

Универзитет у Београду
Грађевински факултет



Дипломски задатак
Мерења у хидротехници

Моделирање и зонирање дела градске
водоводне мреже

Кандидат:
Милан Петровић 183/04

Ментор:
др Душан Продановић

Садржај

Увод.....	3
Математички модел.....	3
Методологија	4
Одабрани програмски пакет	4
Елементи мреже	4
Издајање дела мреже треће зоне водоводне мреже београдског водовода.....	6
Гранични услови	10
Мерења на терену.....	11
Одабир локација.....	11
Проблеми.....	12
Резултати	13
Математичко моделирање издвојеног дела мреже треће зоне	16
Подаци о мрежи.....	16
Подаци о граничним условима.....	17
Типови потрошње и њихови дијаграми	17
Калибрација	19
Резултати	22
Зонирање издвојеног дела мреже помоћу математичког модела	25
Одређивање потребних притисака	25
Тренутно стање	27
Издајање одређених зона и њихова регулација.....	27
Резултати	29
Закључак	31
Опште	31
Коментар резултата	31
Предлог даљих мерења	31
Литература	32

Увод

У Београду, на делу водоводне мреже на Звездари, су измерени високи притисци на одређеним локацијама у цевоводу. Измерени притисци су значајно већи од потребних притисака и доводе до честих кварова на мрежи и пуцања цеви. Циљ овог дипломског задатка је предлог решења за измене на мрежи помоћу којих би се регулисао притисак и извршило зонирање мреже.

У изради задатка су коришћена мерења притисака са терена, направљен је и калибрисан математички модел водоводне мреже тренутног стања и осмишљен предлог измена водоводне мреже, са очекиваним резултатима таквог захвата.

Математички модел

Градска водоводна мрежа представља изузетно сложен систем који се састоји од великог броја цеви, затварача, резервоара, пумпних станица и прекидних комора. Цеви су различитих пречника, дужина, старости, направљене од различитих материјала, неуједначених рапавости унутрашњих зидова и предвиђене за различите услове експлоатације. Сви остали елементи мреже такође имају одређен број битних карактеристика по којима се разликују једни од других (нпр. губици енергије на затварачима, висина дизања пумпи, запремина резервоара...). 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, водоводне 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.

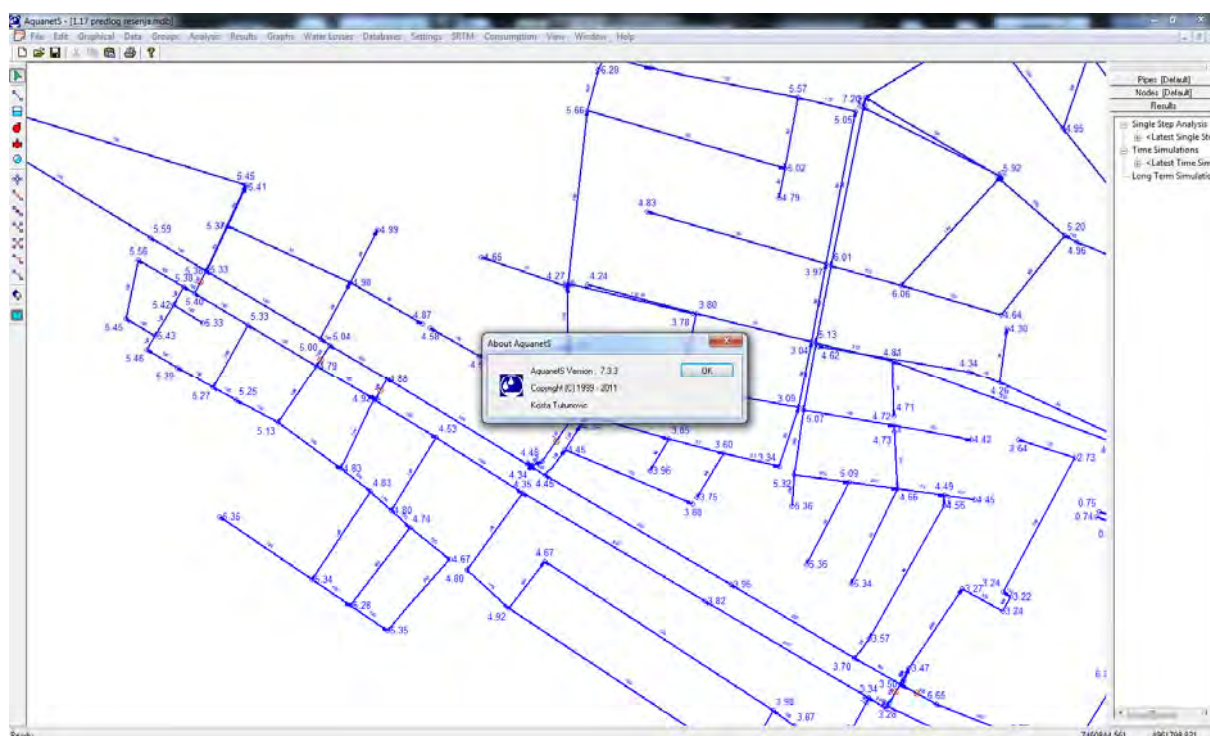
Тakoђе, на водоводни систем су повезани потрошачи са различитим навикама и начинима потрошње, који уносе додатне неодређености јер је тешко одредити тачан број корисника и њихово понашање у току дана. Како су потребе потрошача за водом свакодневне, није пожељно вршити пробе и испитивања на водоводној мрежи, уколико оне могу довести до прекида, или проблема, у редовном снабдевању грађана и индустрије.

Један од прихватљивијих начина за анализу и тестирање је прављење математичког модела водоводне мреже, али не треба заборавити да је математички модел само реплика стварног система која са собом носи одређене неизвесности и ограничења.

Методологија

Одабрани програмски пакет

За израду математичког модела је одабран програм AquanetS. Програм је предвиђен за симулацију течења у затвореним системима под притиском у условима стационарног и благо променљивог режима течења. Овај програмски пакет је одабран због интуитивног корисничког окружења, приказаног на слици 1, и могућности повезивања са другим програмима, тј. лаког увоза и извоза података.



Слика 1: Радно окружење програмског пакета AquanetS

Елементи мреже

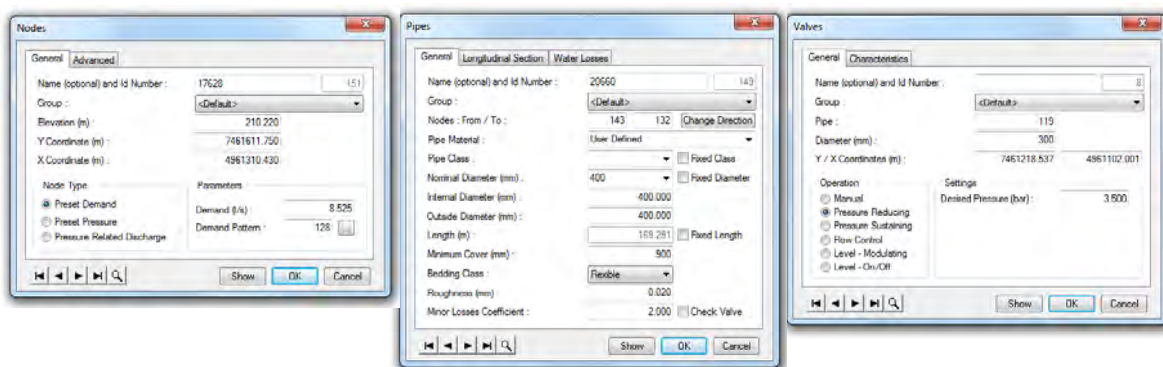
Елементи који су коришћени у моделу су: чворови, цеви, затварачи, пумпе и резервоари.

