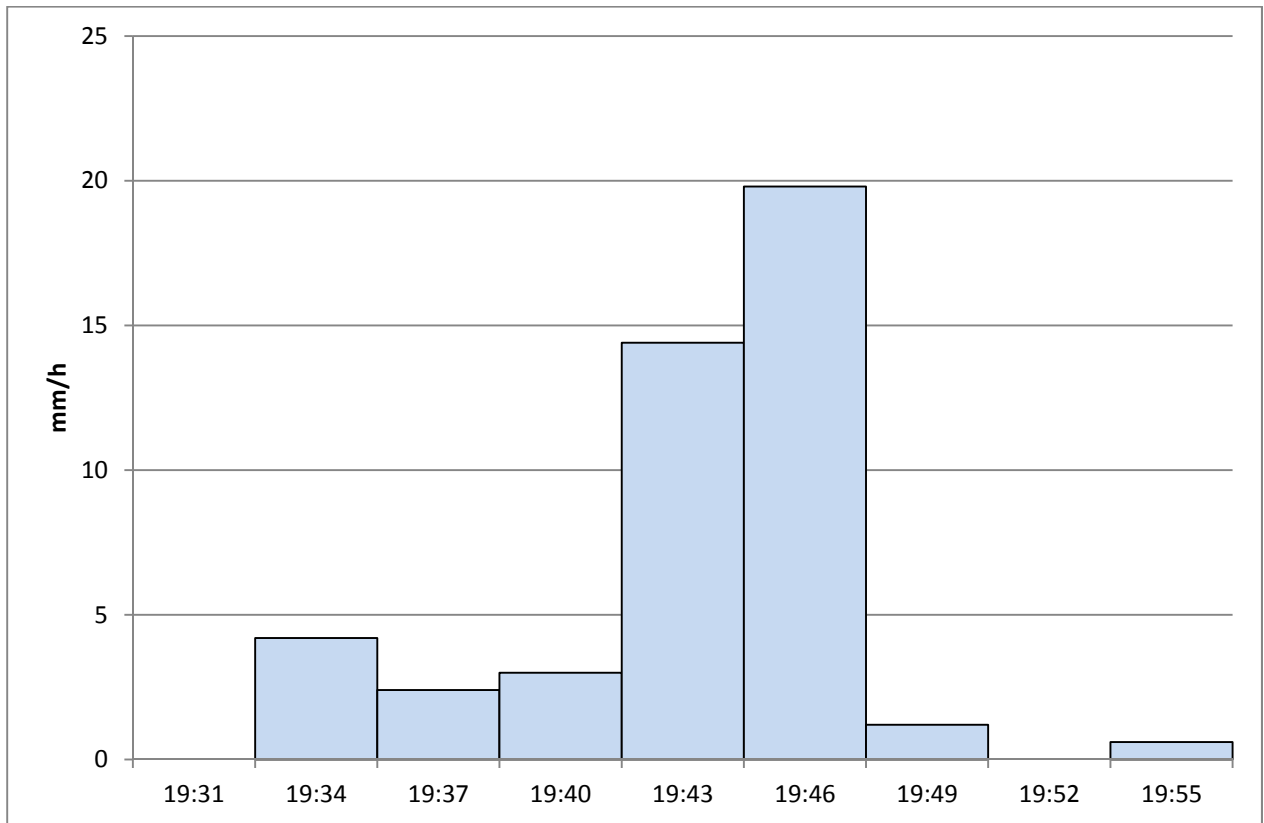




Слика 10: Приказ једне кишне епизоде преко радарских снимака

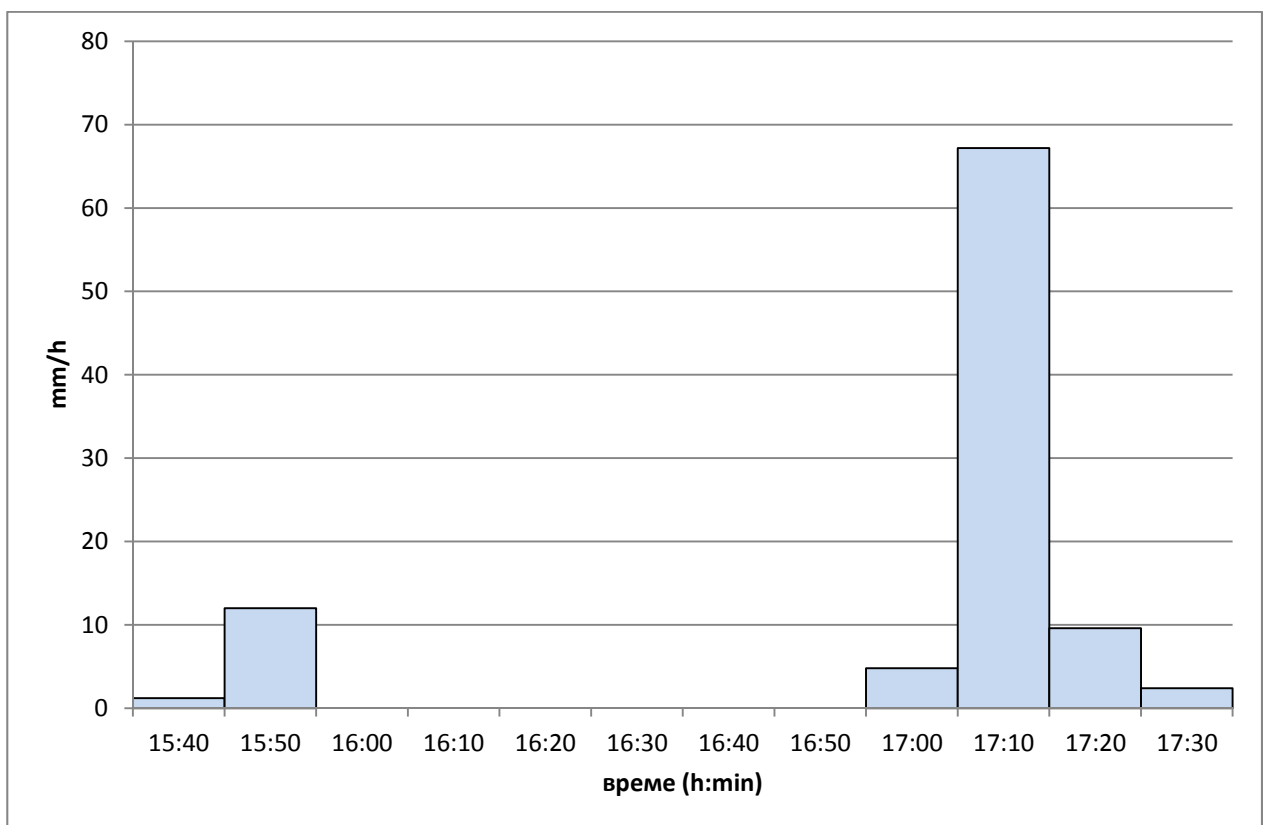
Посматрањем серије радарских фотографија, за разматрану кишну епизоду, закључено је да је интензитет падавина био сличан у Земуну и на Новом Београду, па се измерена киша са кишомерне станице у Земуну може користити приликом моделирања слива на Новом Београду, удаљеног неколико километара.

Киша која је забележена 28.06.2010. је трајала 24 минуте и укупно је пало 7,6 mm кише. Хидрограм, представљен на слици 11, је направљен на основу мерења која су забележена на кишомерној станици у Карађорђевог парку. Може се рећи да се радило о летњој киши кратког трајања.



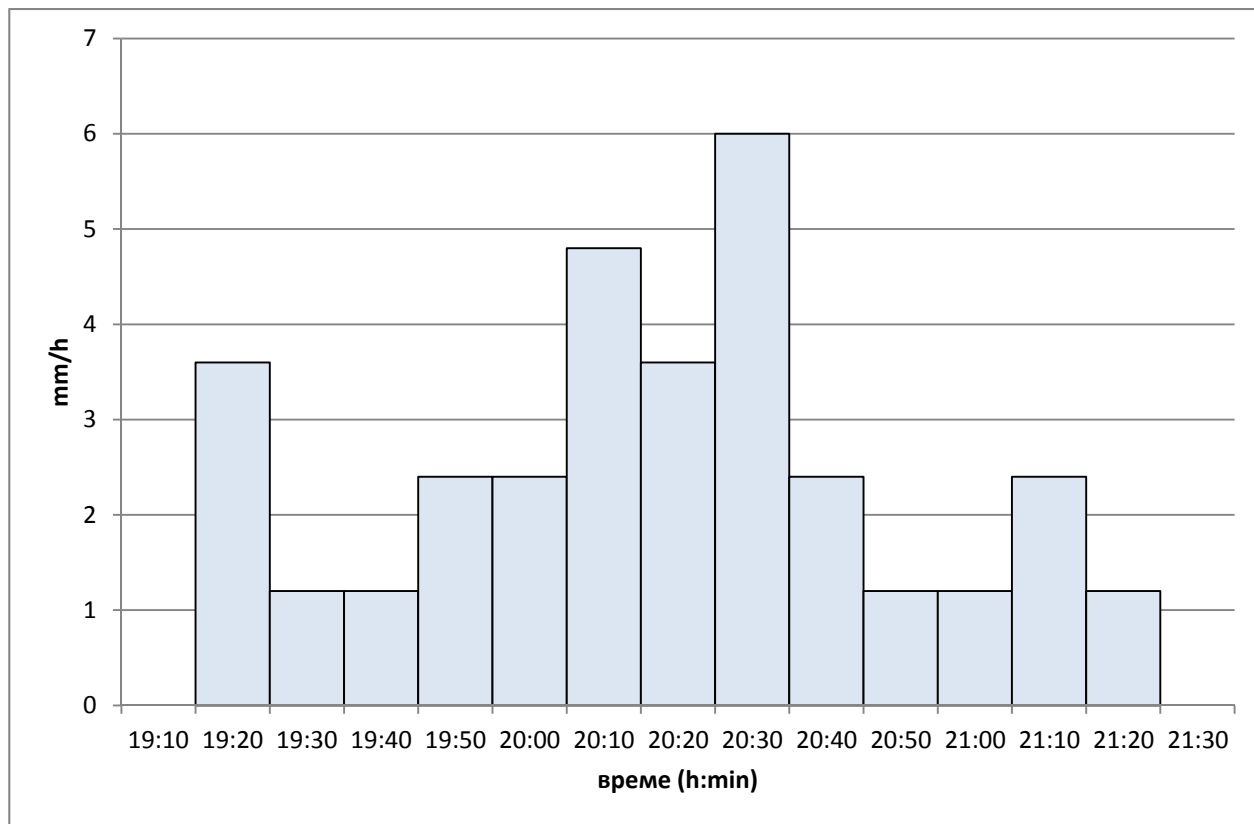
Слика 11: Хидрограм кишне епизоде од 28.06.2010.

Кишна епизода од 16.08.2010. је трајала укупно 110 минута и пало је 16,2 mm кише, а при изради хидрограма са слике 12 су коришћени подаци забележени на аутоматској станици у Кошутњаку. Радило се о изузетно јаком летњем пљуску.



Слика 12: Хидрограм кишне епизоде од 16.08.2010.

Киша које се догодила између 3. и 4. маја 2012. године је трајала 140 минута и укупна забележена киша је 5,6 mm. За ову кишну епизоду је меродавна била кишомерна станица у Земуну, која је забележила облик кише приказан на слици 13, а који описује дужу кишу поприлично уједначеног интензитета.

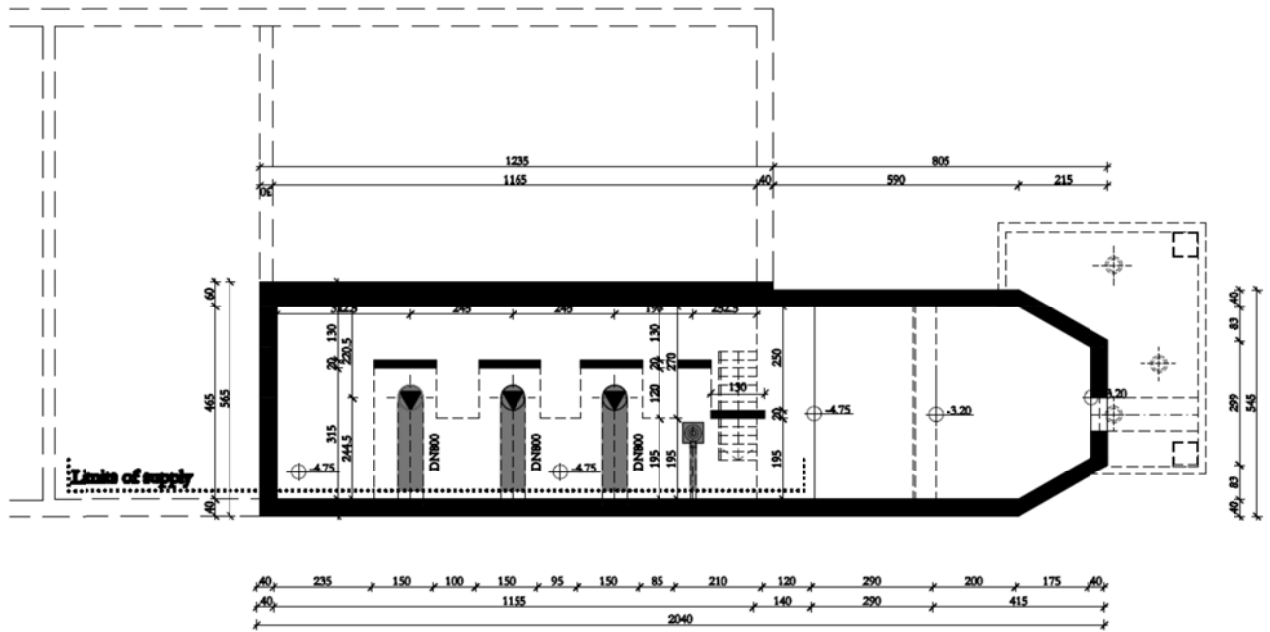


Слика 13: Хидрограм кишне епизоде од 03.05.2012.

Све споменуте вредности о кишама су убачене у математичке моделе, укључујући и хидрограме.







Слика 15: Основа црпне станице Нова 1, на нивоу црпилишта

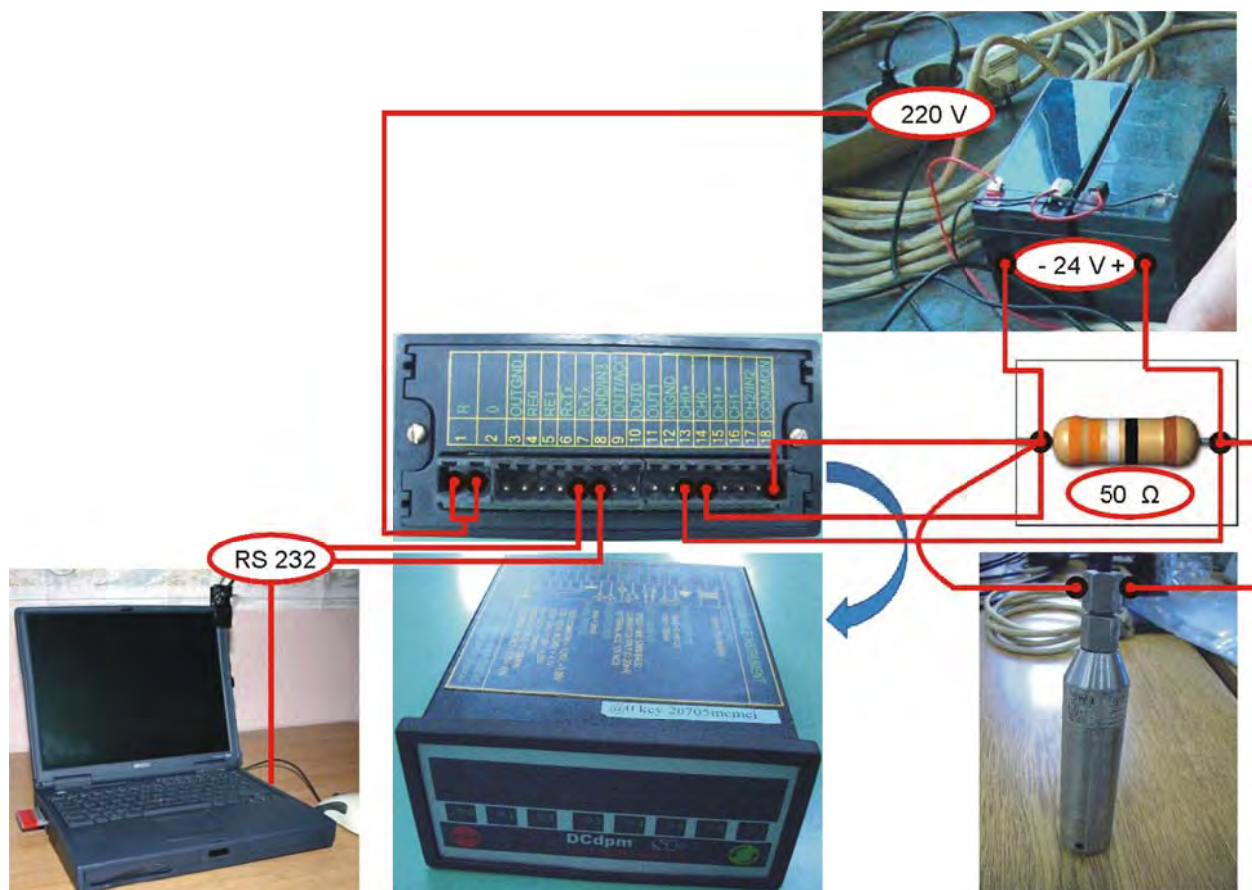
## Мерна опрема

Коришћена је сонда „МЕРА“ за мерење притиска воде, логер „ДЦдпм“ произвођача „Свет инструмената“, две батерије за помоћно напајање и преносни рачунар. На слици 16 је приказано повезивање и подешавање опреме.