Чворови се налазе на крајевима цеви, местима укрштања или рачвања цеви, на локацијама где долази до промене пречника цевовода, где постоји чворна потрошња или доток у систем. У моделу су представљени својим координатама (x, y, z), средњом потрошњом и типом потрошње, а пошто се у њима у току симулације рачунају притисци додају се и на местима где је потребна информација о притисцима.

Цеви се налазе између два чвора и описане су дужином, пречником, коефицијентом трења, локалним отпорима дуж деонице и губицима воде.

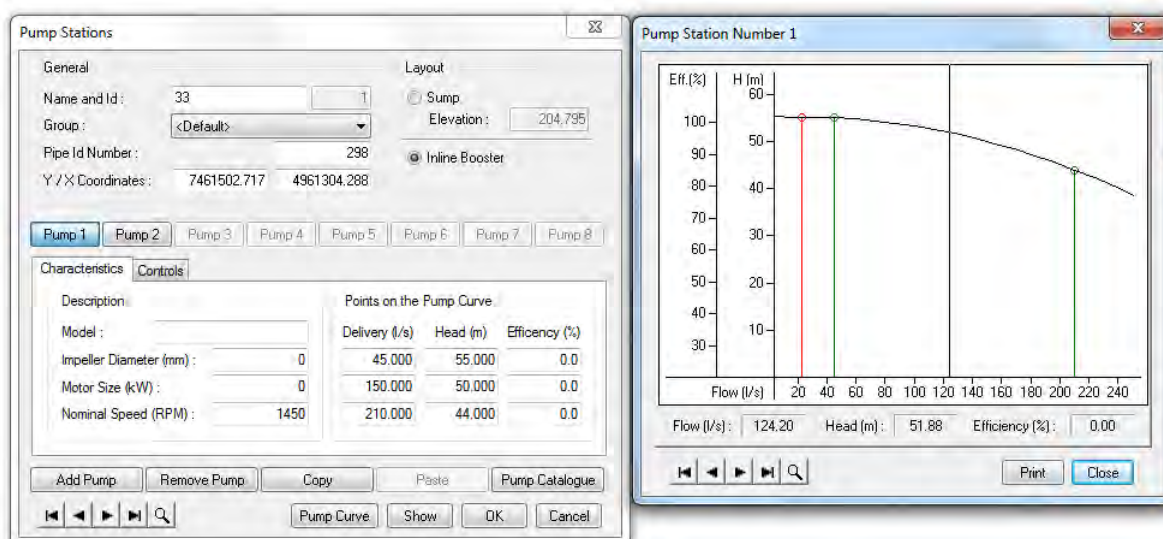
Затварачи производе локалне губитке енергије на цевима где су постављени. У моделу разматраног дела водоводне мреже су коришћене две врсте затварача: обични лептирасти затварачи и затварачи који одржавају константним низводни притисак. Код обичног лептирастог затварача се задаје његово тренутно стање у процентима отворености као и зависност отворености затварача и протока кроз њега, као и коефицијент губитака при потпуно отвореном затварачу. Код другог типа се задаје само жељени низводни притисак, који не може бити већи од узводног притиска. Задати притисак одржавају константним, у току симулације, прилагођавањем према узводном притиску и променом степена отворености.

На слици 2 је приказано подешавање најбитнијих карактеристика чворова, цеви и затварача.



Слика 2: Подешавање елемената мреже

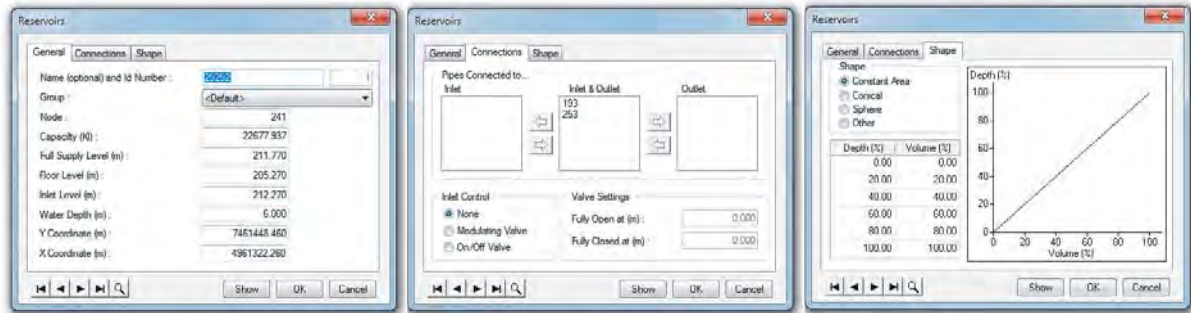
Коришћене су потисне пумпе на цевоводима, до којих вода долази слободним падом из оближњих резервоара. Пумпе су описане кривама зависности протока и висине дизања, као и номиналном брзином окретања, као што је приказано на слици 3.



Слика 3: Карактеристике пумпне станице и појединачних пумпи

Резервоари се користе за изравнање неравномерности протока. Они се постављају на местима постојећих чворова мреже и са остатком модела се повезују цевима. У формираном моделу вода слободно дотиче и истиче из резервоара, без регулације протока. Карактеристике резервоара су облик, висина, капацитет, коте довода и одвода и почетна дубина воде, а начин њиховог дефинисања је приказан на слици

4.

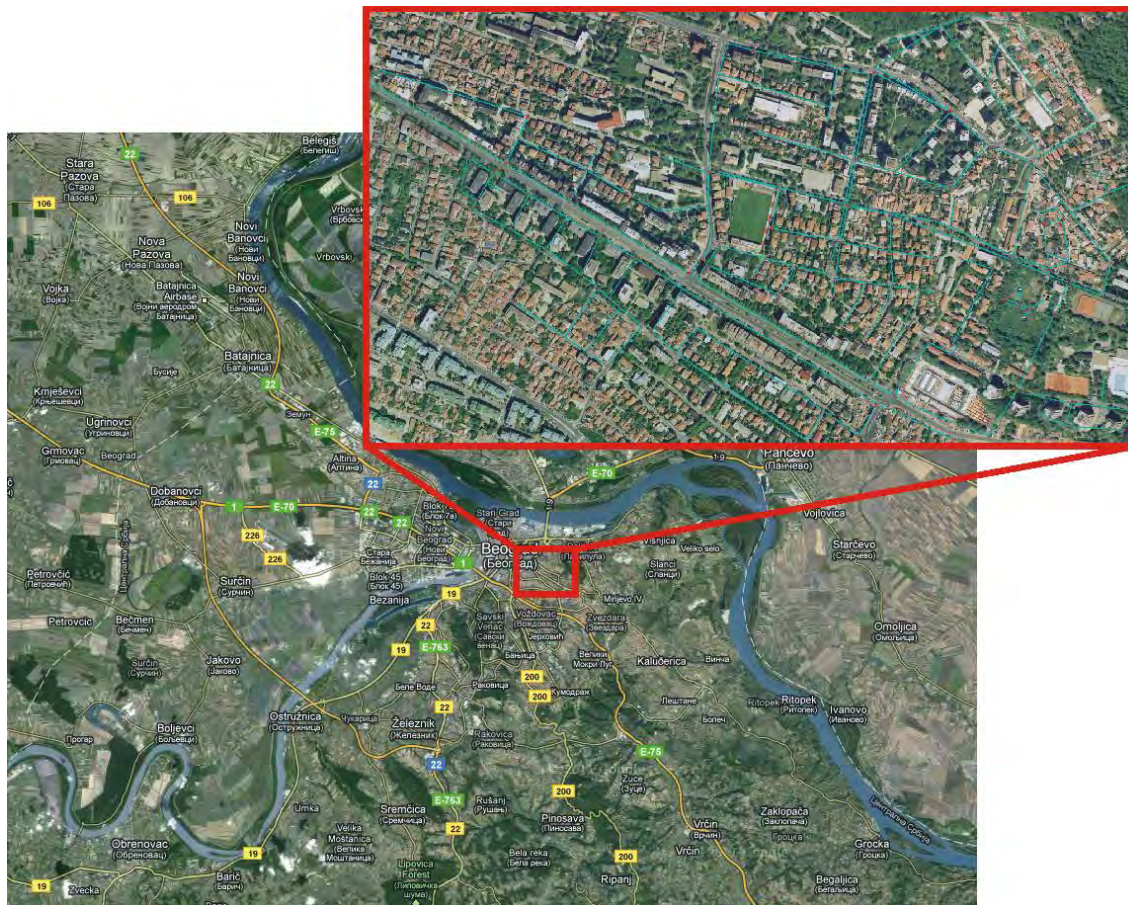


Слика 4: Карактеристике резервоара

Издавање дела мреже треће зоне водоводне мреже београдског водовода

Из модела целине, модела целог београдског водовода и његових изворишта, издвојен је део водоводне мреже на Звездари који је потребно регулисати (слика 5), а његове везе са остатком модела су представљене граничним

УСЛОВИМА.



Слика 5: Издвајање дела водоводне мреже

Важно је напоменути да поузданост коришћених података није иста за све елементе па су чворови прецизно одређени са координатама и висинама, што се потврдило када је мрежа модела преклопљена са геореференцираним ортофото снимцима тог дела града и провером висина одређених тачака коришћењем Google Earth сервиса. Надморска висинатачака у моделу се креће од 156,54мнм до 218,34мнм. Међутим, није познато колико су поуздане информације о чворним потрошњама.

Водоводна мрежа дуж булевару Краља Александра је релативно скоро обновљена, па се може веровати подацима о пречницима цеви. У околним улицама се углавном налази стара мрежа чије чворне везе и пречнике не можемо прихватити са 100%-тном сигурношћу. Локални губици на цевима и коефицијенти трења су одређени искуствено, што уноси одређену несигурност у прорачун. Губици воде у моделу су непознати, а претпоставља се да постоје знатни губици у делу са старијом инфраструктуром, услед дотрајалих цеви и високих притисака у њима, као и великог броја прикључака, који представљају најрањивија места у систему.

Модел се састоји од цеви различитих пречника и покрива мале пречнике цеви које воде до кућних прикључака, па све до главних цевовода, пречника 700мм.

Укупна дужина водоводне мреже је 18.285 метара, а највећи део чине цеви пречника 150мм и 100мм.

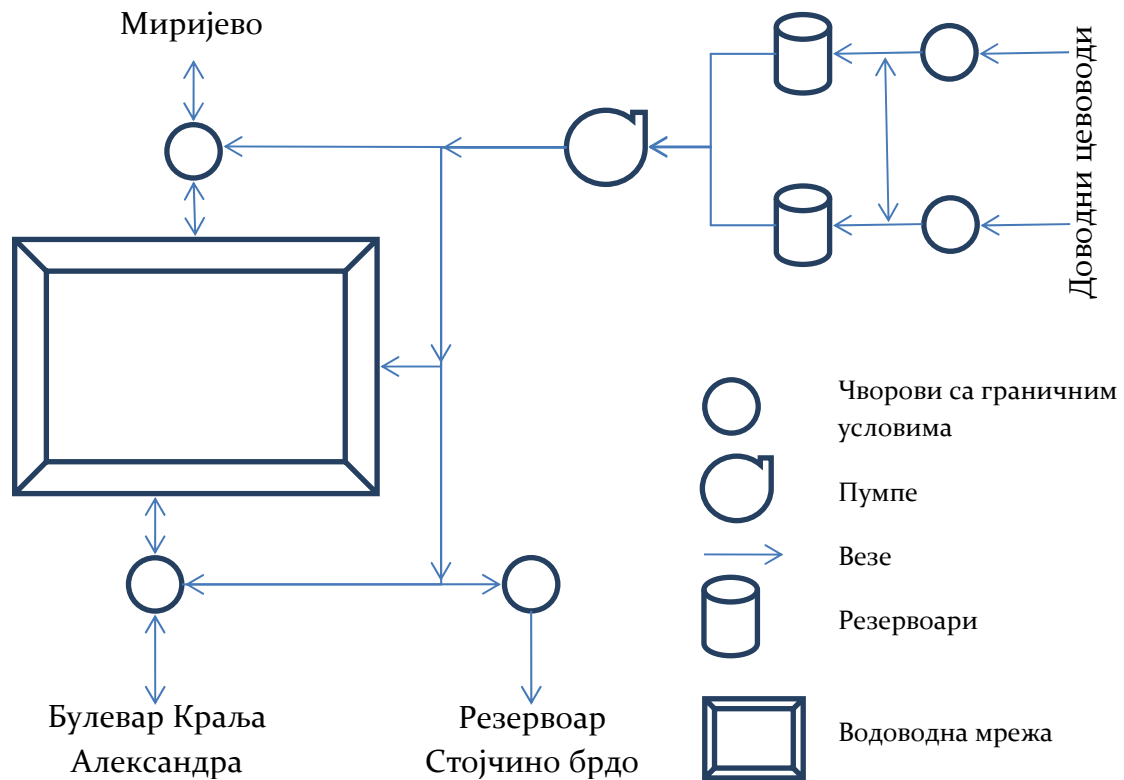
У моделу се налазе 2 резервоара идентичне запремине од 22.678м³, максималне дубине воде 6.5м. Запремине резервоара и висина на којој се налази улазна, тј. излазна цев су подаци који се могу сматрати сигурним, јер се не мењају у току експлоатације, за разлику од коефицијента трења у цевима који је променљив.

Протоци на местима прекида модела су потпуна непознаница и о њима нема мерених вредности, па је велико питање да ли се унесене вредности поклапају са стварним.

У црпној станици постоје три пумпе. Једна пумпа константно ради, друга представља резерву, а трећа се пали свакога дана по потреби, између 8 и 10 часова, и гаси око 23 часа када су мање потребе за водом. Ове законитости се понављају свакога дана, са малим одступањем у времену паљења и гашења једне пумпе. Све 3 пумпе су истих карактеристика, које су приказане на слици 3.