Слика 16: Повезивање и подешавање опреме

Слика 17 приказује шему према којој је извршено повезивање уређаја.



Слика 17: Шема повезивања коришћене опреме

Улога батерија је да обезбеди константан напон од 24 V, како би могла да се прати промена јачине струје на сонди. Сонду треба поставити тако да стално буде потопљена и она пружа податке о притиску воде на месту сензора. У зависности од притиска, сонда пропушта различиту јачину струје. При атмосферском притиску пропушта 4 mA, а на дубини од 5 m (која је и максимална предвиђена дубина за овај модел сонде) пропушта 20 mA. Логер прикупља податке које добија са сонде и бележи их у својој меморији, како би касније могли бити пренети на рачунар. У зависности од притиска воде, мења се јачина струје која долази до логера. Логер мери напон, али како су јачина струје и напон повезани преко формуле  $U = I * R$ , и уз помоћ отпорника отпорности 50 ома, обезбеђена је разлика потенцијала која је мерена поменутом електроником. Преносни рачунар је коришћен за повезивање са логером, како би се подесили потребни параметри и касније преузели подаци са логера.

## Калибрација сонде

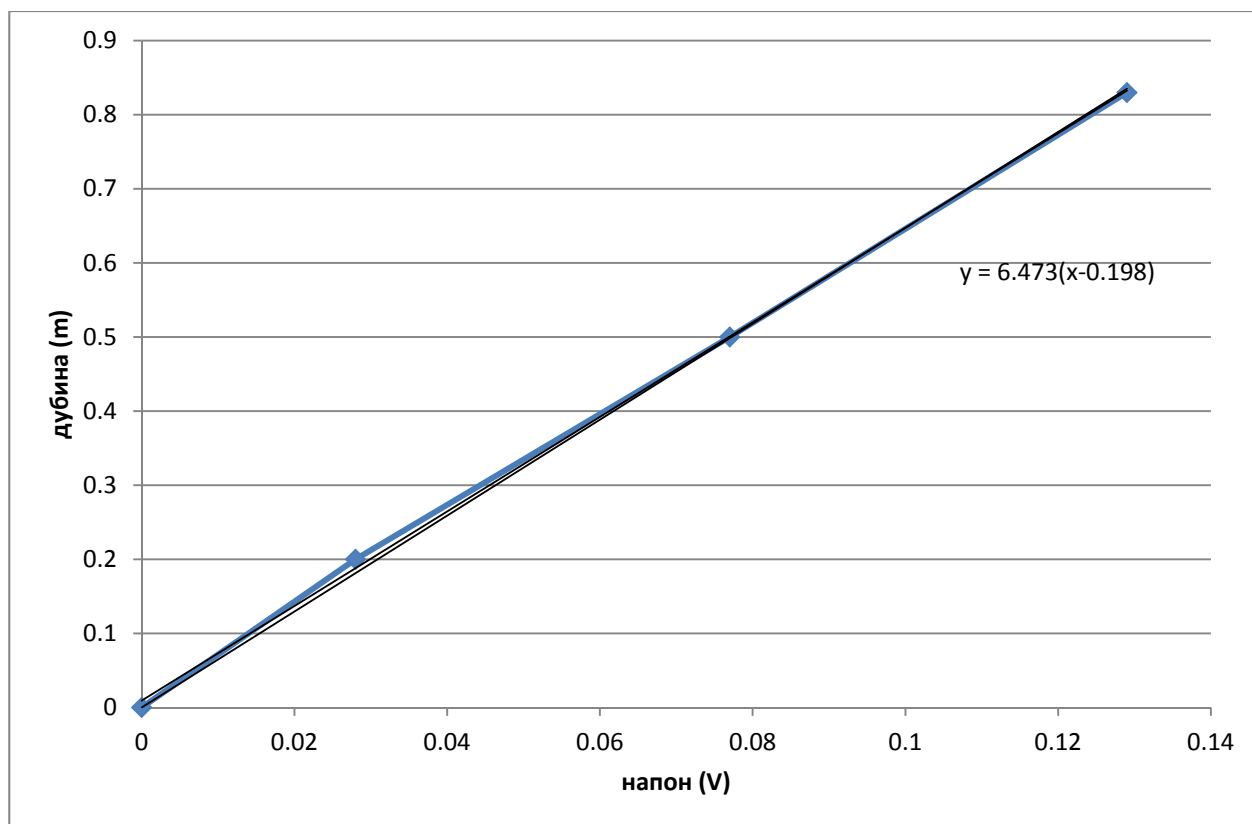
Сонда реагује на притисак воде, који зависи од висине воденог стуба изнад сензора. Притисак линеарно расте са повећањем дубине, па је могуће на основу притиска израчунати дубину воде на којој се налази сензор сонде.

Калибрација сонде је извршена потапањем сонде у резервоар и бележењем вредности измерених напона. Сонда је потапана до дубине од 83 cm. Измерене вредности су приказане у табели 3.

Дубина потапања сензора (m)	Измерени напон (V)
0	0,198
0,2	0,226
0,5	0,275
0,83	0,327

Табела 3: Измерени напони и дубине

На основу тих мерења је одређена зависност између притиска (тј. дубине) и напона. На слици 18 се може видети да је та зависност заиста линеарна, као и једначина преко које је логер израчунавао дубину и уписивао је у своју меморију.



Слика 18: Измерене вредности и једначина која описује зависност променљивих

## Подешавање логера

Написана је скрипта којом је аутоматизовано снимање информације о дубини воде на сваких 30 секунди, у меморију уређаја. Интервал од 30 секунди је одабран да би се регистровао рад пумпи које најчешће заврше читав циклус испумпавања воде за мање од две минуте. Скрипта је приказана на слици 19.

```

key 20205mcmcj
{
ADC = 0
CYCLE0 = %00000000
gain0 = 7
dc = 0
p0 = 6.473
p1 = 0.198
I0 = 30
x0 = TIME
BAUD = 19200
TBASE = 1000
TCPU = +9.042245E-08
RIO = +2.515000E+03
UREF = +2.491500E+00

100 DRDY = 1
200 X3 = U0 - P1
201 X4 = X3 * P0
205 DISP 0 3 X4
220 STOP I0
}

```

Слика 19: Скрипта којом је програмиран логер

## Проблеми

У току упознавања са уређајем се појавио проблем приступа уређају. Уређај је слао податке, али није било могуће приступити му и програмирати га. Проблем је решен када је упутство мало боље прочитано и пин са бројем 18 (на полеђини уређаја) повезан са минус полом батерије.

Приликом одређивања места на коме ће се поставити сонда, било је потребно испунити више услова и поставити сонду тако да је:

- што ниже (како би стално била потопљена);
- довољно високо (да не дође у контакт са талогом непознате дебљине, како се не би запушили сензори);
- довољно далеко од пумпе (да је пумпа не би повукла са водом);
- на месту које није директно изложено протоку воду (како би осцилације воде биле мање и да растворене честице у току не би запушиле сензоре).

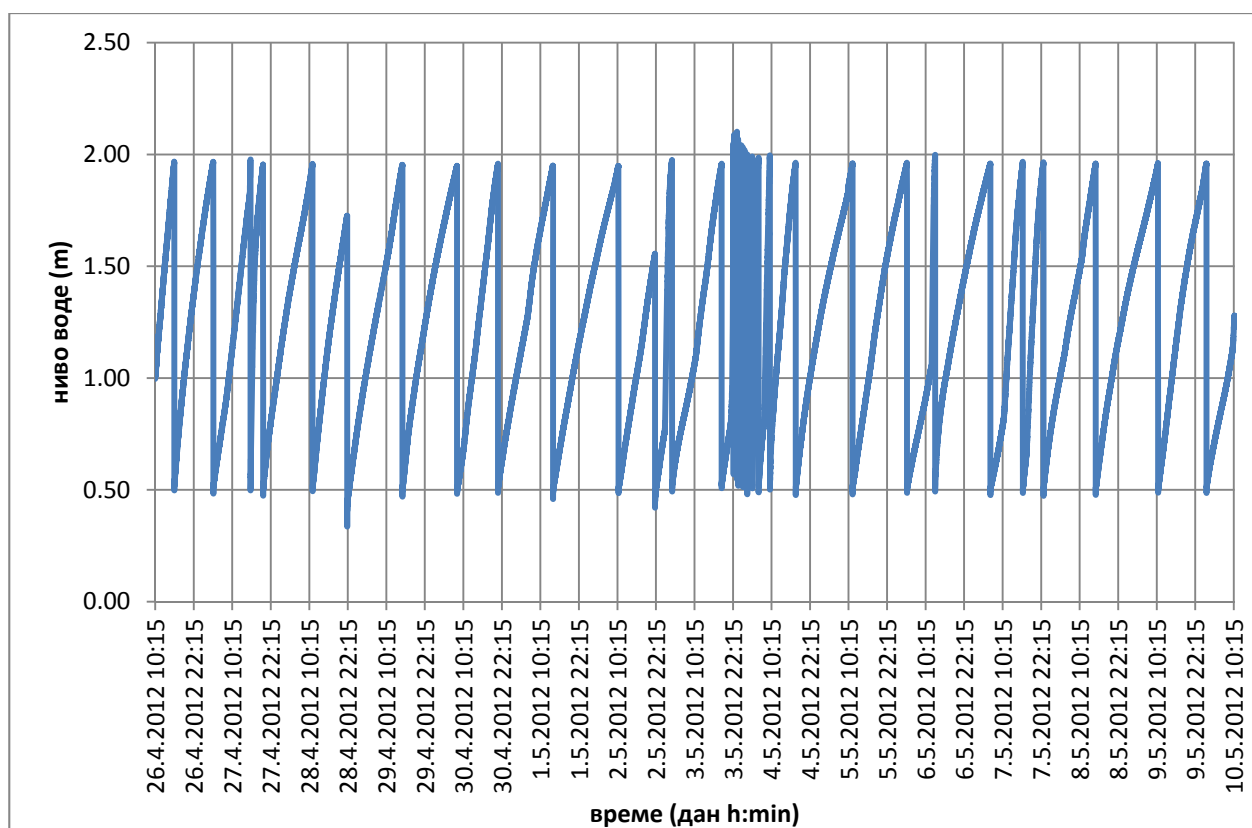
Одлучено је да се сонда постављи тако да се сензор налази на 20 центиметара од дна базена, на месту које је обележено црвеним кругом на слици 20.





## Резултати

Као резултат мерења, добијени су подаци који су графички приказани на слици 21.



Слика 21: Измерени нивои воде у црпилишту

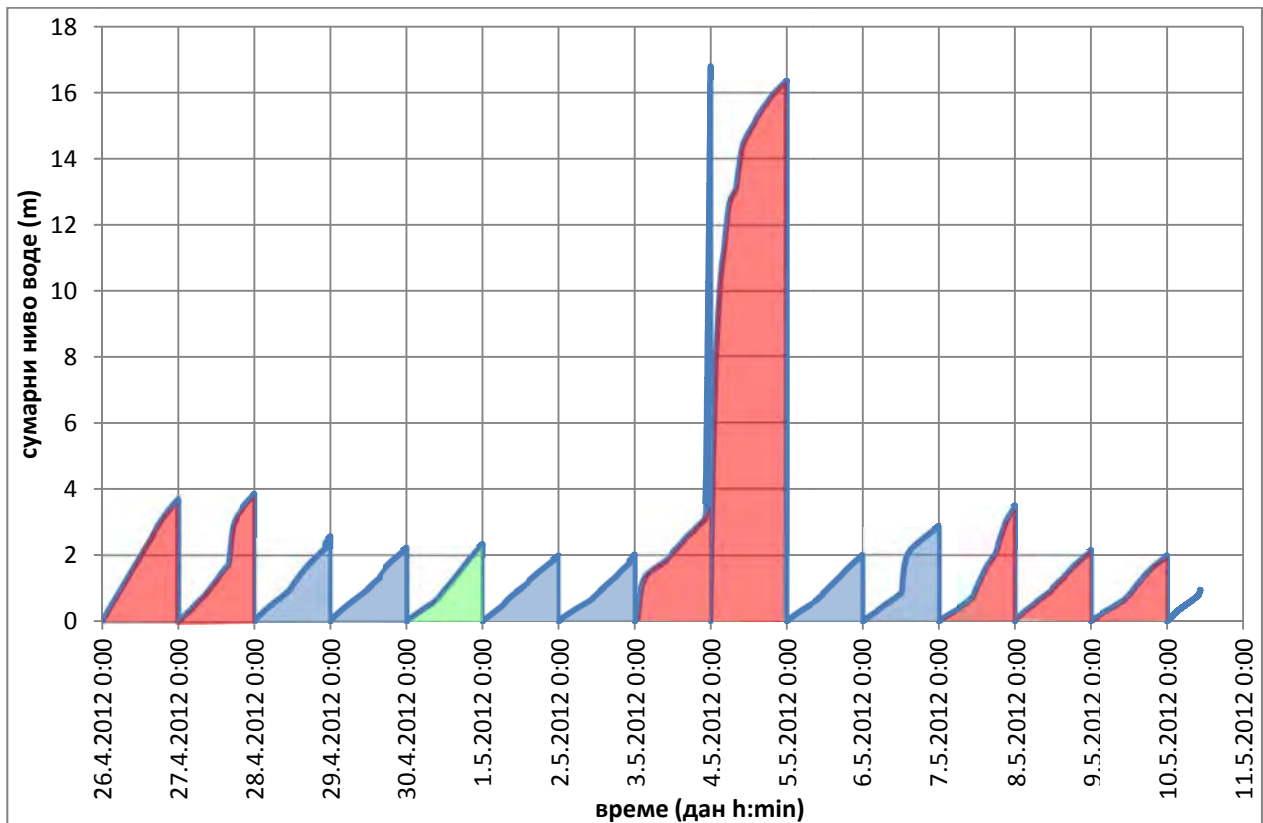
На дијаграму се јасно види да вода у базен дотиче мање-више константном брзином, да се пражњење базена дешава веома брзо, да су нагиби промене нивоа слични, али да ипак постоје разлике у посматраним данима, као и да је у ноћи између 3. и 4.5. падала киша. Сем тога, из необрађених података није могуће извести друге закључке, па је приступљено обради података.

## Обрада података о отицају

У прорачуну отицаја су коришћени подаци добијени од ЈКП БВК-а и измерени подаци на црпној станици.

### Тумачење измерених нивоа

Први корак у обради измерених података је био израда сумарних дневних линија нивоа. Израчунавањем разлика између два узастопна мерења и њиховим сабирањем на дневном нивоу (без додавања негативних величина које се јављају у периоду рада пумпи), добијен је дијаграм приказан на слици 22, на основу кога је могуће упоредити количине воде које су долазиле до црпне станице у току сваког дана.