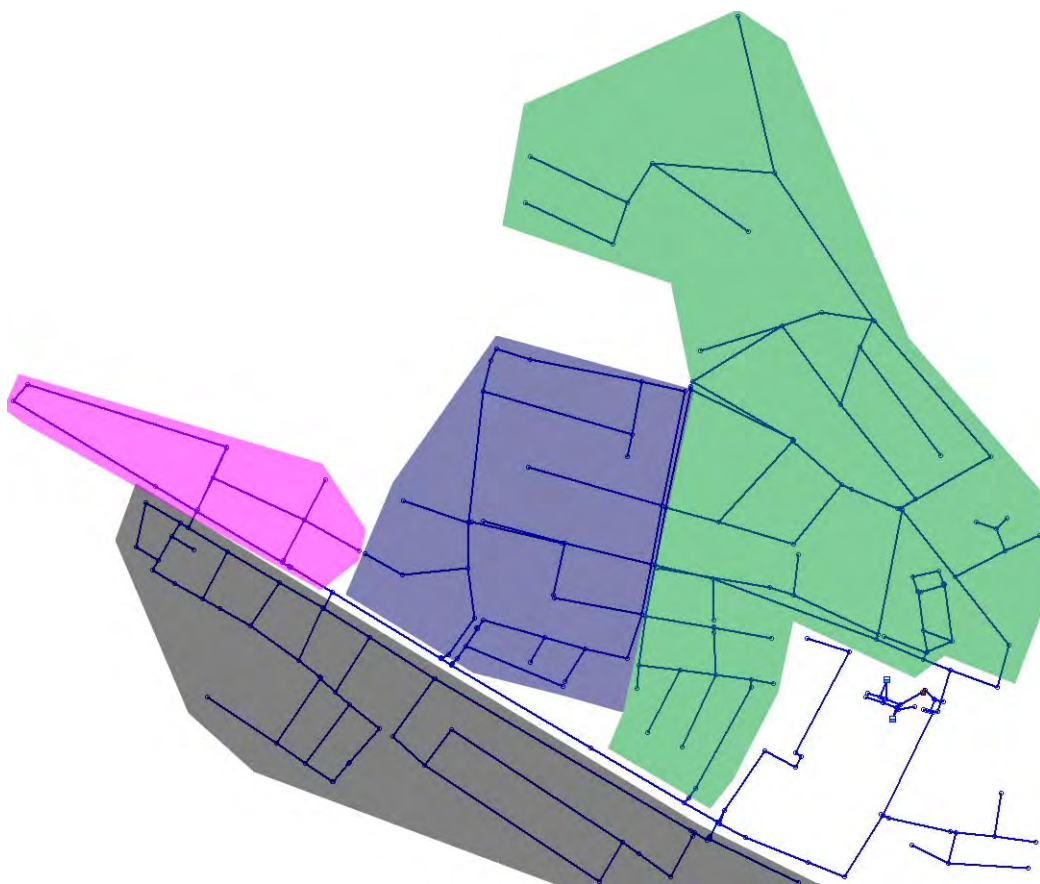
На одређеним деловима водоводне мреже, на којима су примећени високи притисци, уочена су критична места која је потребно испитати и њихове везе са остатком мреже. Ти делови су са припадајућим цевима издвојени, одређено је одакле се снабдевају водом и који цевоводи су повезани са припадајућом пумпном станицом. Уочена су места на којима је било могуће раскинути везе са остатком модела (моделом целине), јер је тако добијена мрежа омогућавала формирање знатно мањег модела са којим је лакше радити. Из модела су искључени делови који нису утицали на резултате и беспотребно би компликовали прорачун.

У тако издвојеном моделу су постојала два места са дотицајем ка пумпној станици и три места где су везе раскинуте, после пумпне станице. На тим местима су постављене вредности процењеног дотицаја/отицаја из мреже. На слици 6 је приказана упрошћена шема издвојене водоводне мреже и њене везе са остатком модела.



Слика 6: Шема водоводне мреже

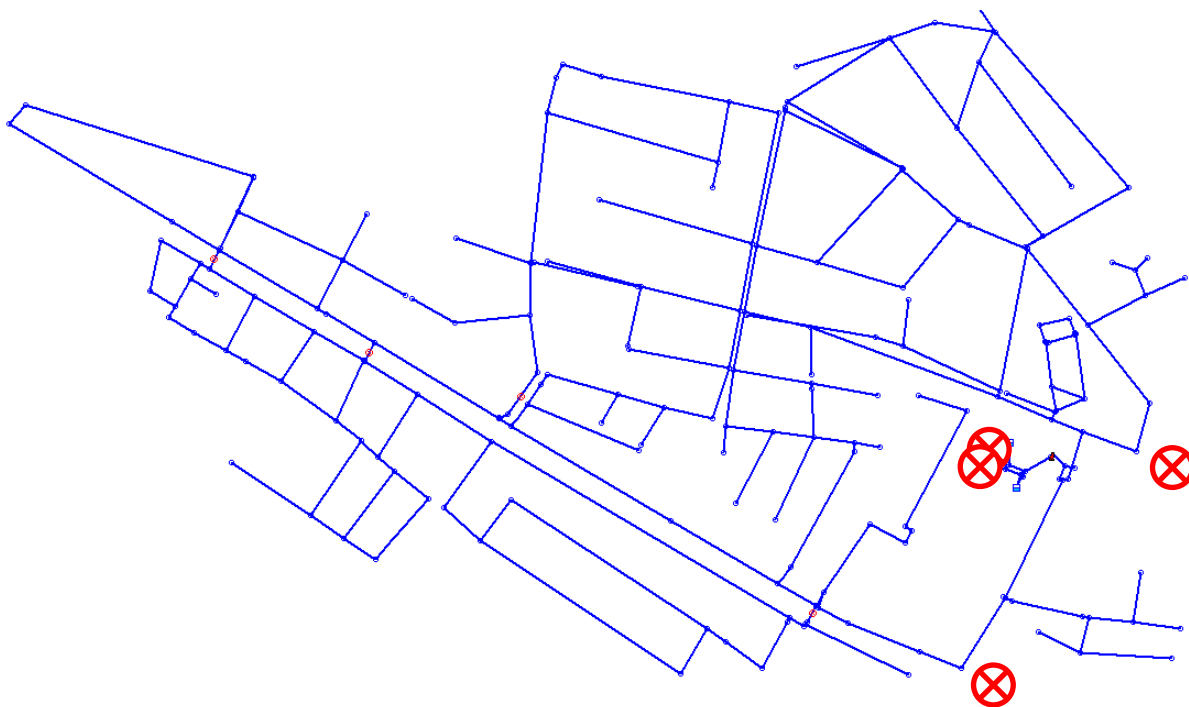
Примећено је да се модел може поделити на неколико издвојених целина, тј. зона, које је могуће појединачно мењати без значајних утицаја на остатак модела. Уочене зоне су приказане на слици 7.



Слика 7: Издвојене целине

Гранични услови

Гранични услови се јављају на свим местима где је мрежа пресечена и одвојена од модела целине. Гранични услови су били постављени на 5 чворова у моделу, на локацијама обележеним на слици 8.



Слика 8: Места на којима су раскинуте везе са моделом целине

У овом синтетском задатку су коришћена 2 типа граничних услова: доток у систем и отицај из њега. Доток је урађен задавањем негативне потрошње у чворовима на крајевима доводних цевовода. Отицај је урађен аналогно дотицају, постављањем позитивних вредности потрошње у чворовима на крајевима цевовода, где су раскинуте везе са остатком модела.

Мерења на терену

Одабир локација

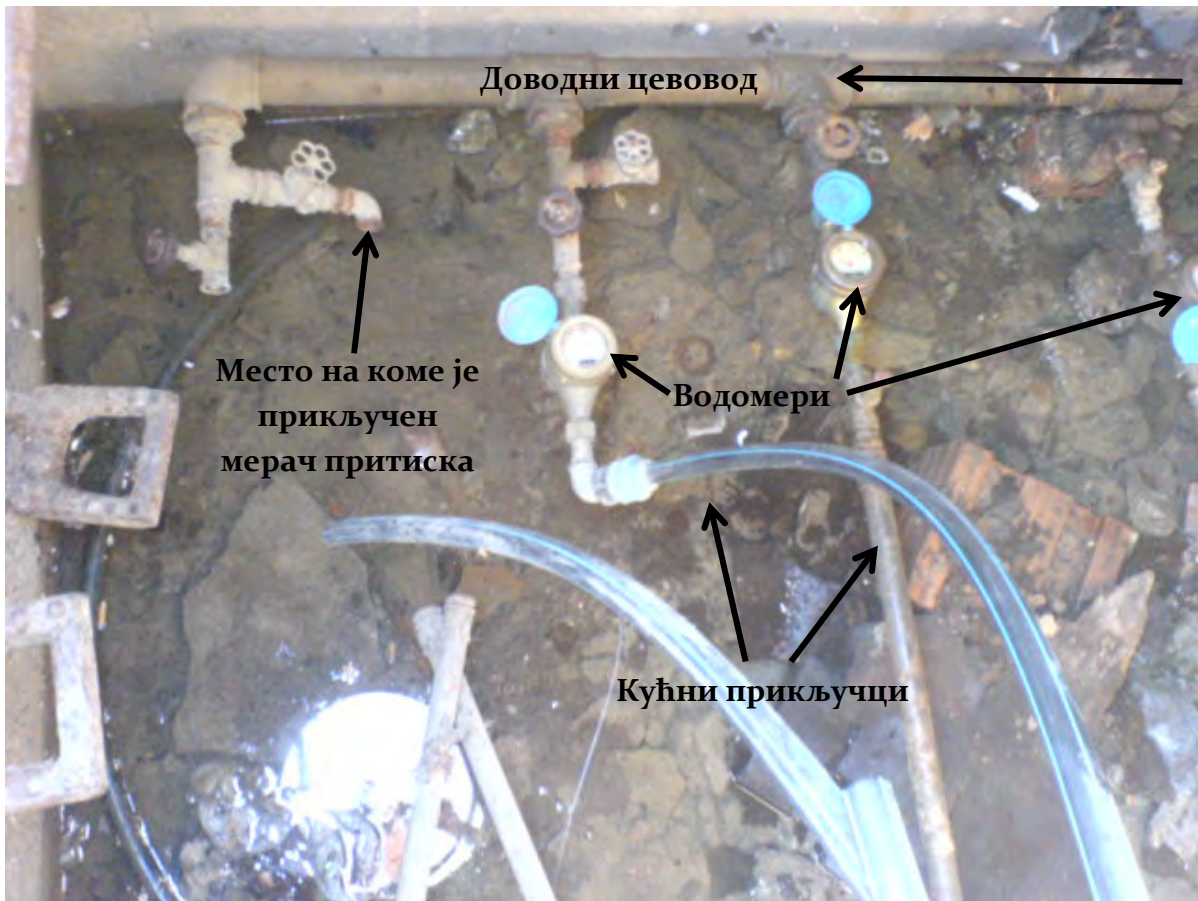
Проучавањем водоводне мреже, топографије терена, претходних мерења притисака на том подручју и резултата већ постојећег некалибрисаног модела, одабрано је 6 локација на којима ће бити постављени уређаји за континуално мерење притисака, које су приказане на слици 9.



Слика 9: Одабране локације и локације на којима је стварно постављена мерна опрема

Локација 1 је одабрана као место са најнижом надморском висином, па се очекивало да ће на том месту бити достигнути највећи притисци у мрежи. Локације 2, 3 и 4 су представљале контролне тачке за припадајуће зоне, на основу којих ће се проверавати тачност модела у тим зонама. Локације 5 и 6 пружају податке о вредностима притисака на местима која су блиска пумпној станици, а заједно са тачком 4 дају увид у промену притиска дуж цеви, на основу кога се могу одредити успутни губици и потрошња.

Мерачи притиска су постављени у шахтовима, на цевоводима, пре или после потрошача, у зависности од услова на мерним местима. Изглед и услови на мерном месту у булевару Краља Александра, у шахту испред зграде број 251, се могу видети на слици 10.



Слика 10: Мерно место булевар Краља Александра 251

Проблеми

Није било могуће поставити мерну опрему на свим првобитно одабраним местима, услед различитих проблема. Неки од њих су:

- Велика удаљеност шахтова од циљаних локација
- Затрпани или заварени шахтови
- Потопљени шахтови
- Недостатак прикључака на цевима (слика 11)
- Небезбедни услови за остављање опреме



Слика 11: Места на којима није било могуће поставити опрему

Неки од наведених проблема су се јавили на 4, од 6 предвиђених локација, и у тим случајевима су мерачи постављени на местима где је било услова за то, у околини претходно изабраних локација.

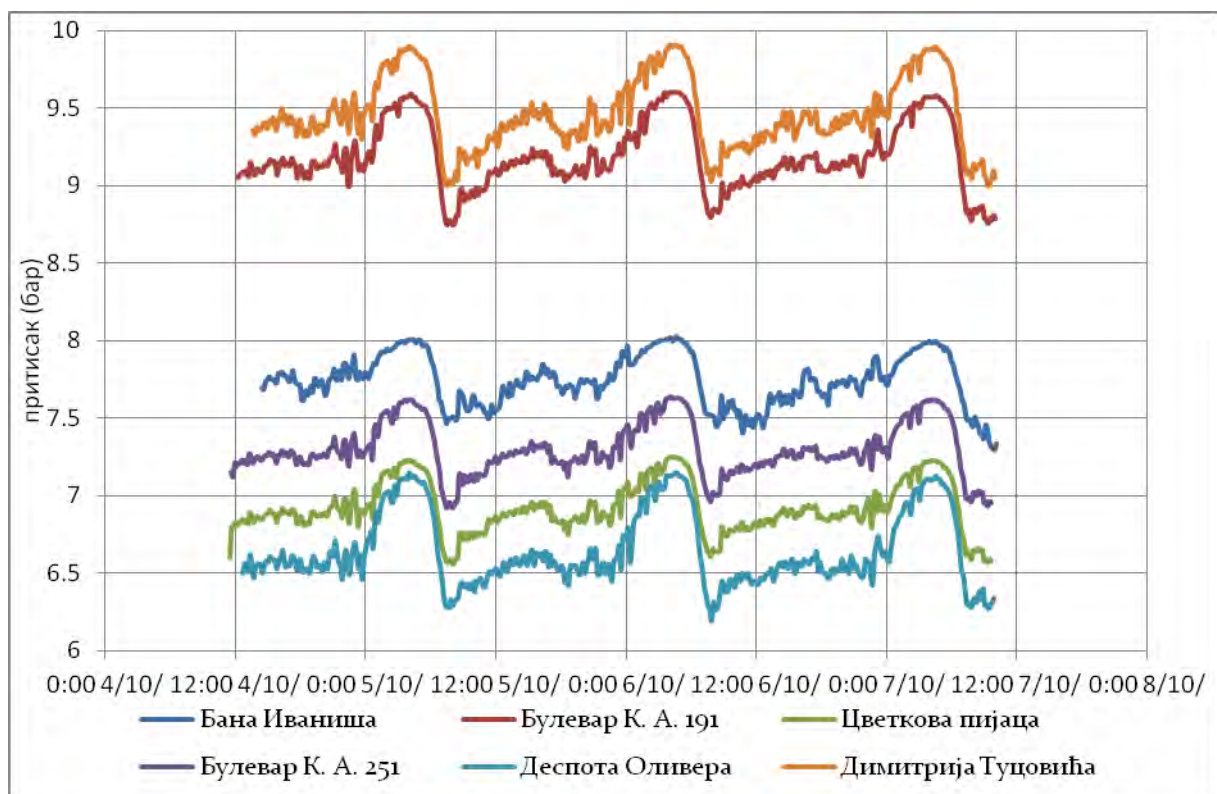
Резултати

Логери су намештени да снимају резултате на сваких 10 минута. Постављени су 4.10, а скинути са мреже 7.10.2011. Снимљена је потрошња радним данима (уторак-петак). За време мерења су временски услови били слични, без кише, са минималним дневним температурама 10-13 °С и максималним температурама 26-28 °С.



Слика 12: Коришћена опрема за снимање вредности притисака - логер

Као резултати мерења, добијени су дијаграми притисака са 6 мерних места.