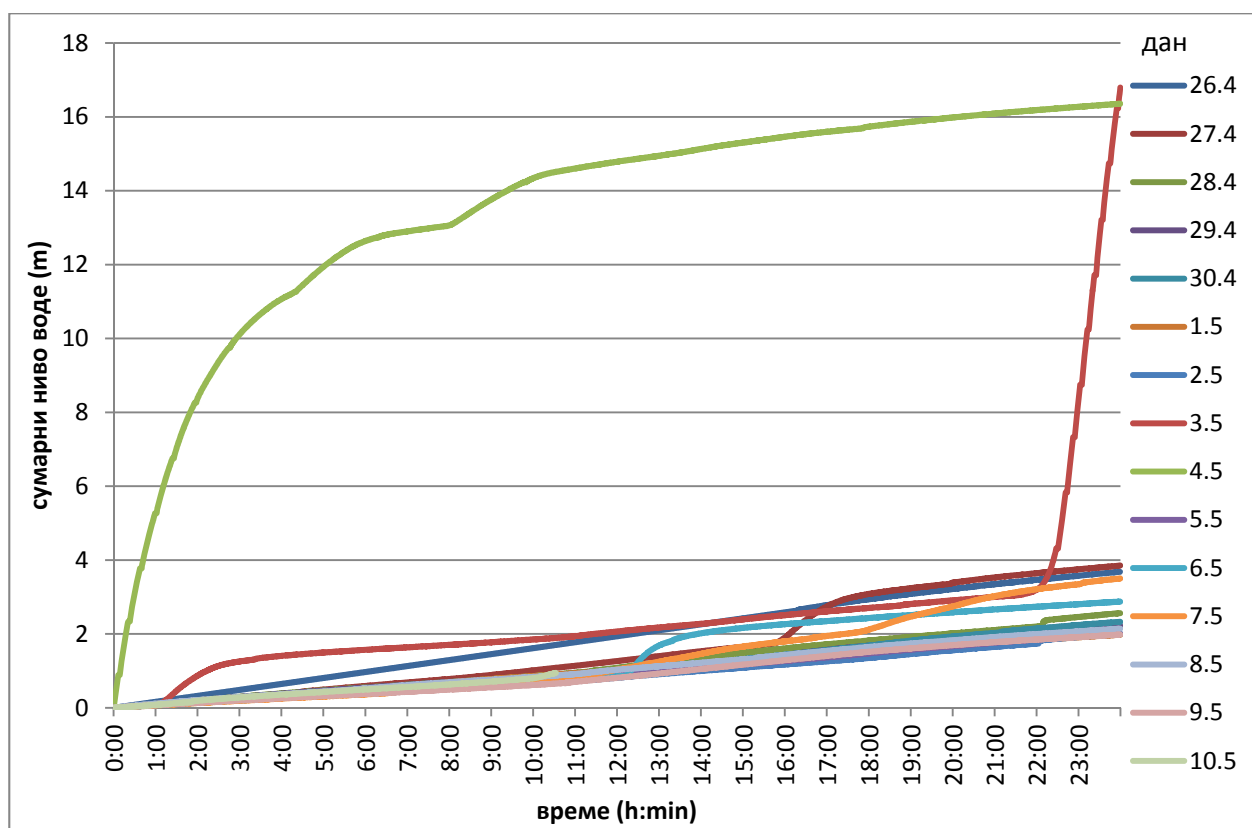


Слика 22: Сумарни нивои воде, на дневном нивоу

Разматран је кратак временски период од две недеље, у коме је ниво подземних вода био сличан и благо променљив, тако да је количина воде у канализационом систему услед инфилтрације подземних вода била слична свакога дана. Улице су пране свакога дана на исти начин и са истим количинама утрошене воде, тако да је количина воде која долази у канализацију и са те стране константна на дневном нивоу. Због наведених разлога, нагиби линија на графику би требало да су константни и да су вредности на крају свакога дана исте, у данима када нису забележене падавине. Очигледно је да то није случај, већ постоје уочљиве разлике, како у часовним, тако и у дневним вредностима, па претпостављамо да су на кишну канализацију прикључени и одводи фекалне канализације и да они узрокују споменуте промене у дотицају.

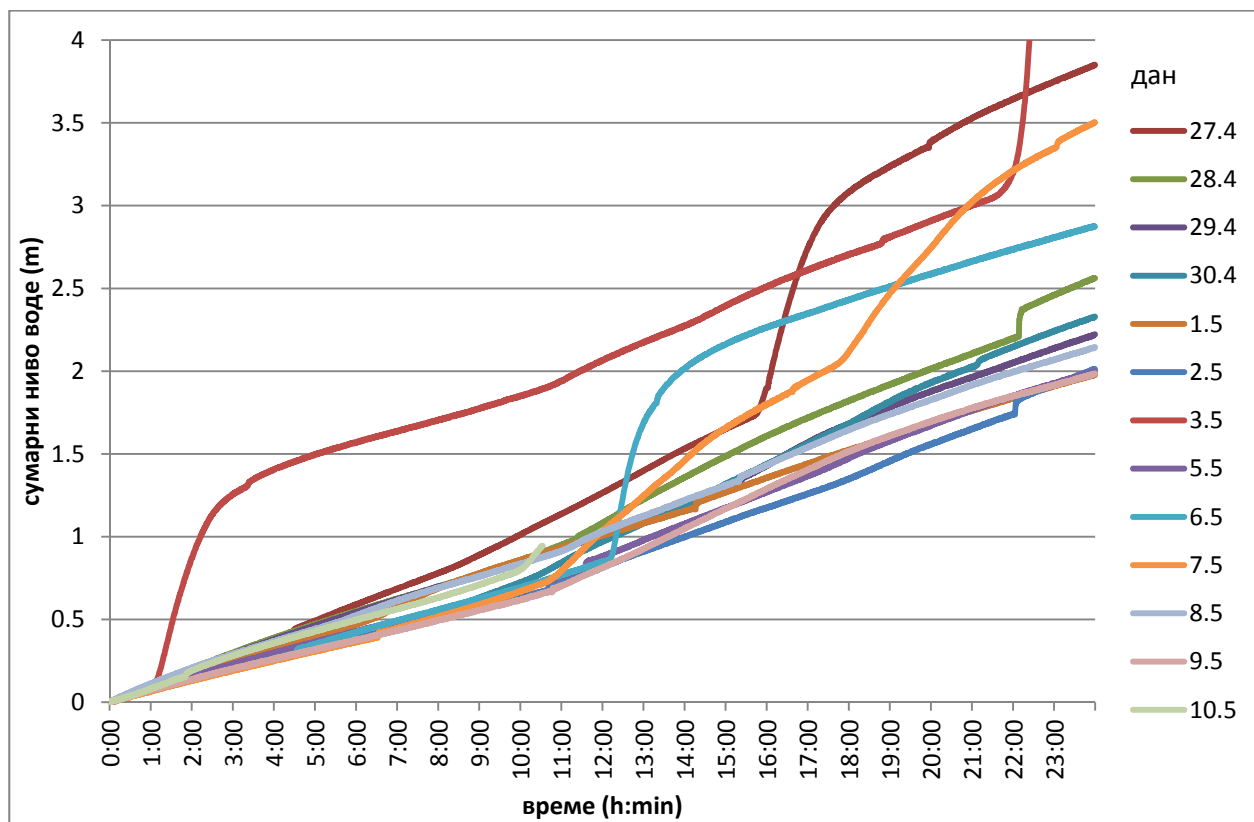
Црвеном бојом су означени радни дани, плавом нерадни дани, а зеленом је означен понедељак 30.4, јер тог дана већина државних фирми, школа, обданишта и факултета није радило па се тај дан не може посматрати исто као други радни дани. Са дијаграма се види да је потрошња радним данима нешто већа него нерадним данима и празницима. Два дана са екстремним вредностима (3. и 4. мај) су дани у којима су забележене падавине.

На следећој слици, слици 23, су приказане исте вредности, постављене једне поред других, ради јаснијег поређења.



Слика 23: Сумарни нивои воде

Кишна епизода се догодила у ноћи између 3. и 4. маја, тако да су вредности за те дане доминантне и на овом графику. Уколико посматрамо само линије које се односе на периоде који нису повезани са том кишом, као што је приказано на слици 24, могу се боље извући одређени закључци о понашању људи у посматраним данима.



Слика 24: Сумарни нивои воде

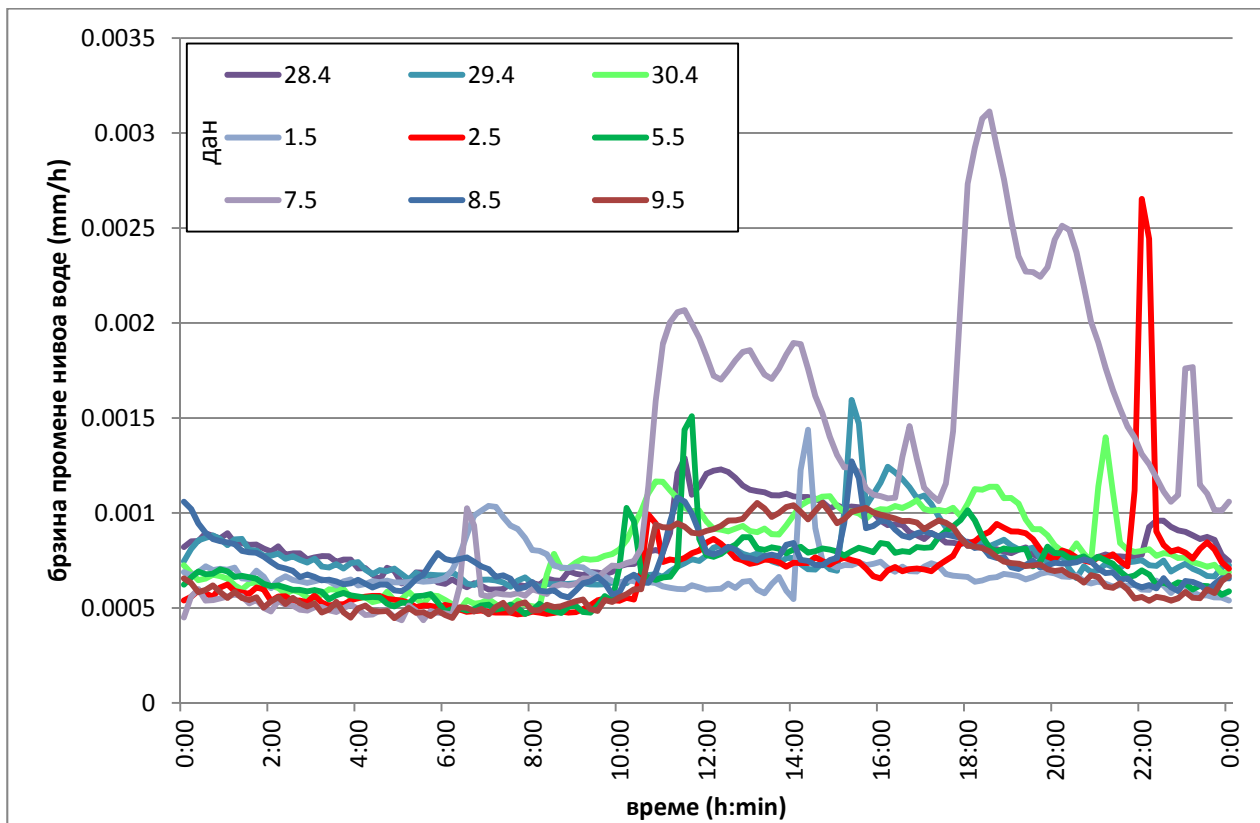
Нагиби линија, који представљају брзину промене нивоа, а самим тим говоре и о количини дотекле воде, су слични и постоје мале разлике у већини мерених дана, а у оним данима који одступају од шаблона постоје разумљиви разлози за већу потрошњу воде. Петак 27.4. је био последњи радни дан уочи почетка мини одмора око првог маја. Нагло повећање дотицаја почиње око 15,30 часова, после завршетка радног дана, када су људи дошли кући и спремали се за одлазак на одмор. Око 18 часова се нагиб линије смањује, јер је већина људи завршили са прањем, кувањем и спремањем за одмор.

Први радни дан после одмора је био 3.5. Када су се људи вратили са одмора 2.5. увече, ставили су ствари на прање у машину и спремали су се за посао. Прање веша, туширање и кување се дешавало од 1 до 3 часа ујутру 3.5, када се нагиб враћа на очекивани ниво. Истог дана, нешто пре 22 часа је почела да пада киша и она је узрок забележене нагле промене нивоа.

Дана 6.5. се десила краћа кишна епизода и она је узрок повећања дотицаја око поднева тога дана.

Многи људи су спојили празнике са викендом, тако да је 7.5. неким био први радни дан после одмора, када су их дочекале прљаве ствари са одмора, и прашњаве куће, па се повећање дотока приписује том узроку.

Часовне промене у дотицају није лако посматрати на претходном графику, већ је много лакше посматрати их на графику брзине промене нивоа, на слици 25.



Слика 25: Брзина промене нивоа воде у црпилишту

На графику брзине промене нивоа се најбоље види да постоји правило по коме се повећава и смањује потрошња у току дана и да личи на дијаграм промене потрошње воде у водоводним системима, са јутарњим скоком потрошње, благим опадањем у току дана и поновним скоком у поподневним часовима. Претходно изнесена тумачења о потрошњи воде се могу применити и овде. На основу овом дијаграма је одређена количина воде која константно улази у канализациони систем (и када нема падавина и за време кишних епизода), од  $7,6 \text{ m}^3/\text{h}$ . Ова вредност је касније проверена и потврђена поређењем количина препумпаних вода у периодима без падавина.

## Количине препумпаних вода

ЈКП БВК је уступио податке из своје базе података, тако да су за све разматране кишне епизоде били доступни подаци о забележеним временима рада пумпе, времену читавања стања у црпној станици и процењеној количини препумпаних вода.

Време рада је читавано са бројача који су постављени у црпним станицама и изражено је у часовима. Количине препумпаних вода су рачунате аутоматски, множењем времена рада пумпе са одређеним коефицијентом, који зависи од типа пумпе. У ЦС Нова 1 је тај коефицијент износио  $3600 \text{ m}^3/\text{h}$ , док је у ЦС Ауто-пут износио  $400 \text{ m}^3/\text{h}$ . Коефицијент представља процењену количину воде коју пумпа може да препумпа за сат времена. Самим тим, количине препумпаних вода не представљају стварно измерену количину воде, већ само приближну процену.

Приликом прорачуна количина препумпаних вода, у ЈКП БВК користе једначину:

$V = t * K$ , где су:

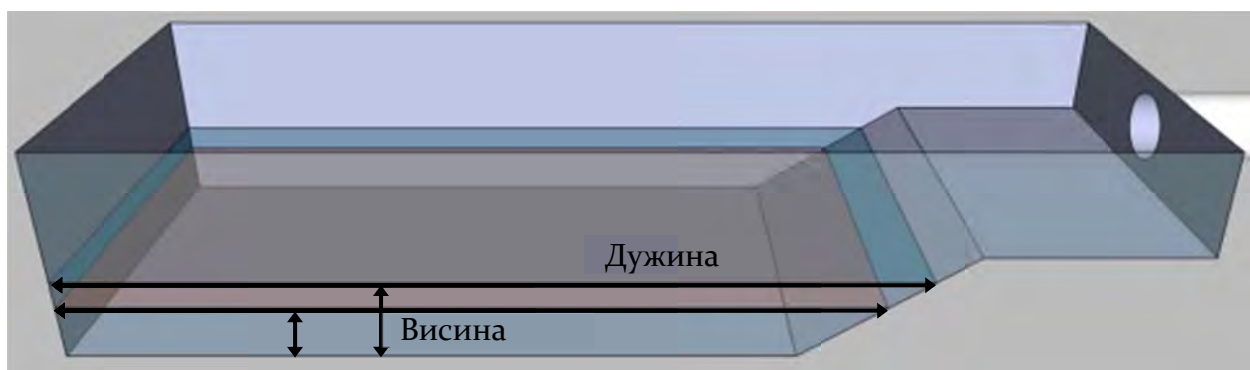
$V$  – запремина препумпане воде, у  $m^3$ ;

$t$  – забележено време рада пумпе, у часовима;

$K$  – коефицијент препумпавања који зависи од типа пумпе, у  $m^3/h$ .

За ЦС Нова 1, вредност коефицијента препумпавања износи  $3600 m^3/h$ . На основу измерених нивоа воде, могуће је релативно прецизно израчунати колики је био стварни протицај кроз пумпу у посматраном периоду и проверити вредност коефицијента.

Геометрија базена је позната, па се може израчунати његова површина, као и запремина воде у базену. Она је зависила од дубине воде, као што је шематски приказано на слици 26.



Слика 26: Геометрија базена црпилишта

Посматра се период између два узастопна паљења пумпе. У тренутку  $t_1$ , одмах после гашења пумпе, у базену се јавља ниво  $h_1$ , коме одговара запремина воде у базену  $V_1$ . У тренутку  $t_2$ , мало пре паљења пумпе, у базену се јавља ниво  $h_2$ , коме одговара запремина воде у базену  $V_2$ . Разлика запремина  $V_3 = V_2 - V_1 [m^3]$  представља количину воде која је дотекла у базен за време  $t_3 = t_2 - t_1 [h]$ , са просечном брзином дотока од  $Q = V_3/t_3 [m^3/h]$ . За време рада пумпе дотицај у базен не престаје, тако да је на запремину  $V_3$  потребно додати запремину  $V_4$ , која је једнака производу времена рада пумпе ( $t_4$ ) и просечне брзине дотицање ( $Q$ )  $V_4 = t_4 * Q [m^3]$ . На овај начин се добија укупна запремина воде која је дотекла у базен црпилишта  $V_5 = V_3 + V_4 [m^3]$ . Вредност коефицијента препумпавања ( $K$ ) се добија дељењем запремине воде  $V_5$  са временом рада пумпе ( $t_4$ ),  $K = V_5 / t_4$ , и представља количину воде коју пумпа препумпа за један час рада.