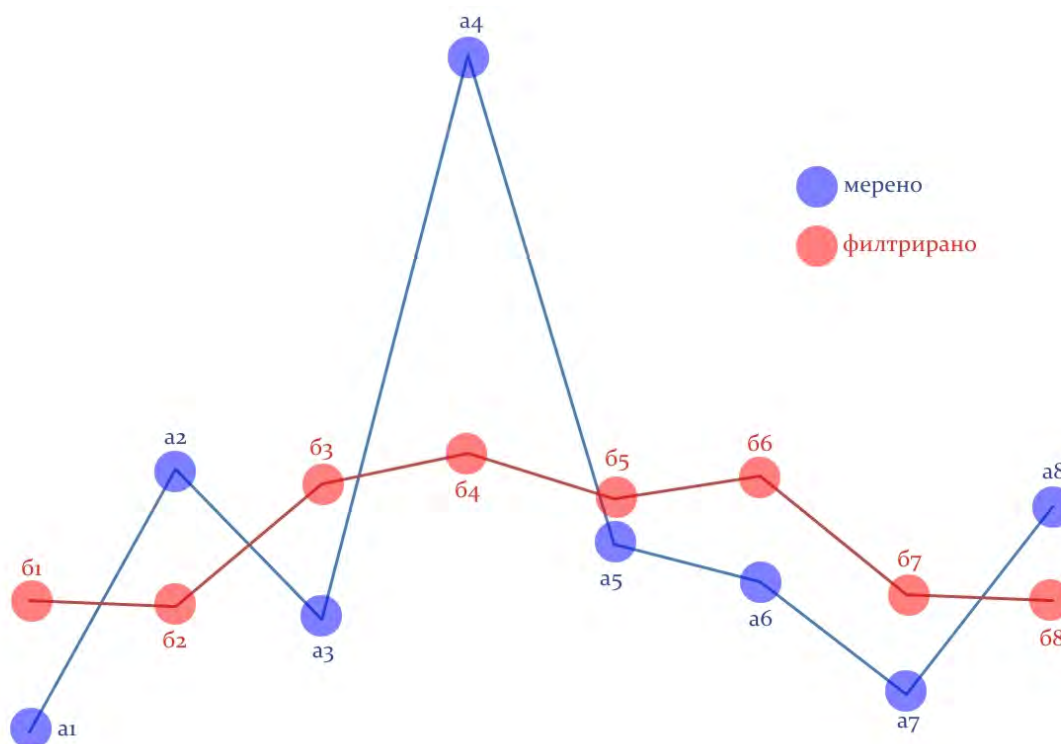


Слика 13: Измерени притисци

Као што се може приметити са дијаграма, криве притисака су међусобно скоро паралелне. Највеће разлике између њих се јављају као последица разлике у геодетским висинама, а мање услед потрошње воде. Криве нису глатке, већ је видљиво присуство шума. Део шума се односи и на повремену пад притиска услед повећања потрошње воде оближњих потрошача.

Због даље анализе измерени резултати су филтрирани и добијени су нови дијаграми промене притиска са устаљенијим променама и лакше уочљивијим трендовима. На добијене вредности мерења је примењен „moving average“ филтер 5. степена, сем на прва и последња 2 мерења у серији. На првом и последњем је коришћена средња вредност два суседна мерења, а на 2. и претпоследњем „moving average“ 3. степена. На појединим местима су вредности имале екстремна одступања (грубе грешке) и у таквим случајевима су резултати ручно мењани.

На слици 14 је дат пример низа случајних вредности и резултата који се добијају после примене наведеног филтера на такву серију података.



Слика 14: Пример коришћења „moving average“ филтера, на низу случајних вредности

За тачку b_1 би се користила формула:
$$\bar{b}_1 = \frac{a_1 + a_2}{2}$$

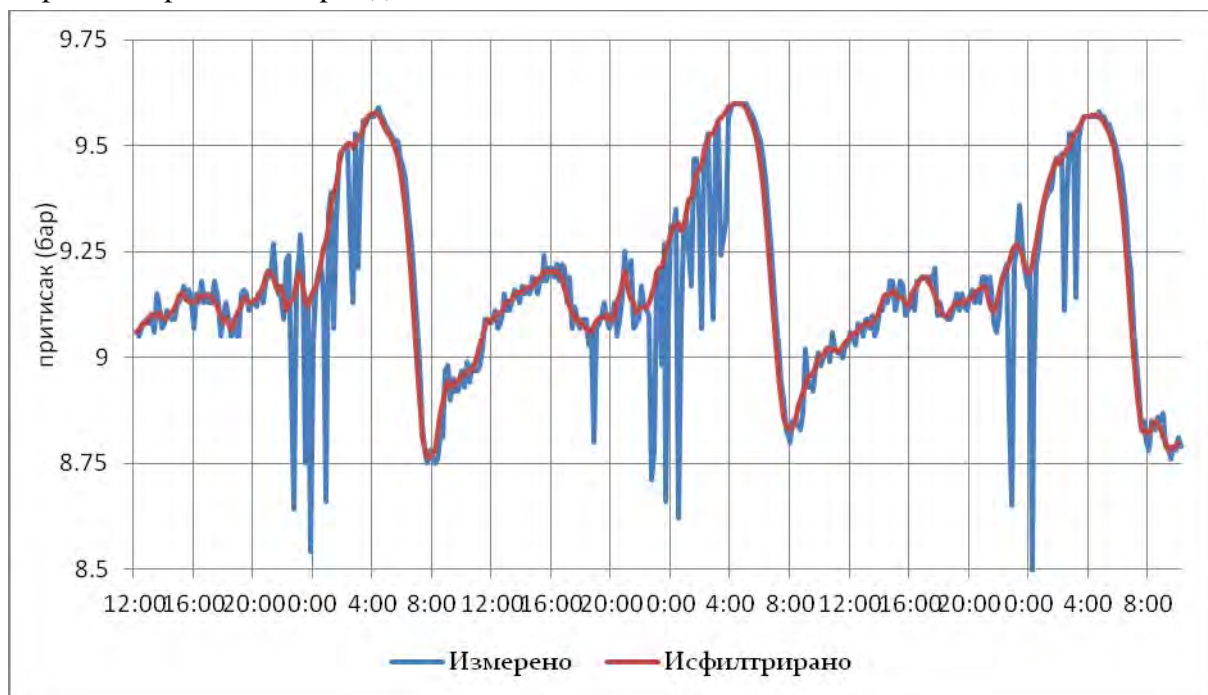
За тачку b_2 би се користила формула:
$$\bar{b}_2 = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{3}$$

За тачке $b_3 - b_6$ би се користила формула:
$$\bar{b}_n = \frac{a_{n-2} + a_{n-1} + a_n + a_{n+1} + a_{n+2}}{5}$$

За тачку b_7 би се користила формула: $b_7 = \frac{a6 + a7 + a8}{3}$.

За тачку b_8 би се користила формула: $b_8 = \frac{a1 + a2}{2}$.

На слици 15 су приказани резултати мерења са једног места, пре и после филтрирања. Исфилтрирани резултати су пружили јаснији увид у дневне неравномерности и трендове.



Слика 15: Подаци са мерног места у Булевару Краља Александра 191, пре и после филтрирања

На свим мерним местима постоје велике осцилације притиска у току дана. У свим временским тренуцима су вредности притисака високе и знатно веће од стварно потребних притисака. Сва мерења следе иста правила, са максималним притисцима у току ноћи, минималним у јутарњим часовима и даљим благим растом притиска преко дана. Максималне вредности притисака су забележене на очекиваном месту, на најнижој мереној висинској коти, која је на слици 9 означена бројем 1.

Минимална забележена вредност притиска је износила 6,26 бар-а, а максимална 9,91 бар-а.

Математичко моделирање издвојеног дела мреже треће зоне

Подаци о мрежи

ЈКП БВК је уступио податке о водоводном систему, који се односе на разматрани део мреже.

Модел постојећег стања садржи 213 чворова, 241 цев, 2 резервоара, 4 затварача и 1 пумпну станицу са 2 одвојене пумпе. Део базе података са елементима мреже се може видети на слици 16.