У раду је добијено 8 различитих вредности, приказаних на слици 25, а за меродавну је усвојена средња вредност, која износи  $3265 m^3/h$ . Усвојена вредност се добија и ако се средња вредност рачуна као аритметичка средина свих

	K	
	$m^3/h$	
	3051.00	
	3010.03	
	3086.19	
	3518.76	
	3320.50	
	3375.34	
	3328.46	
	3429.83	
average	3265.02	$m^3/h$

сти

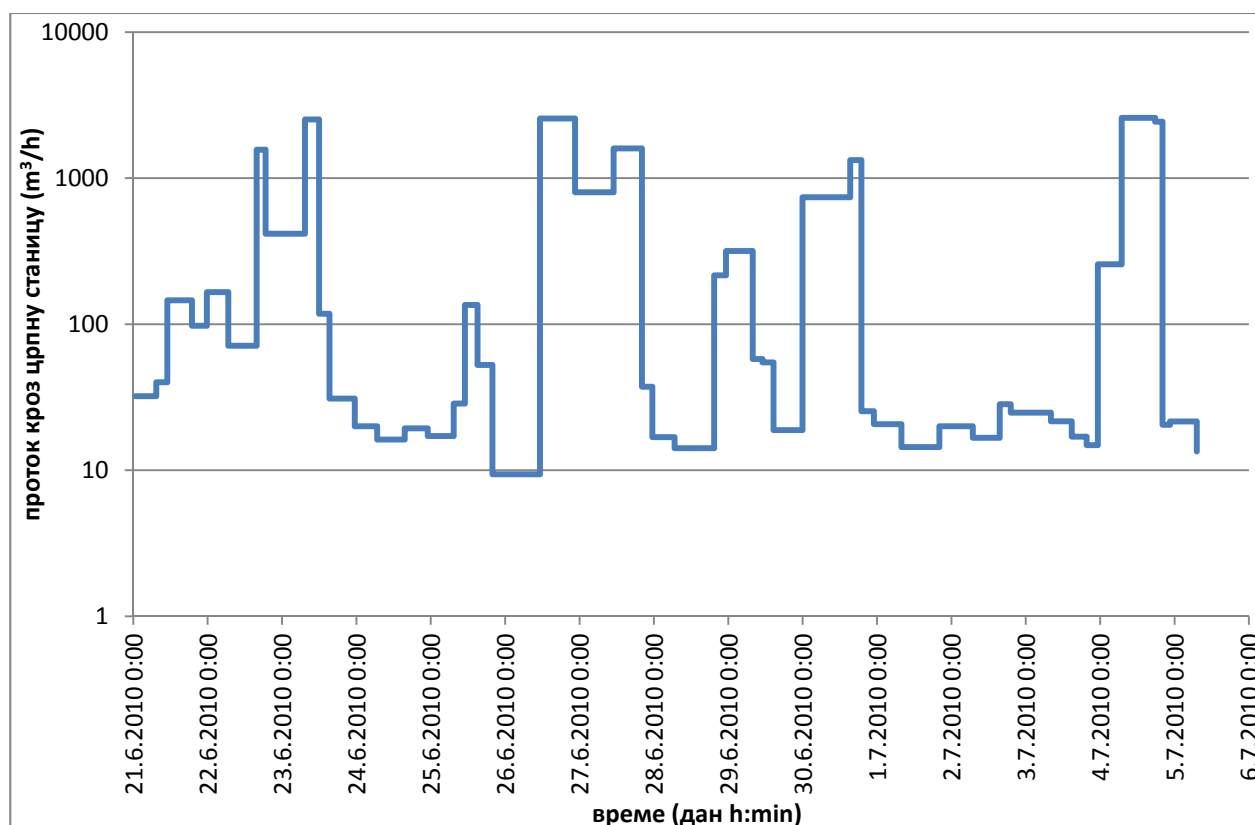


измерених вредности, као и уколико се избаце највећа и најмања израчуната вредност и одреди просечна вредност преосталих.

Ова вредност коефицијента ( $3265 \text{ m}^3/\text{h}$ ) се разликује од коефицијента који користи ЈКП БВК ( $3600 \text{ m}^3/\text{h}$ ). У прорачуну количина препумпаних вода је коришћена израчуната вредност коефицијента од  $3265 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Множењем броја часова рада пумпе, са израчунатим коефицијентом, добијена је количина дотекле воде преко података о времену рада пумпе. Забележени нивои воде у црпилишту су омогућили други начин прорачуна тих количина. Уколико се објашњена методологија за прорачун коефицијента примени између два узастопна паљења пумпе, запремина  $V_5$  представља укупну количину воде која је дотекла у базен. Ако се поступак понови неколико пута, на временске периоде који се међусобно настављају, добиће се количина дотекле воде на сатном, дневном или било ком другом потребном нивоу. На овај начин је одређена количина отекле воде са слива, за време кишне епизоде.

Са коригованом вредности коефицијента препумпавања и израчунатим количинама препумпаних вода између читавања података, одређен је и хидрограм отицаја воде са слива (а то је, у овом случају, исто што и проток кроз црпну станицу), приказан на слици 29.



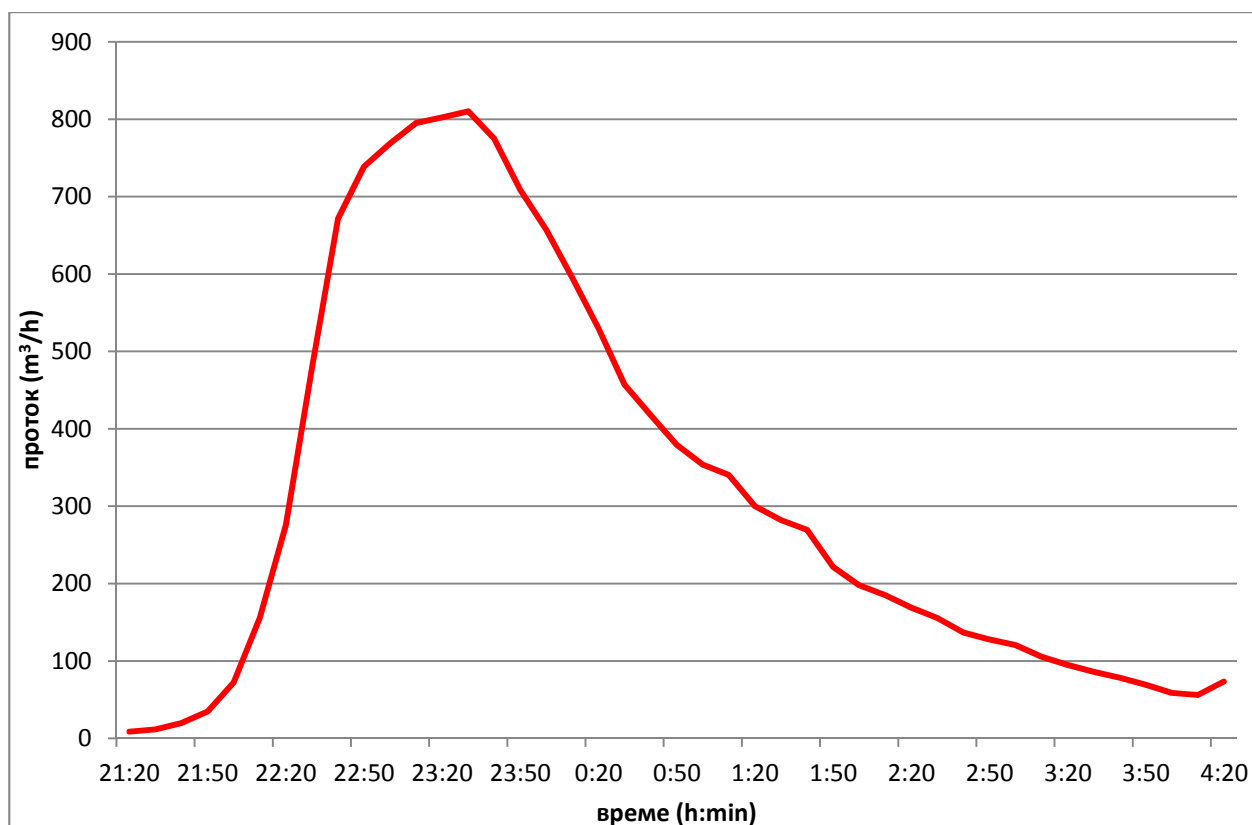
Слика 29: Хидрограм протока воде кроз црпну станицу

У овом кораку је примећено да се подаци о препумпаним водама за једну кишну епизоду не могу употребити у калибрацији, јер су времена читавања стања на црпној станици била пре кише и после ње, са великим временским размаком између њих. Ово

је онемогућило поуздану репродукцију података о промени и укупној запремини воде која је дотекла у црпну станицу, па је ова кишна епизода услед недовољно података означена као неподобна за калибрацију.

## Хидрограм кишне епизоде

За измерену кишну епизоду је одређена брзина промене нивоа и израчунате вредности су помножене са коефицијентом, који представља средњу површину базена за измерене дубине и на тај начин је добијен хидрограм кишне епизоде, приказан на слици 30. Извршена је провера вредности коефицијента, тако што је за тако добијени хидрограм израчуната запремина дотекле воде и упоређена са раније израчунаоном вредношћу и коригована је, како би добијене запремине биле исте.



Слика 30: Хидрограм кишне епизоде од 03.05.2012.

Приликом обраде других кишних епизода, код којих није постојало мерење нивоа воде, није било могуће одредити вредности улазног хидрограма, већ само количине препумпаних вода.

# Калибрација математичког модела

## Увод

Под појмом „калибрације“ подразумева се подешавање параметара математичког модела (на основу постојећих података) тако да се по завршетку тог процеса излазни резултати симулације поклапају, у траженој мери, са измереним вредностима. Битно је знати које податке треба поредити и који је тражени степен слагања. У овом раду су поређене запремине препумпаних вода за време кише на црпној станици, са количинама отеклих вода у моделу, у истом временском периоду, а није постојала унапред захтевана прецизност.

Приликом калибрације не треба мењати податке за које се зна да су тачни или приближно тачни (коте шахтова и терена, пречници цеви, везе између шахтова, нагиби цевовода), већ оне параметре који нису познати, нису прецизно дефинисани, или су претпостављени (облик хидрограма, укупна количина пале кише, сви параметри земљишта).

За озбиљну, поуздану, калибрацију је потребно поседовати већи скуп података, како би се модел калибрисао за различите догађаје (на пример, неколико кишних епизода кратког трајања, дугог трајања, са мањим и већим интензитетима кише) и како би могла да се уради верификација, тј. провера модела. У конкретном случају су постојали подаци о две кишне епизоде, што није довољно за поуздану калибрацију, али јесте довољно за објашњење методологије израде и калибрације математичког модела кишне канализације, што је циљ овог рада.

Модел коришћен у програму Infoworks CS је направљен у сарадњи са ЈКП БВК, коришћењем њихове методологије израде модела и власништво је јавног предузећа. Подаци у том моделу нису калибрисани, већ су коришћене вредности које су добијене у току његове израде или који се користе приликом симулације других сливова кишне канализације у Београду и представља почетни модел од кога је започета калибрација, у програму 3DNet.

Пре почетка калибрације, проверено је да ли се измерене вредности количина препумпаних вода налазе у оквиру опсега које је могуће добити симулацијом, између минималног и максималног отицаја. Како би се одредиле екстремне вредности отицаја, направљене су две верзије модела, са нереално малим и нереално великим отицајем са земљишта и израчунате су количине отеклих вода. Како се за обе кишне епизоде добило да се израчунате вредности препумпаних вода налазе између вредности добијених овим моделима, приступило се калибрацији модела.

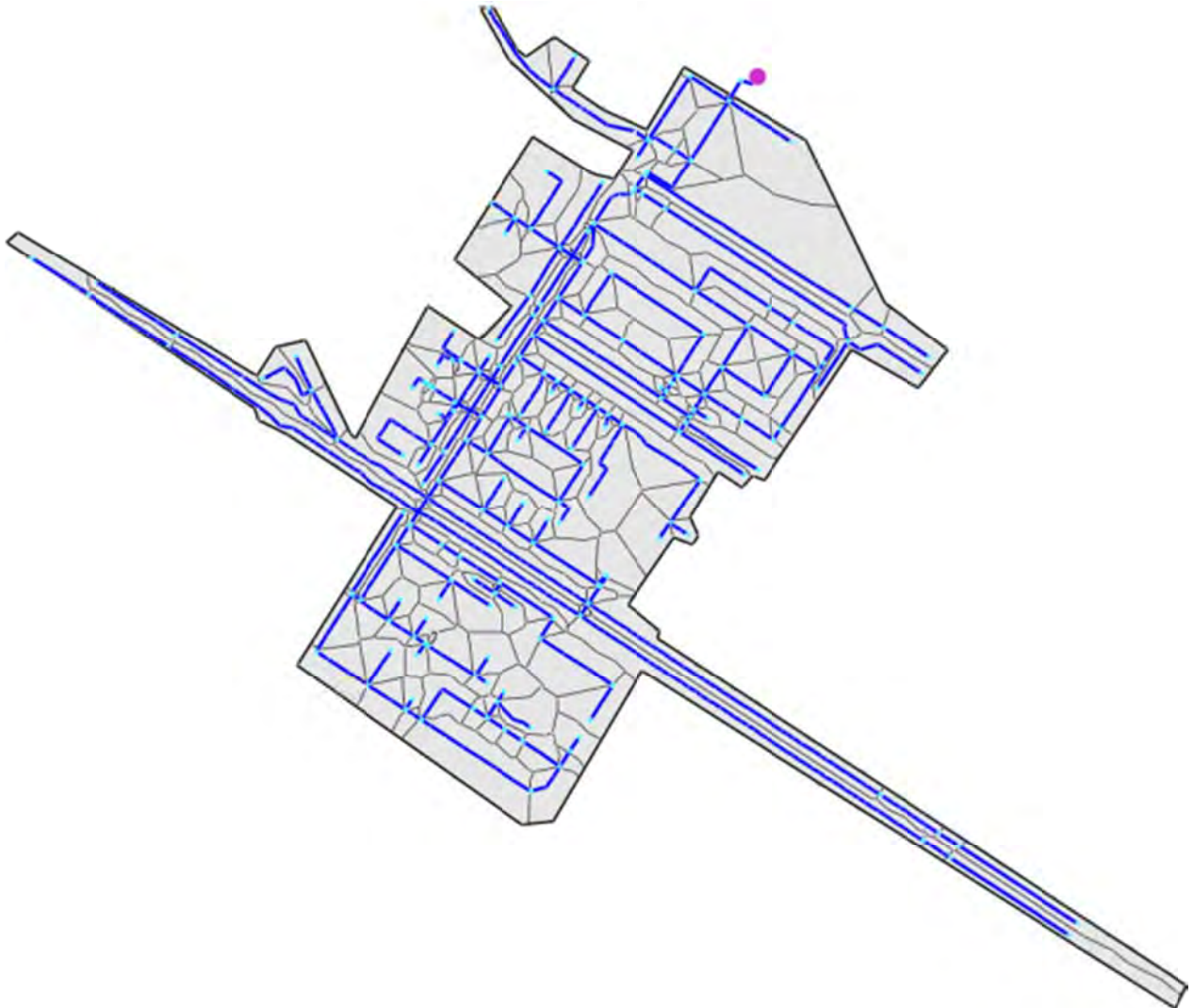
У процесу калибрације су направљена два модела. Обе верзија модела садрже исте податке о терену, мрежи и сливним површинама. Модели се разликују у подацима о намени површина. У првој верзији модела, целокупно сливно подручје има исте карактеристике у погледу удела кровова, пропусних и непропусних површина, па је самим тим и отицај идентичан у свим тачкама модела. Друга верзија модела

представља надградњу прве верзије, јер је у њу убачена и карта намене површина. Направљена су 4 додатна слоја, који означавају где се на терену налазе зграде, зелене површине, непрпусне површине и улице. На местима где није било података о врсти терена, коришћен је слој који је описивао терен са мешовитим садржајем.