Id	Name	Elevation	Demand	Pattern	XCoord	YCoord
1	15385	168.703	0.000	102	7460430.000	4961463.960
2	15386	169.970	0.330	102	7460440.000	4961441.390
3	15387	170.140	0.000	120	7460446.480	4961426.630
4	15388	171.360	0.330	102	7460511.400	4961401.930
5	15389	168.850	0.300	102	7460407.360	4961569.830
6	15390	168.660	0.330	102	7460413.100	4961545.900
7	15391	168.380	0.175	102	7460427.960	4961513.260
8	15400	168.450	0.000	102	7460395.000	4961533.090
9	15407	168.390	0.330	102	7460477.880	4961510.800
10	15408	174.890	0.330	102	7460553.730	4961465.130
11	15409	173.680	0.330	102	7460317.590	4961428.190
12	15414	168.310	0.000	102	7460375.070	4961456.570
13	15415	168.850	0.165	102	7460433.680	4961572.510
14	15418	168.410	0.000	102	7460456.090	4961619.840
15	15419	168.030	0.165	102	7460476.180	4961664.260
16	15420	168.120	0.330	102	7460343.270	4961516.140
17	15427	175.630	0.168	102	7460868.110	4961406.610
18	15428	182.850	0.165	102	7460870.830	4961523.950
19	15430	178.280	0.086	102	7460853.870	4961555.330
20	15431	182.820	0.132	102	7460974.560	4961523.760

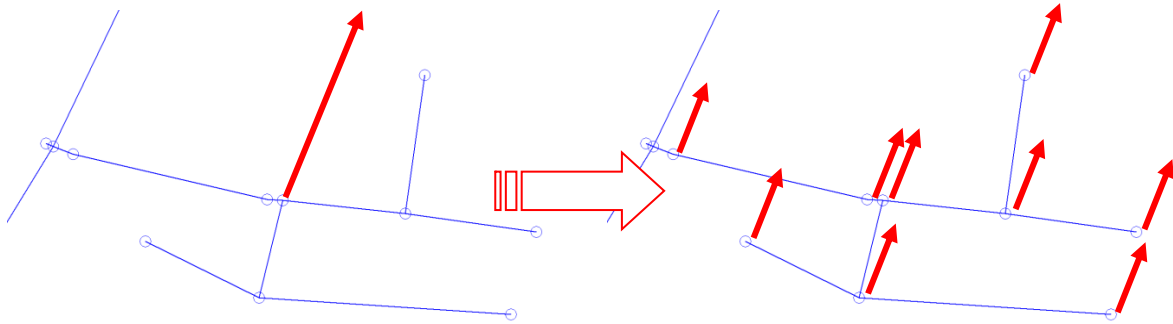
Id	Name	FromNode	ToNode	FromDiameter	PipeLength	Roughness	KLocal
1	18055	4	3	100	52.154	0.020	1.500
2	18056	3	2	100	59.450	0.020	1.500
3	18060	2	1	100	45.980	0.020	0.500
4	18063	7	8	150	37.811	0.020	0.500
5	18067	6	5	150	13.611	0.020	1.500
6	18070	324	85	150	367.381	0.020	3.220
7	18074	10	4	150	76.148	0.020	2.000
8	18075	10	9	150	88.709	0.020	1.500
9	18076	9	6	150	80.807	0.020	1.500
10	18077	8	5	150	22.960	0.020	1.500
11	18078	11	10	150	73.790	0.020	1.000
12	18088	226	12	150	17.468	0.020	0.720
13	18089	12	8	150	40.301	0.020	1.000
14	18089	17	14	80	52.378	0.020	1.000
15	18090	14	15	150	47.836	0.020	1.000
16	18091	16	225	150	65.597	0.020	1.440
17	18095	17	17	80	33.644	0.020	0.500
18	18096	18	50	150	136.845	0.020	1.000
19	18097	18	20	50	124.870	0.020	1.000
20	18098	20	27	30	73.197	0.020	0.600

Слика 16: База података са елементима мреже

Коришћено је 5 различитих граничних услова, на местима прекида мреже.

Већина корисника се снабдева кроз прстенасту мрежу, која омогућава довођење воде са 2 различите стране. На појединим крајевима мрежа се шири у гранатој форми.

Према подацима из БВК, чворне потрошње нису биле равномерно распоређене, већ сконцентрисане на мањи број чворова у моделу. Потрошња за цео квартал је била додељена 1 чвору. Како би се добили услови приближнији реалности, сконцентрисана чворна потрошња је расподељена на околне чворове, као што је приказано на слици 17.

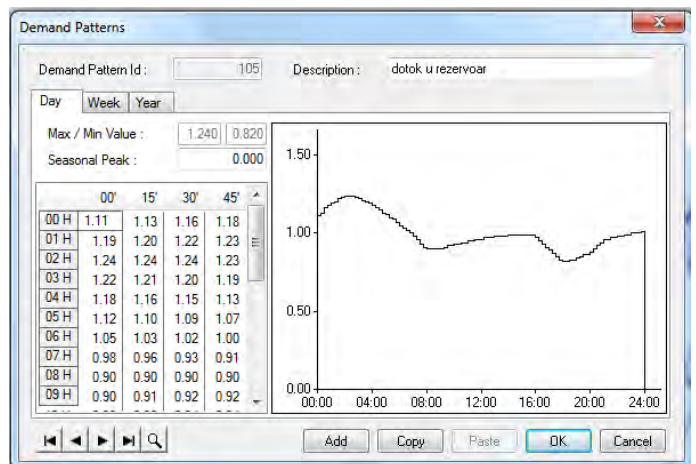


Слика 17: Сконцентрисана и расподељена потрошња

При расподели потрошње се водило рачуна о броју објеката који су прикључени на чвор, као и о њиховој величини. Када су објекти у кварту били сличних димензија и бројности по појединачним чворовима, расподела је вршена равномерно по сваком чвору, што је био најчешћи случај. Чворови који су имали већи број прикључених корисника су односили већи део сконцентрисане потрошње у односу на чворове са мањим бројем потрошача. Објекти који су били веће спратности су сигурно имали већи удео у потрошњи, у односу на објекте мањих габарита, па су њима одговарајући чворови добијали већи удео у расподели потрошње.

Подаци о граничним условима

Протоци воде (дотоци и отицаји) на местима прекида издвојеног дела мреже су добијени из симулације целине водовода израђеног у InfoWorks програмском пакету. Модел целине је формиран у БВК и представља модел примарне мреже водовода. Слика 18 даје увид у дијаграм промене дотока, који је коришћен као гранични услов за доток у резервоаре.