## Калибрација

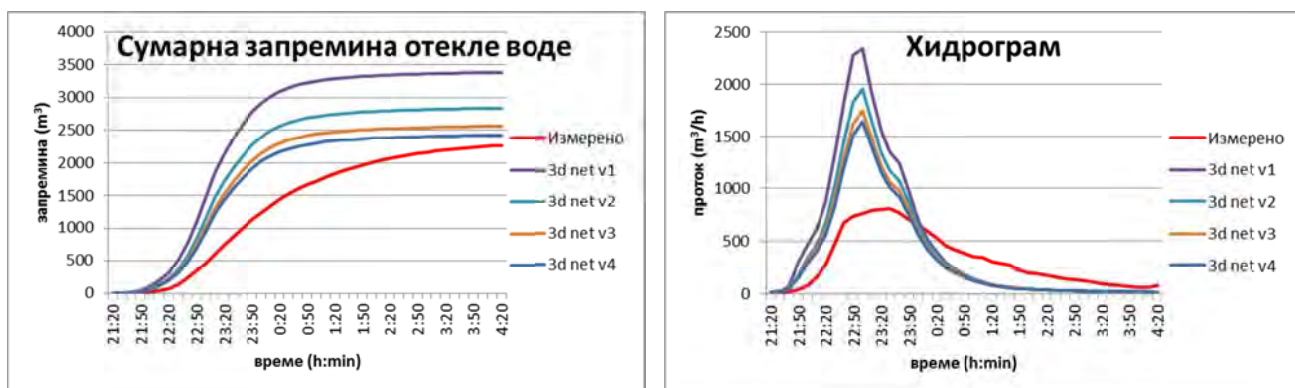
### Модел са једним типом терена

На слици 31 је приказан изглед модела, са цевима, шахтовима, сливним површинама и изливом. Модел је подешен тако да цео слив има хомогене карактеристике терена.



Слика 31: Приказ модела са једним типом терена

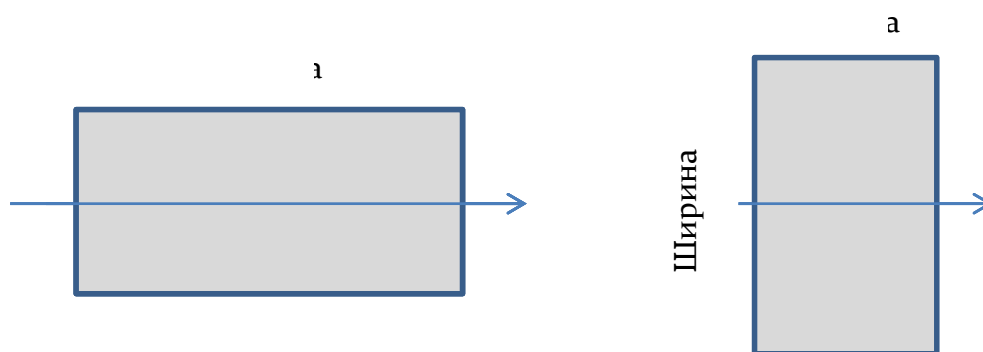
Калибрација је започета постављањем вредности о земљишту на претпостављене вредности. Варирањем процента кровова, пропусних и непрпусних површина је започето подешавање модела, а први резултати су приказани на слици 32.



Слика 32: Резултати симулације

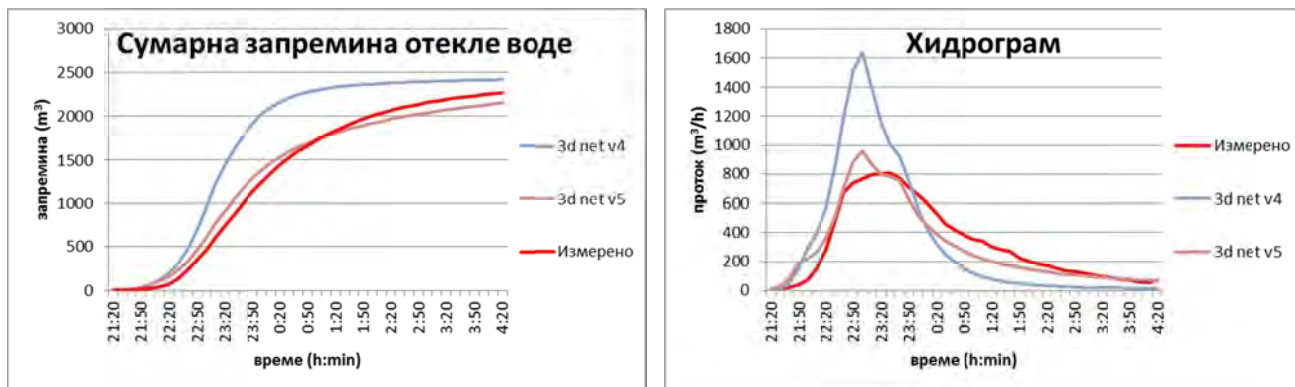
Почетне вредности запремина су поприлично одступале од измерених, али је смањењем учешћа кровова и непропусних површина (као и процента директне повезаности тих површина са канализацијом) та разлика значајно смањена. Иако није захтевано да се крива протока слаже са измереним хидрограмом, увидом у протоке и облик хидрограма је лако уочљиво да постоји неслагање у променама хидрограма и да се у моделу јавља већи отицај, са краћом базом, неколико пута већом максималном вредности протока, краћим периодом цеђења слива и да је потребно смањити брзину којом вода са терена стиже до канализације, то јест ублажити талас воде који улази у канализацију и продужити време путовања воде преко терена.

Приликом прорачуна отицаја, један од фактора које је могуће подешавати је фактор облика сливних површина, који представља количник ширине и дужине меродавне сливне површине, где је дужина она страна сливне површине која је паралелна са припадајућом цеви, као што је означено на слици 33.



Слика 33: Промена фактора облика сливне површине

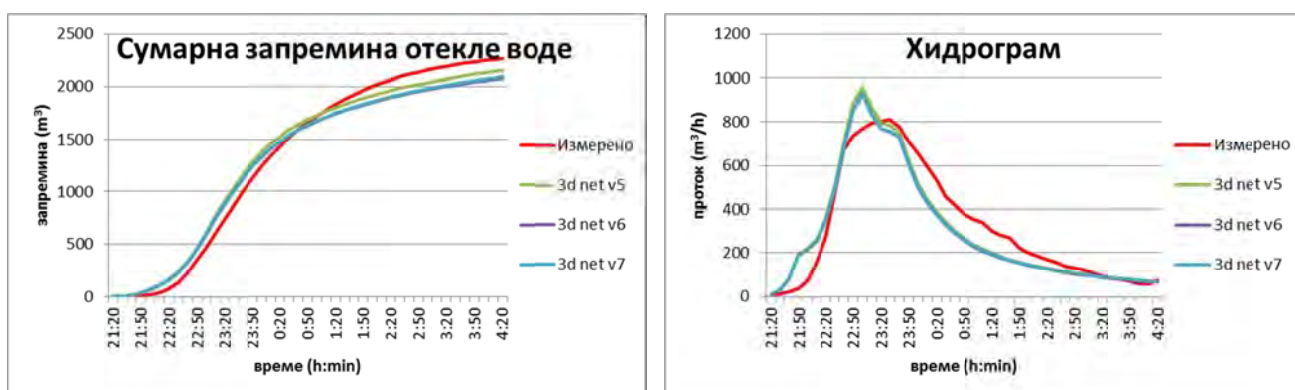
Са повећањем вредности коефицијента, продужава се пут и време које је потребно води да пређе преко сливне површине, па се ублажавају узлазна и силазна грана хидрограма. Повећањем тог фактора и променом облика меродавне површине са правоугаоне спљоштене, са правоугаону издужену, добијено је много боље слагање вредности, као што се види на слици 34.



Слика 34: Резултати симулације

Како је максимална вредност дотицаја и даље била приметно већа од измерене, а постојале су и разлике у свим временским тренуцима, калибрација је настављена и поред достизања готово истих запремина воде.

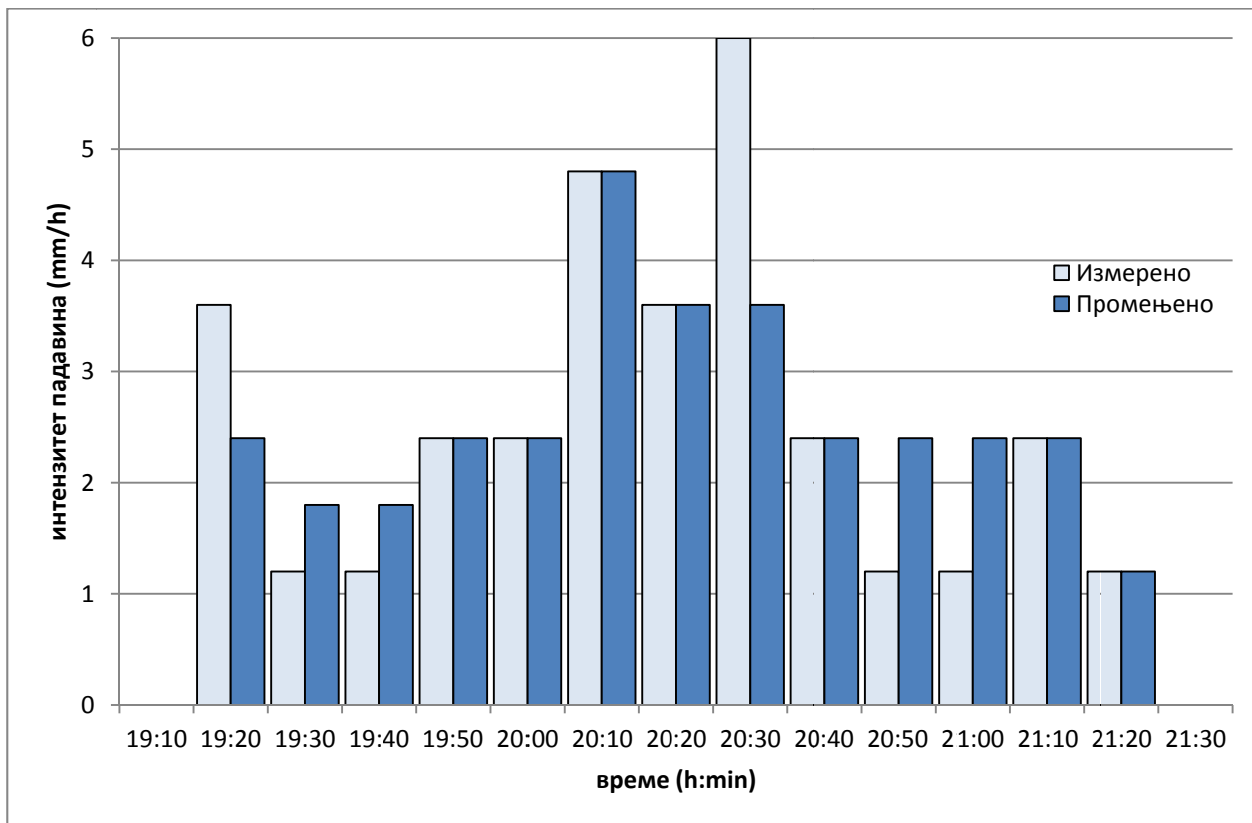
У следећим корацима је повећан ретенциони капацитет пропусног и непропусног земљишта (v6) и смањен је Дарсијев коефицијент пропусности, а повећана порозност земљишта (v7) и добијене су вредности приказане на слици 35.



Слика 35: Резултати симулације

У последњем кораку је промењен облик хидрограма, уз задржавање истих количина и трајања падавина, као што се види на слици 36.

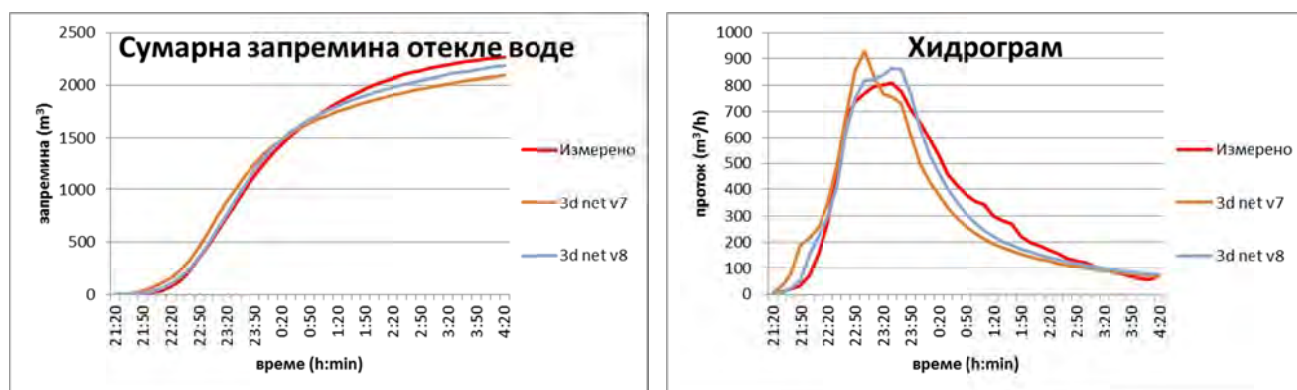




Слика 36: Коришћени хидрограми

Овакав поступак је оправдан, јер, као што је већ наведено, количине падавина се могу знатно разликовати и између две блиске површине, а нарочито на местима која су удаљена неколико километара, као што је разматрана област удаљена од кишомера са кога су коришћени подаци.

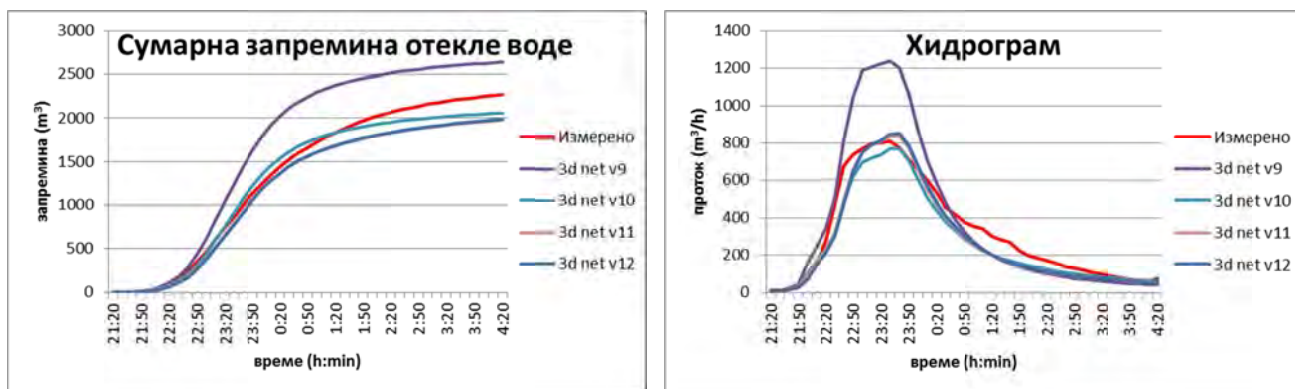
Подударача у мереним и симулираним вредностима, после промене облика хидрограма (слика 37), потврђују да вероватно јесте постојала разлика између измерене кише и оне која је погодила посматрану област.



Слика 37: Резултати симулације

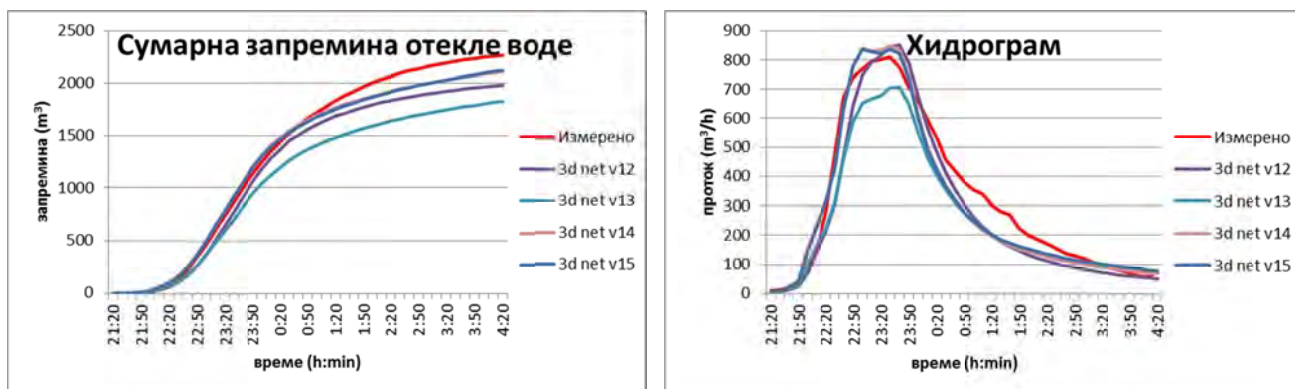
Иако су облик излазног хидрограма и запремина отекле воде показали добро поклапање са мереним вредностима, оцењено је да фактор облика сливних површина има превелику вредност и да не одговара реалном стању, па је његова вредност смањена и настављен је процес калибрације.

Упоредо са променом коефицијента облика сливних површина, повећани су и коефицијенти трења за пропусне и непропусне површине. Параметри, који одређују где се вода слива са кровова, су били подешени тако да је један део воде одлазио директно у канализациону мрежу, а један део се изливао на површину терена. Од верзије 9, на даље, укупна количина воде са кровова се сливала на површину терена. У верзији 10 је смањен проценат кровова и непропусних површина, а повећан удео пропусних површина. У следеће две измене су варирани коефицијенти трења и коефицијент облика сливне површине, како би се добила боља поклапања укупних запремина отекле воде, а резултати су приказани на слици 38.



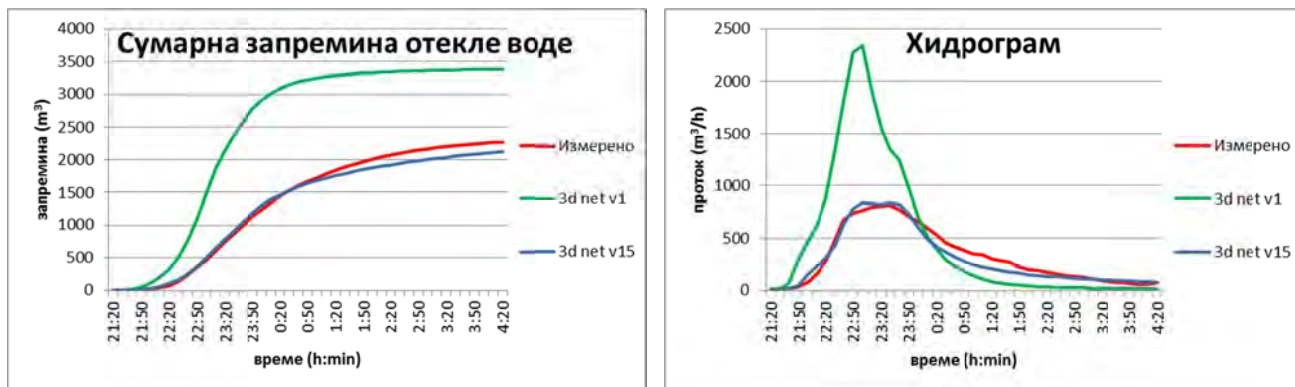
Слика 38: Резултати симулације

У последње три верзије је настављено са финим подешавањем свих до сада споменутих параметара, а на слици 39 се може видети како се то одразило на излазне величине.



Слика 39: Резултати симулације

Уколико се, на слици 40, погледа разлика између измерених вредности, оних које су добијене након првог покретања модела и вредности добијених после завршене калибрације, постаје јасно да је калибрација неопходан корак у изради математичког модела. Колико год да су подаци о елементима модела поуздани и детаљни, увек треба урадити калибрацију и модификовати параметре.



Слика 40: Резултати симулације

### Модел са различитим типовима терена

На слици 41 је приказан модел са додатим типовима терена. Елементи модела су приказани истим бојама као и на претходним сликама. Иако су приказани и елементи који се налазе ван граница слива, они нису били обухваћени прорачуном. Сваком од коришћених слојева је задат другачији проценат кровова, пропусних и непропусних површина.

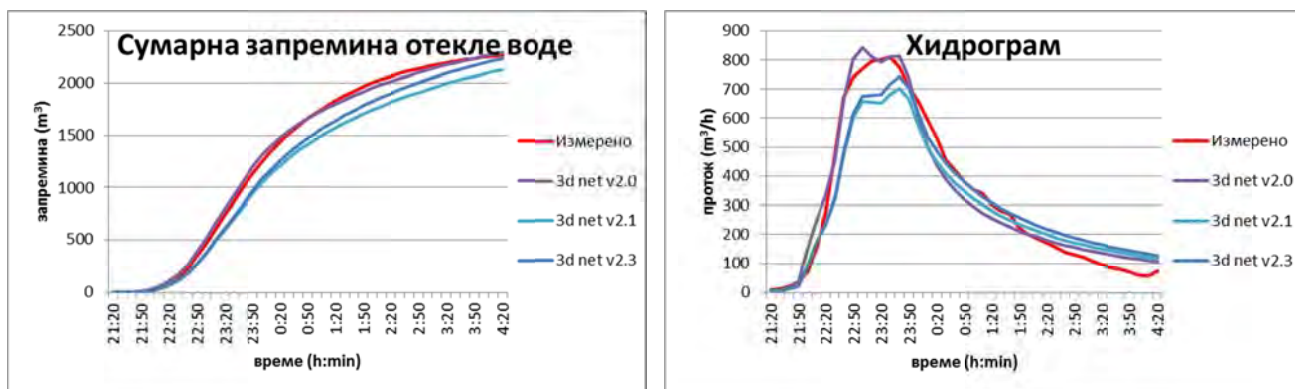


Слика 41: Приказ модела са више типова терена



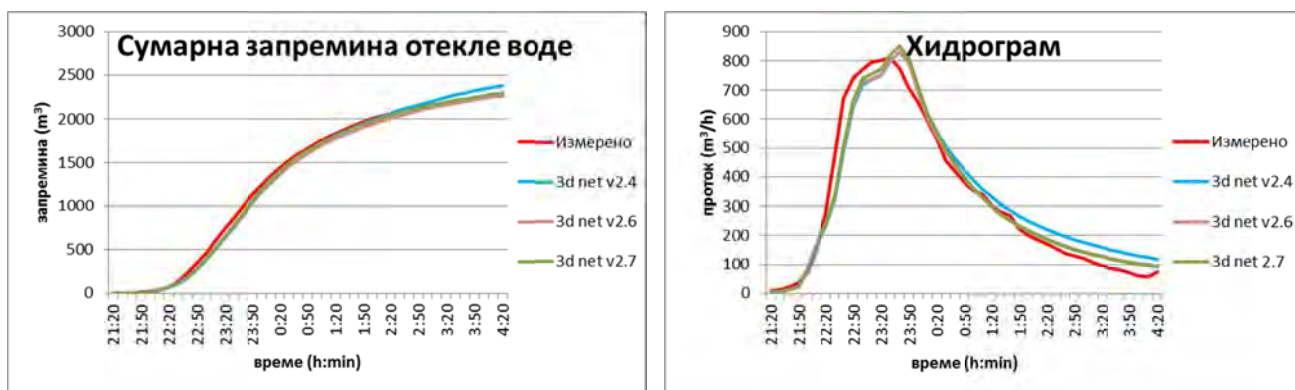
Почетни параметри овог модела су се разликовали само у погледу удела кровова, пропусних и непропусних површина, на оним деловима терена где су постојали нови подаци, а на осталим деловима су остављене вредности добијене калибрацијом претходног модела.

Ова верзија модела представља даљу надградњу претходног модела, па су већ и први резултати показали изузетан ниво поклапања са мереним подацима, као што се види на слици 42.



Слика 42: Резултати симулације

Приликом калибрације овог модела су поново прилагођавани параметри који су већ спомињани приликом калибрације претходног модела, тако да они неће бити поново набрајани. На слици 43 је приказана промена излазних вредности у последњим корацима калибрације.



Слика 43: Резултати симулације

На претходним сликама су приказане трансформације излазног хидрограма и количина отекле воде са слива за кишну епизоду од 3.5.2012, јер је једино за њу постојао излазни хидрограм и промена запремина са краћим временским кораком. За преостале две кишне епизоде су били доступни подаци само о неколико запремина дотекле воде, али не и како се она мењала између читавања, која су удаљена и по неколико часова. Кишна епизода од 28.06.2010. је коришћена у калибрацији паралелно са изнад приказаном кишом, али су упоређиване само крајње запреmine. Кишна епизода од 16.08.2010. је имала нејасне податке, тако да она није коришћена у калибрацији.

## Упоредивање добијених резултата

Вредности отицаја са терена и протицаја у канализационој мрежи су рачунати са истим временским кораком, од 60 секунди.

Подаци о кишној епизоди од 03.05.2012. су били најпоузданији, са најмањим временским размаком између мерења и једино је за ту кишу постојао излазни хидрограм, тако да је ова кишна епизода имали највећи утицаја у калибрацији модела. Киша од 28.06.2010. је послужила за проверу калибрисаности модела, док је трећа кишна епизода приказана само информативно. За кишу која се догодила 16.08.2010. је за изабрану дужину симулације је постојала само једна тачка, па је почетна запремина одређена преко линеарне зависности између вредности које су измерене пре почетка одабраног периода и на његовом крају.

На почетку процеса калибрације је одлучено ће главни калибрациони параметар бити количина отекле воде са слива, па је она једина упоређивана.

Израчунат је и коефицијент отицаја, као количник запремине отекле кише са слива и количине запремине пале кише. Запремина отекле кише са слива је одређена као разлика количине запремине отекле воде и запремине воде која представља допринос базног отицаја (инфилтрација подземних вода и нелегални прикључци). Запремина отекле воде у моделу је представљала количину воде која је истекла из излива на крају мреже, док је стварна запремина израчуната као количина воде која је препумпана кроз црпну станицу. Запремина пале кише је израчуната као производ укупног слоја пале кише и површине слива.

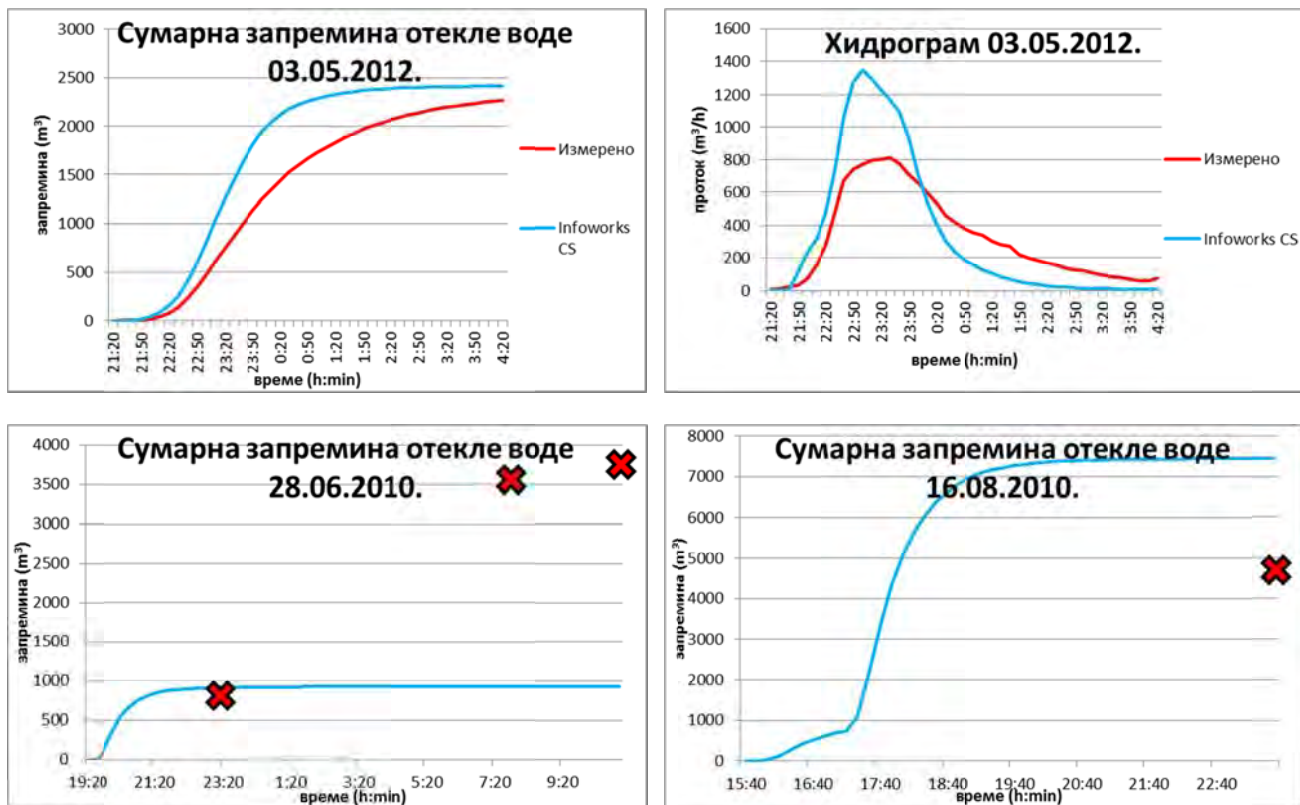
Вредности коефицијената отицаја израчунатих на основу измерених вредности су приказани у табели 4.

Кипна епизода	03.05.2012.	28.06.2010.	16.08.2010.
Коефицијент отицаја	0,34	0,41	0,25

Табела 4: Вредности коефицијената отицаја

## Резултати симулације у програму Infoworks CS

Модел који је коришћен у оба програма је направљен у програму Infoworks CS. Калибрација није рађена у програму Infoworks CS, већ су пуштене кише, без икаквог подешавања параметара. Свака сливна површина је имала другачији коефицијент отицаја, а упросечени коефицијент отицаја сливних површина на нивоу целог слива је износио 0,55. Резултати симулације су приказани на слици 44. Црвеним линијама и крстићима су обележене измерене вредности, а плавим линијама вредности добијене прорачуном у програму Infoworks CS.



Слика 44: Резултати симулације модела у програму Infoworks CS

Вредности добијене у прорачуну се могу видети у табели 5.

Кишна епизода	03.05.2012.	28.06.2010.	16.08.2010.
Измерена количина отекле воде	2247 m <sup>3</sup>	3744 m <sup>3</sup>	4709 m <sup>3</sup>
Количина отекле воде у моделу	2416 m <sup>3</sup>	934 m <sup>3</sup>	7448 m <sup>3</sup>
Разлика у отеклим запреминама	169 m <sup>3</sup>	2810 m <sup>3</sup>	2739 m <sup>3</sup>
Разлика у отеклим запреминама	8 %	75 %	58 %
Коефицијент отицаја	0,37	0,09	0,39

Табела 5: Резултати симулације модела у програму Infoworks CS

Као што је било и очекивано, резултати су се веома разликовали од измерених, сем у погледу запремине за прву кишну епизоду. Ипак, увидом у хидрограм, јасно је да је сличност у коначној запремини случајна, јер хидрограм нема сличан облик као измерени, па би се другачијим избором дужине симулације разлика у запреминама повећала. Ово потврђује раније изнет коментар да је модел потребно калибрисати, како би могао да испуни разлог његове израде – да верно опонаша природни (изграђени) систем који представља.



## Резултати симулације у програму 3DNet

У овом програму су направљена два различита модела, један са хомогеним типом терена и други са пет различитих типова терена. Резултати су приказани одвојено за сваки модел.

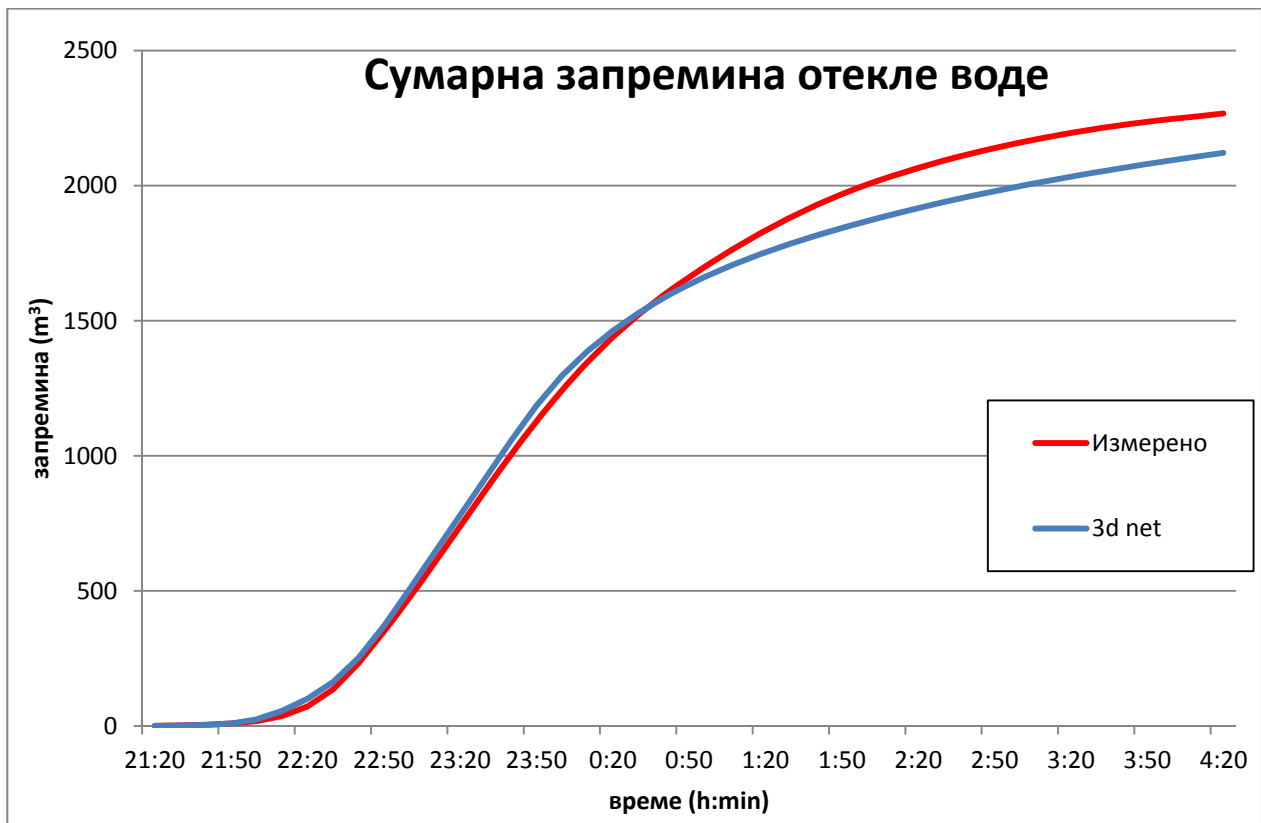
### Модел са једним типом терена

По завршетку калибрације усвојени су параметри математичког модела, приказани у следећој табели.

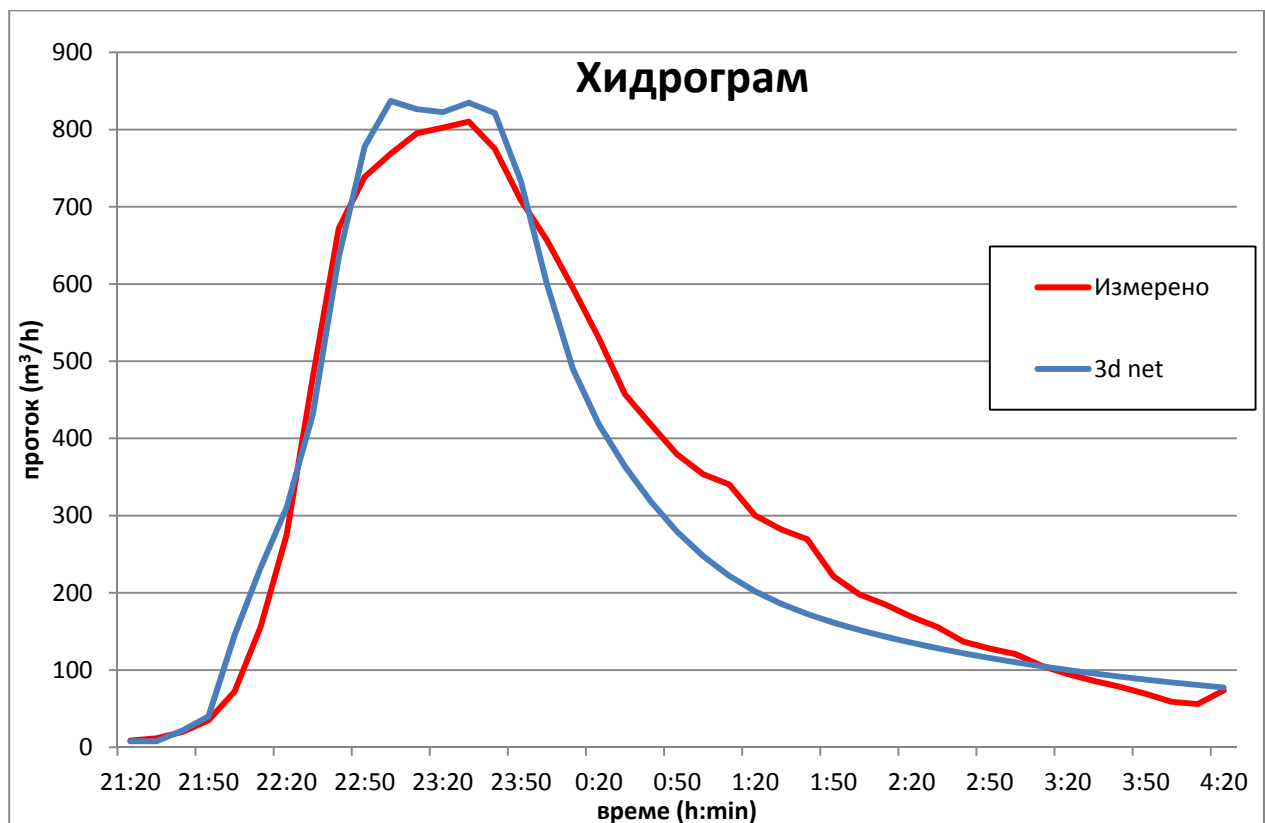
Учешће површина покривених крововима	20 %
Учешће непропусних површина	20 %
Учешће пропусних (зелених) површина	60 %
Ретенциони капацитет пропусних површина	1 mm
Ретенциони капацитет непропусних површина	0.5 mm
Дарсијев коефицијент инфилтрације	$1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
Порозност земљишта	0,3
Коефицијент капиларности	$0,002 \text{ m}^{3/2} \text{ s}^{-1/2}$
Фактор облика сливне површине	7
Манингов коефицијент трења за пропусне површине	$1 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$
Манингов коефицијент трења за непропусне површине	$0,35 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$
Процент воде са кровова која учествује у отицају	100 %
Процент воде са кровова која се излива на терен (остатак одлази директно у канализацију)	100 %
Процент воде (са непропусних површина) која завршава у канализацији	100 %

Табела 6: Усвојене вредности параметара математичког модела

Излазни хидрограм и запремина отекле воде, за кишну епизоду од 03.05.2010. су приказани на сликама 45 и 46.

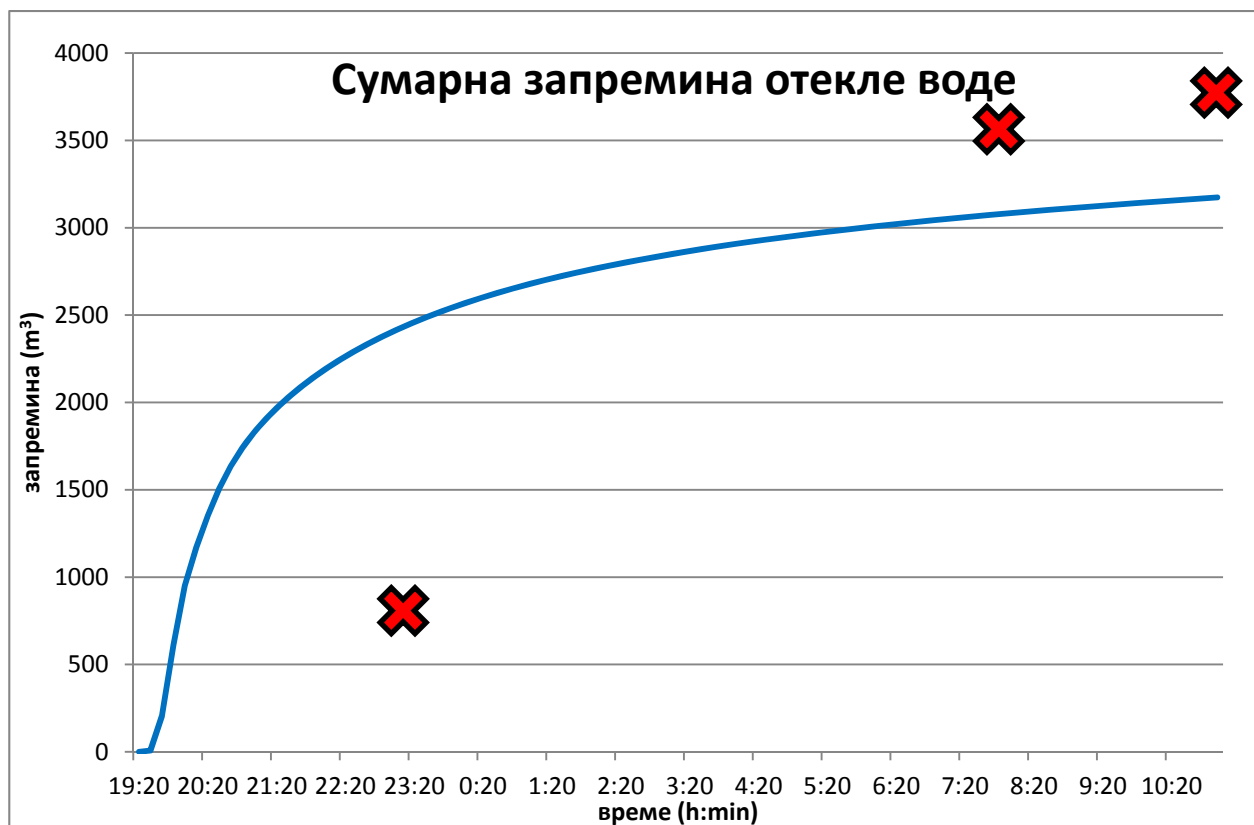


Слика 45: Резултати симулације за кишну епизоду од 03.05.2012.



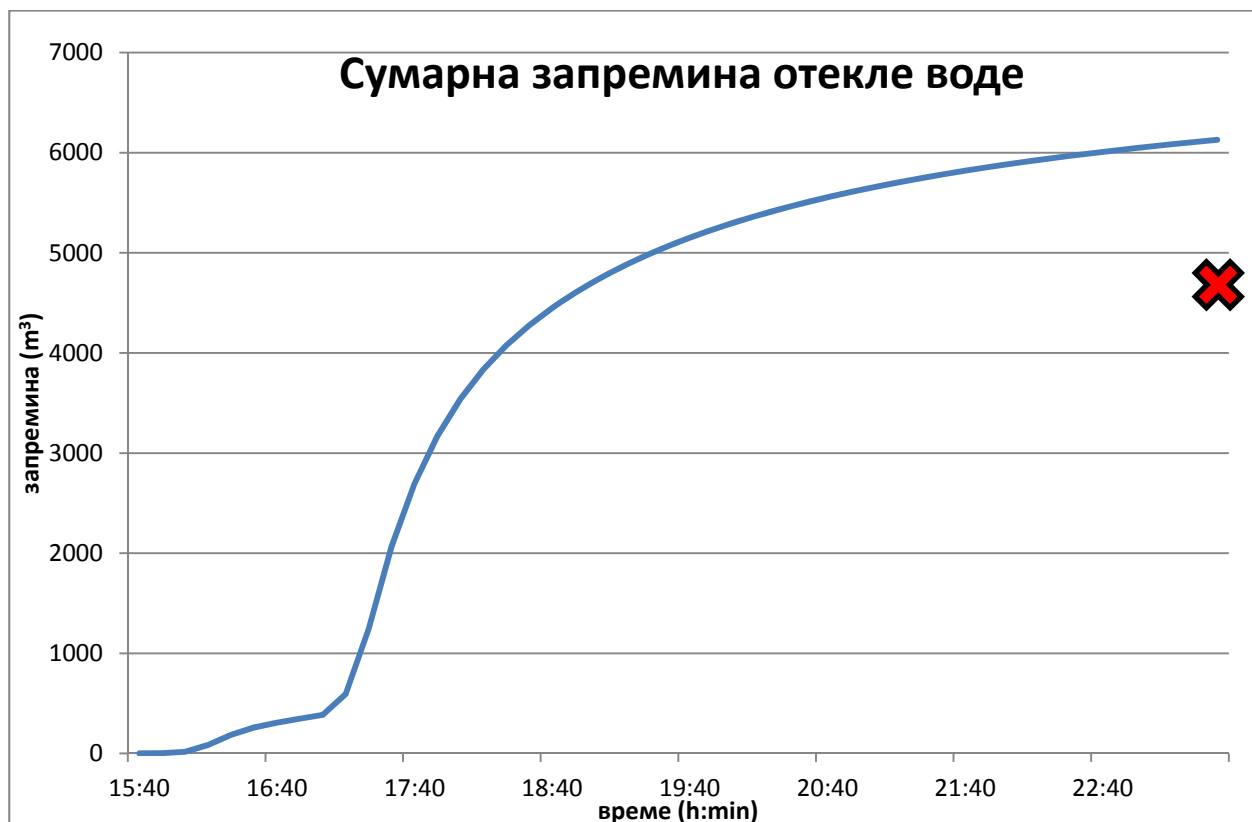
Слика 46: Резултати симулације за кишну епизоду од 03.05.2012.

Резултати симулације за кишу од 28.об.2010. су приказани на слици 47. Црвеним крстићима су означене измерене вредности, а плавим линијама резултати добијени прорачуном у програму 3DNet.



Слика 47: Резултати симулације за кишну епизоду од 28.об.2010.

Резултати за кишну епизоду од 16.08.2010. се могу видети на слици 48. Примењена је иста техника обележавања резултата.



Слика 48: Резултати симулације за кишну епизоду од 16.08.2010.

У табели 7 су приказани резултати за све три кишне епизоде.

Кишна епизода	03.05.2012.	28.06.2010.	16.08.2010.
Измерена количина отекле воде	2247 m <sup>3</sup>	3744 m <sup>3</sup>	4709 m <sup>3</sup>
Количина отекле воде у моделу	2121 m <sup>3</sup>	3174 m <sup>3</sup>	6129 m <sup>3</sup>
Разлика у отекућим запреминама	126 m <sup>3</sup>	570 m <sup>3</sup>	1420 m <sup>3</sup>
Разлика у отекућим запреминама	6 %	15 %	23 %
Коефицијент отицаја	0,32	0,35	0,32

Табела 7: Резултати симулација модела са хомогеним тереном

Калибрација модела је рађена према кишној епизоди од 03.05, тако да је високо поклапање вредности запремина за ту кишу било очекивано. Излазни хидрограм такође показује добро слагање са измереним хидрограмом, са малом разликом у силазном делу хидрограма.

Киша која се догодила 28.06.2010. је послужила за проверу калибрисаности модела. За ову кишну епизоду су на располагању само три податка о запреминама препумпане воде, а не зна се ни зависност по којој се та запремина мењала. Из тог разлога има смисла поредити само укупну запремину на крају прорачуна. Како је број података био мали, а њихова поузданост такође није била велика (постоји могућност да је лоше било забележено или очитано време рада пумпи, време у које је очитавање извршено,

да је количина пале кише другачија од оне измерене на кишомеру у Карађорђевој парку), може се рећи да је поклапање запремина задовољавајуће.

Трећа кишна епизода је на самом почетку калибрације одбачена као непоуздана, тако да нема разлога коментарисати добијене вредности.

### Модел са различитим типовима терена

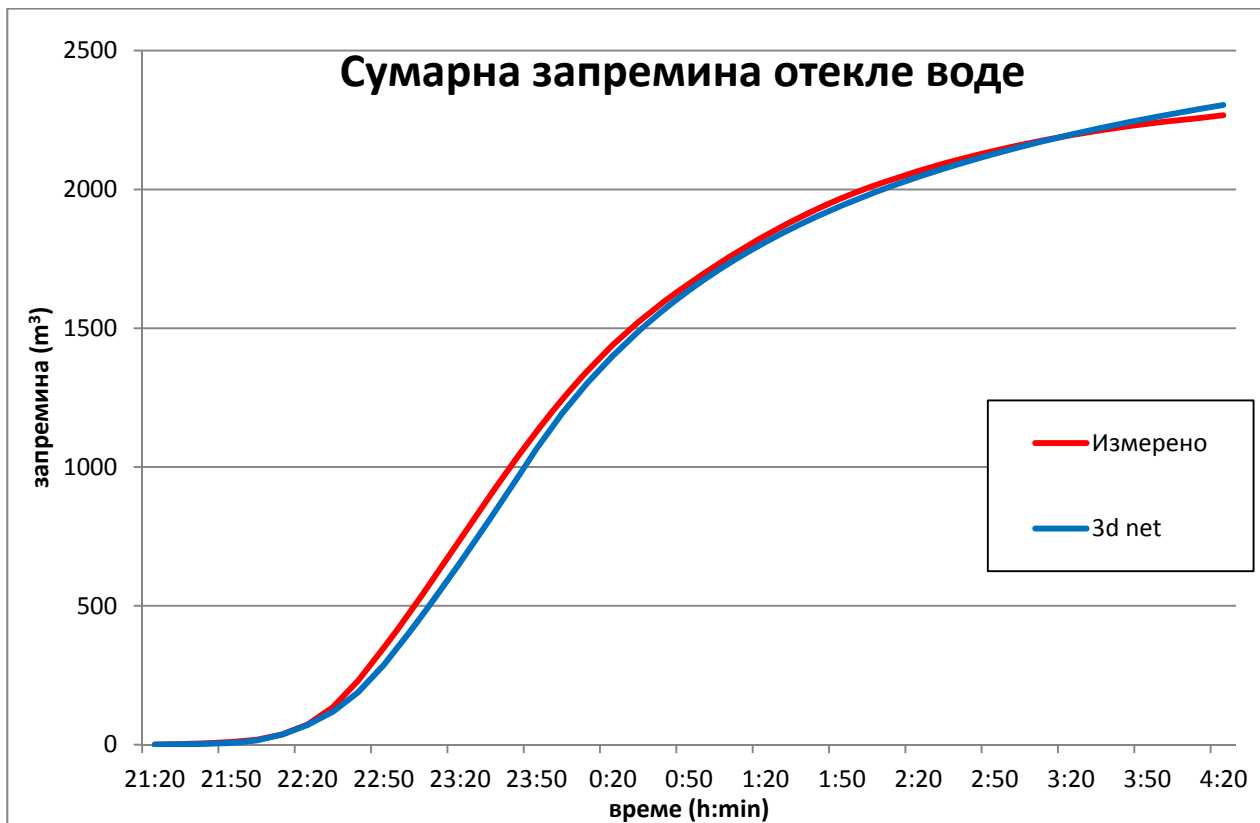
Параметри овог модела су се разликовали од вредности коришћених у моделу са једним типом терена и приказани су у табели 8.

Ретенциони капацитет пропусних површина	1 mm				
Ретенциони капацитет непропусних површина	0.5 mm				
Дарсијев коефицијент инфилтрације	$1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$				
Порозност земљишта	0,3				
Коефицијент капиларности	$0,002 \text{ m}^{3/2} \text{ s}^{-1/2}$				
Фактор облика сливне површине	5				
Манингов коефицијент трења за пропусне површине	$0,8 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$				
Манингов коефицијент трења за непропусне површине	$0,23 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$				
Процент воде са кровова која учествује у отицају	100 %				
Процент воде са кровова која се излива на терен (остатак одлази директно у канализацију)	100 %				
Процент воде (са непропусних површина) која завршава у канализацији	100 %				
Врста тла / Тип терена	Зеленило	Зграде	Бетонске површине	Улице	Остало
Кровови	0	0,9	0,1	0	0,1
Непропусне површине	0,1	0,1	0,8	0,9	0,2
Пропусне површине	0,9	0	0,1	0,1	0,7

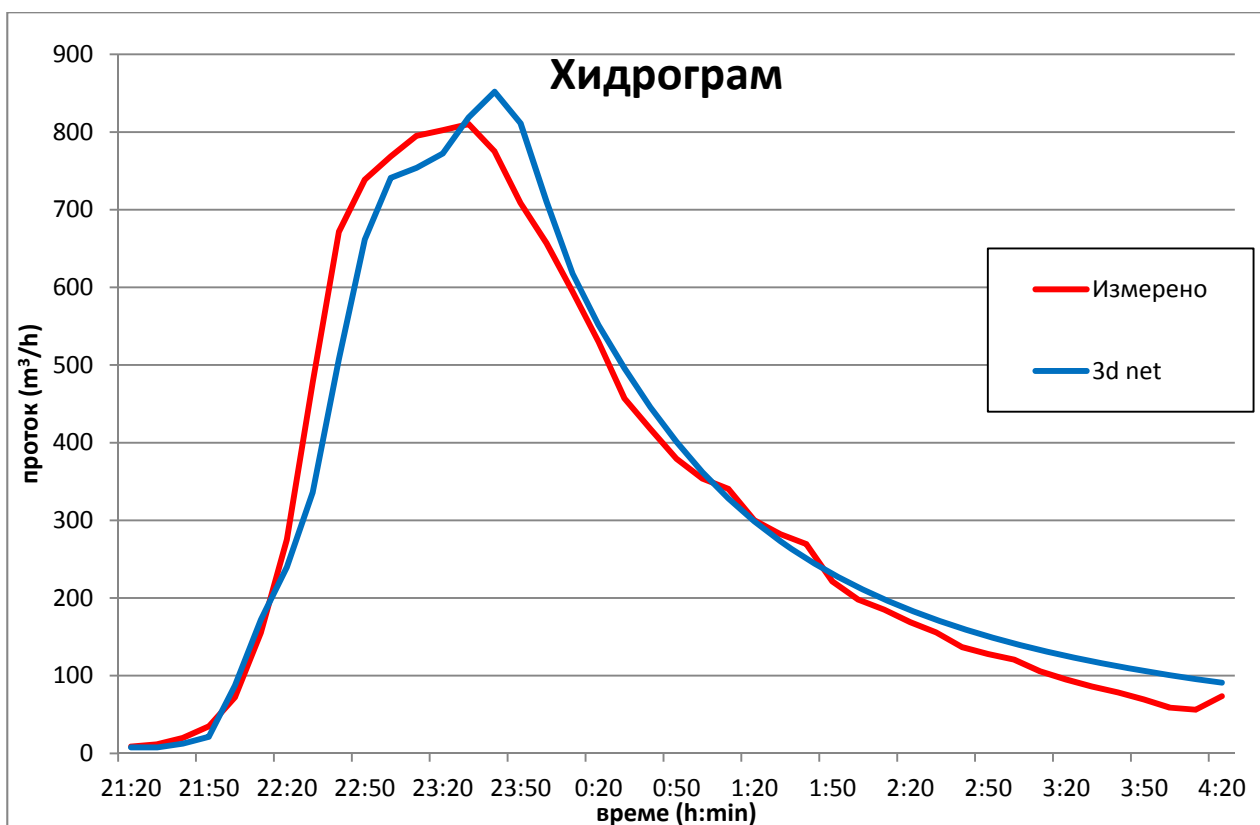
Табела 8: Усвојене вредности параметара математичког модела

Симулација кишне епизоде од 03.05.2012. је дала хидрограм приказан на слици 50 и запремину отекле воде приказану на слици 49.



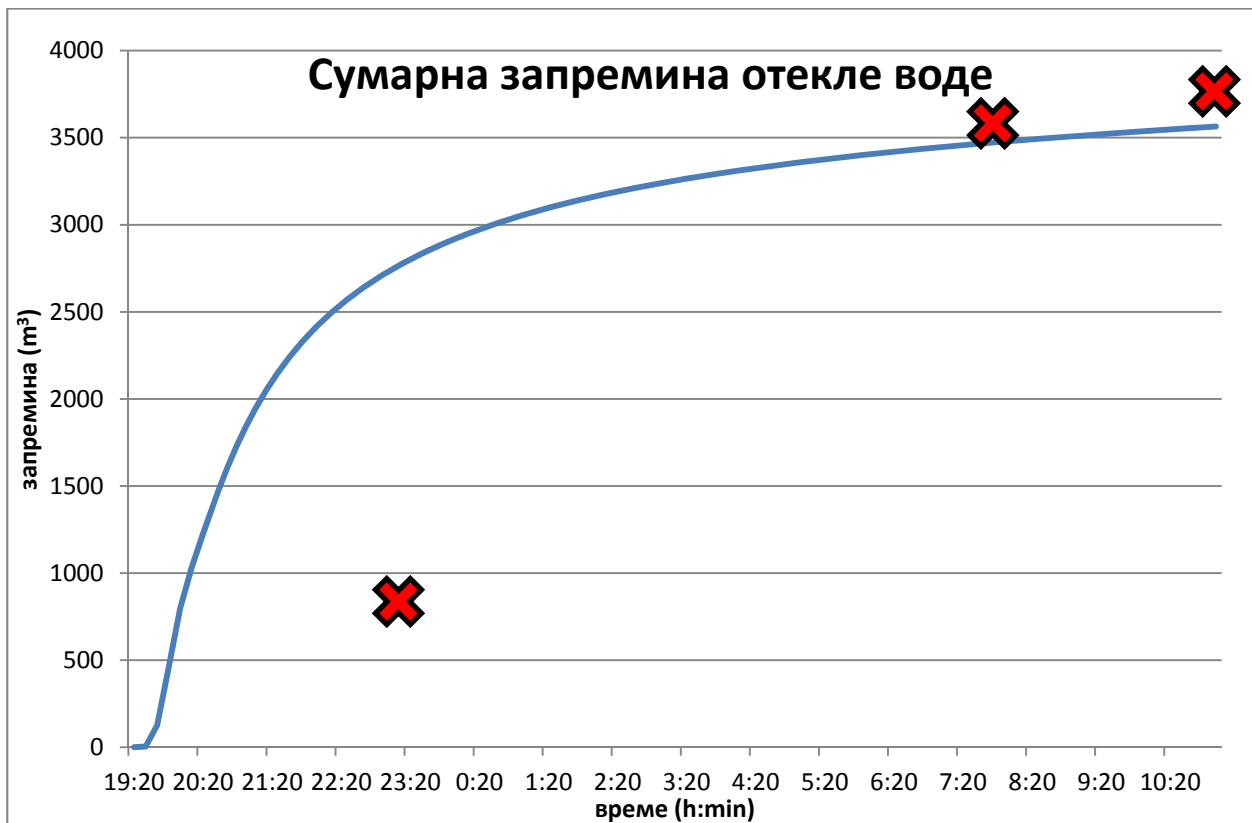


Слика 49: Резултати симулације за кишну епизоду од 03.05.2012.



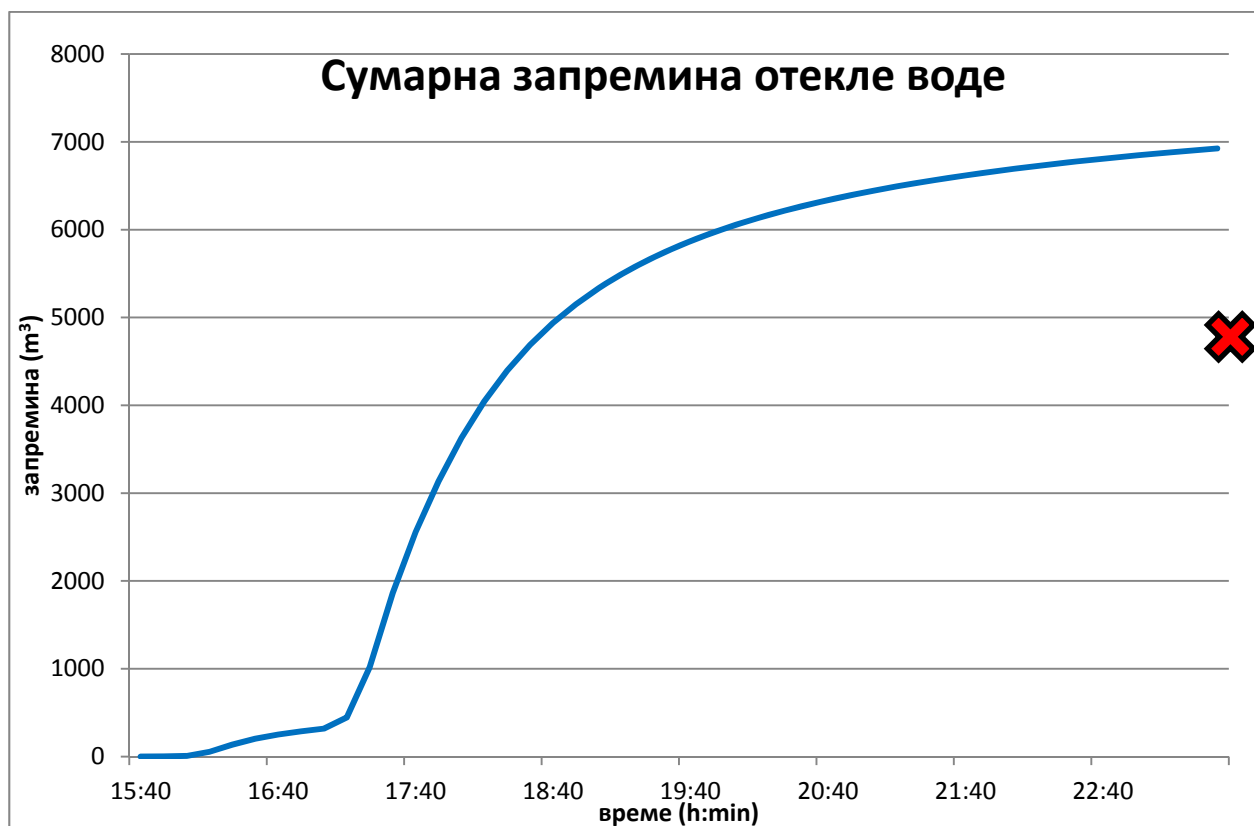
Слика 50: Резултати симулације за кишну епизоду од 03.05.2012.

На слици 51 се могу видети резултати симулације за кишу од 28.06.2010. Црвеним крстићима су означене измерене вредности, а плавим линијама резултати добијени прорачуном у програму 3DNet.



Слика 51: Резултати симулације за кишну епизоду од 28.06.2010.

Резултати за кишну епизоду од 16.08.2010. су приказани на слици 52.



Слика 52: Резултати симулације за кишну епизоду од 16.08.2010.

У табели 9 су приказани резултати за све три кишне епизоде.

Кишна епизода	03.05.2012.	28.06.2010.	16.08.2010.
Измерена количина отекле воде	2247 m <sup>3</sup>	3744 m <sup>3</sup>	4709 m <sup>3</sup>
Количина отекле воде у моделу	2304 m <sup>3</sup>	3564 m <sup>3</sup>	6925 m <sup>3</sup>
Разлика у отеклим запреминама	57 m <sup>3</sup>	180 m <sup>3</sup>	2216 m <sup>3</sup>
Разлика у отеклим запреминама	3 %	5 %	47 %
Коефицијент отицаја	0,35	0,39	0,36

Табела 9: Резултати симулација модела са наменом површина

За обе меродавне кишне епизоде је постигнута велика тачност у добијеним вредностима запремина отекле воде. Излазне вредности кишне епизоде од 03.05. су веома верно репродуковане и у излазном хидрограму, а нарочито на кривој која описује запремину отекле воде са слива. Симулација друге кишне епизоде такође има висок степен поклапања отекле запремине воде, иако се код ње ради о симулацији која има скоро дупло дуже време трајања у односу на претходну.

## Коментар резултата

У табели 10 су упоредно наведени резултати добијени у симулацијама.

Модел	Infoworks CS	3DNet - 1 тип з.	3DNet - 5 типова з.
Разлика у запр. за 03.05.2012.	8 %	6 %	3 %
Разлика у запр. за 28.06.2010.	75 %	15 %	5 %

Табела 10: Упоредни приказ резултата симулације

Разлике су највеће у некалибрисаном моделу, а најмање у моделу са наменама површина. Разлика између симулације направљене у програму Infoworks CS и 3DNet са једним типом земљишта је у времену које је потрошено на калибрацију система, броју параметара који су укључени у симулацију и примењеном математичком моделу, што је све у збиру, на крају, дало велику разлику у крајњим резултатима. Разлика између модела направљених у 3DNet-у је у количини података који су убачени у модел и коефицијентима трења површина. У моделу са више типова земљишта је терен приказан реалније, па је и отицај са њега могао бити представљен на начин који више одговара ситуацији у природи, а самим тим је симулација модела дала резултате који су приближнији измереним вредностима.

Када се више времена посвети калибрацији модела, укључи већи број релевантних параметара и модел представи онолико детаљно колико је то потребно за разматрани ниво (слив једне црпне станице и слив једне реке захтевају различите податке и ниво детаљности), модел може да пружи прецизан увид у функционисање система у природи и да податке о очекиваним излазима из система у постављеним условима.

# Закључак

## Опште

Математички модел пружа увид у функционисање физичког система и његове реакције на различите ситуације којима може бити изложен у току експлоатације. Уколико је модел добро калибрисан, излазне вредности симулације пружају податке о вредностима које ће се, уз мања или већа одступања, заиста јавити у природи, уколико се остваре услови који су убачени као улазни подаци симулације. У овом раду је описан процес прикупљања података, њихове обраде и калибрације математичког модела.

Извршена су мерења на терену и прикупљени су подаци о падавинама и раду пумпи у црпној станици. Подаци су обрађени на начин који је омогућио да се искористе у калибрацији и верификацији модела канализације. Направљен је и калибрисан модел кишне канализационе мреже, коришћењем два различита приступа.

У калибрисаним математичким моделима постигнуто је добро слагање са физичким системом. Калибрисани модели пружају довољно добре реакције модела на кише са којима су били тестирани. Модел, у коме је слив најдетаљније описан и који је садржао највише података, је показао најбоље поклапање са измереним вредностима.

## Предлог даљих радова

Два разматрана софтверска пакета за моделирање канализационих система, који су више пута проверени у пракси, показали су значајне разлике у резултатима. Разлике у добијеним резултатима између два програма јавиле су се јер један модел није калибрисан. Сигурно је да је и у програму Infoworks CS могуће калибрисати модел тако да релативно верно опонаша физички систем и било би веома занимљиво упоредити вредности параметара коришћених у симулацији, у моделу који је калибрисан прво у једном, а затим и у другом програму. Тада би било могуће дати коментар о разликама које настају услед коришћења различитих математичких модела за рачунање отицаја, који сада није могуће изнети.



## Литература

Иветић, М. (1996), Рачунска хидраулика – Течење у цевима, Грађевински факултет Универзитета у Београду.

Иветић, М. (2000), Рачунска хидраулика – Отворени токови, Грађевински факултет Универзитета у Београду.

Максимовић, Ч. (1993), Мерења у хидротехници, Грађевински факултет Универзитета у Београду.

Продановић, Д. (2007.), Механика Флуида, Грађевински факултет Универзитета у Београду.

Радојковић, М, Обрадовић, Д, Максимовић, Ч. (1989), Рачунари у комуналној хидротехници, ИРО „Грађевинска књига“.