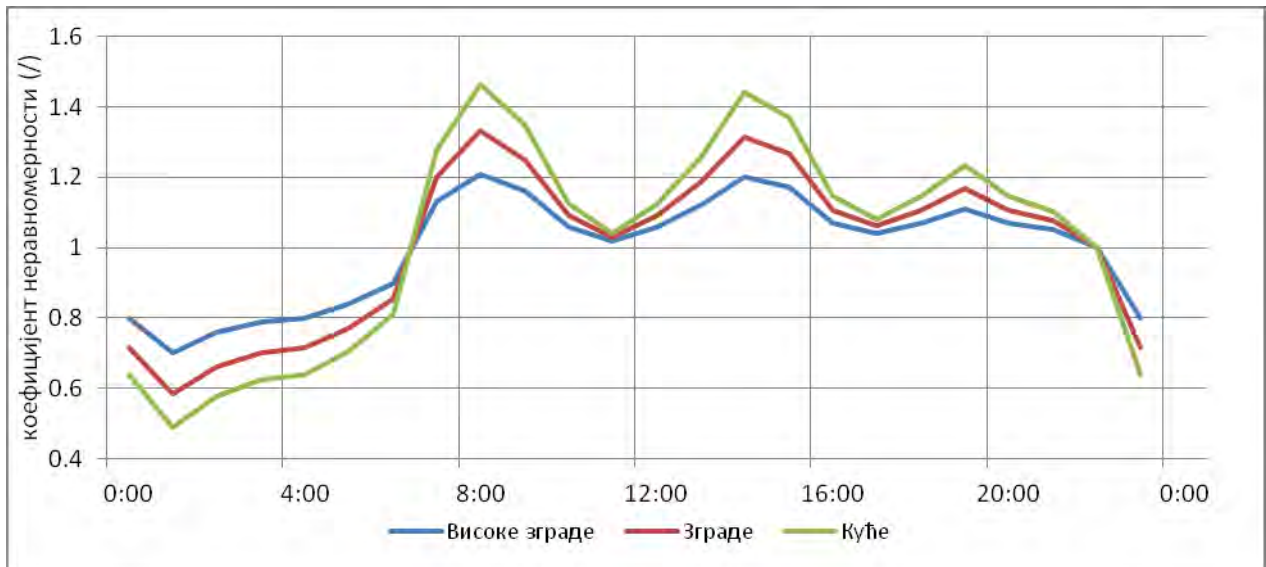


Слика 18: Гранични услов, доток у резервоар

Типови потрошње и њихови дијаграми

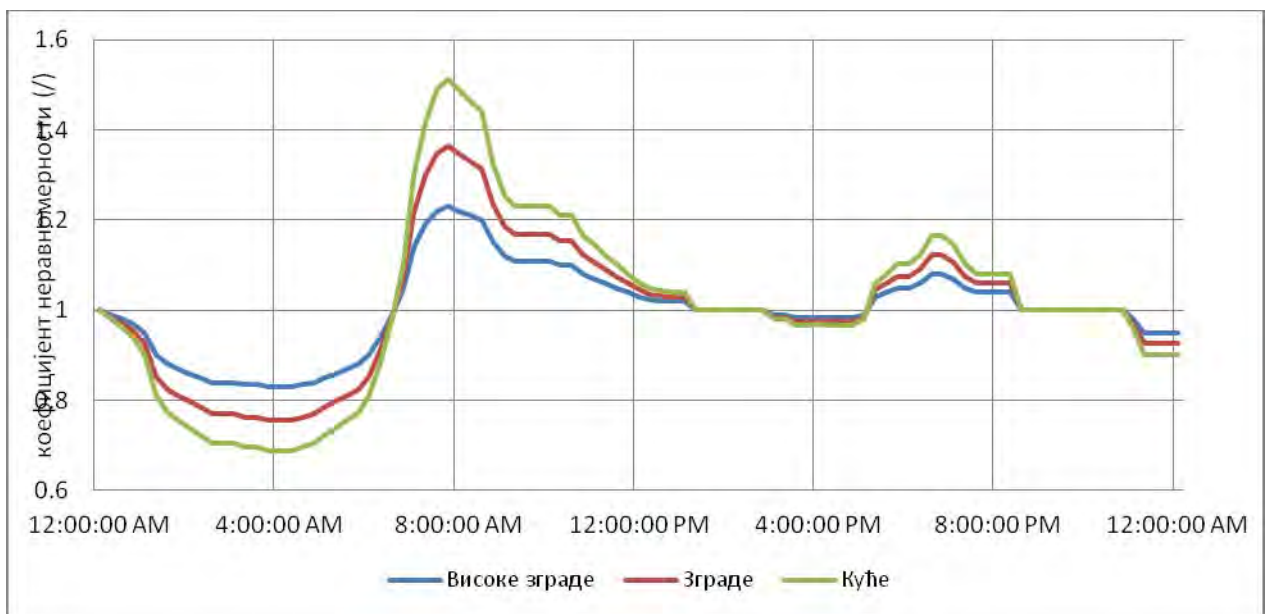
Потрошачи су подељени на 3 типа: високе зграде, зграде и куће. Куће су имале највеће неравномерности у потрошњи, а високе зграде најмање. У моделу су испробана 3 различита дијаграма промене потрошње.

Прва група дијаграма (слика 19) је одређена на основу дијаграма добијеног из водовода, који се користи у њиховом глобалном моделу (моделу целине).



Слика 19: Прва група дијаграма

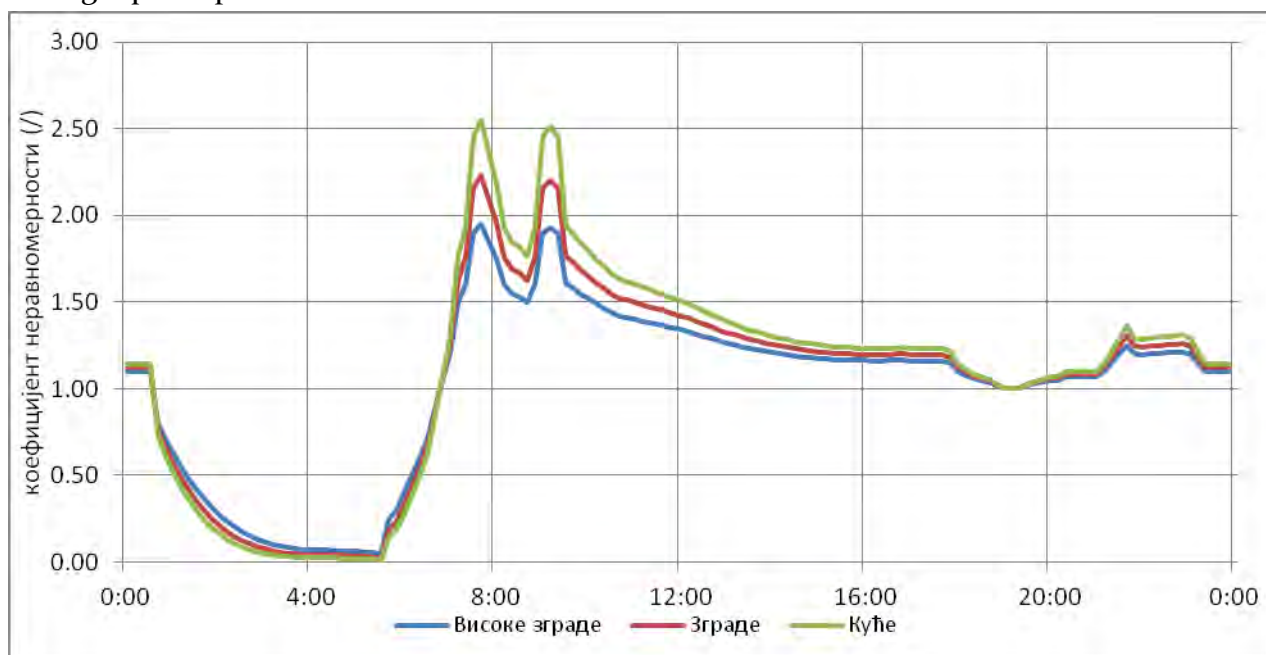
Друга група дијаграма, приказаних на слици 20, је направљена на основу промене притисака кроз време на цеви великог пречника, са мерног места Цветкова пијаца, означеног бројем 5 на слици 9.



Слика 20: Друга група дијаграма

Трећа група дијаграма, који се могу видети на слици 21, је добијена на основу разлике притисака између мерних места која се налазе на истој цеви, обележених бројевима 4 и 6, на слици 9. Од измерених притисака на локацији 4 су одузети притисци измерени у истом временском тренутку на локацији 6 и разлике у надморској висини. На овај начин је добијен график промене притисака само услед потрошње воде између 2 мерна места. Добијена законитост је коришћена као дијаграм потрошње за високе зграде, а на основу њега су направљена и преостала 2 типа потрошње, за зграде и куће. Приликом обраде података је коришћен већ спомињани „moving

average“ филтер.

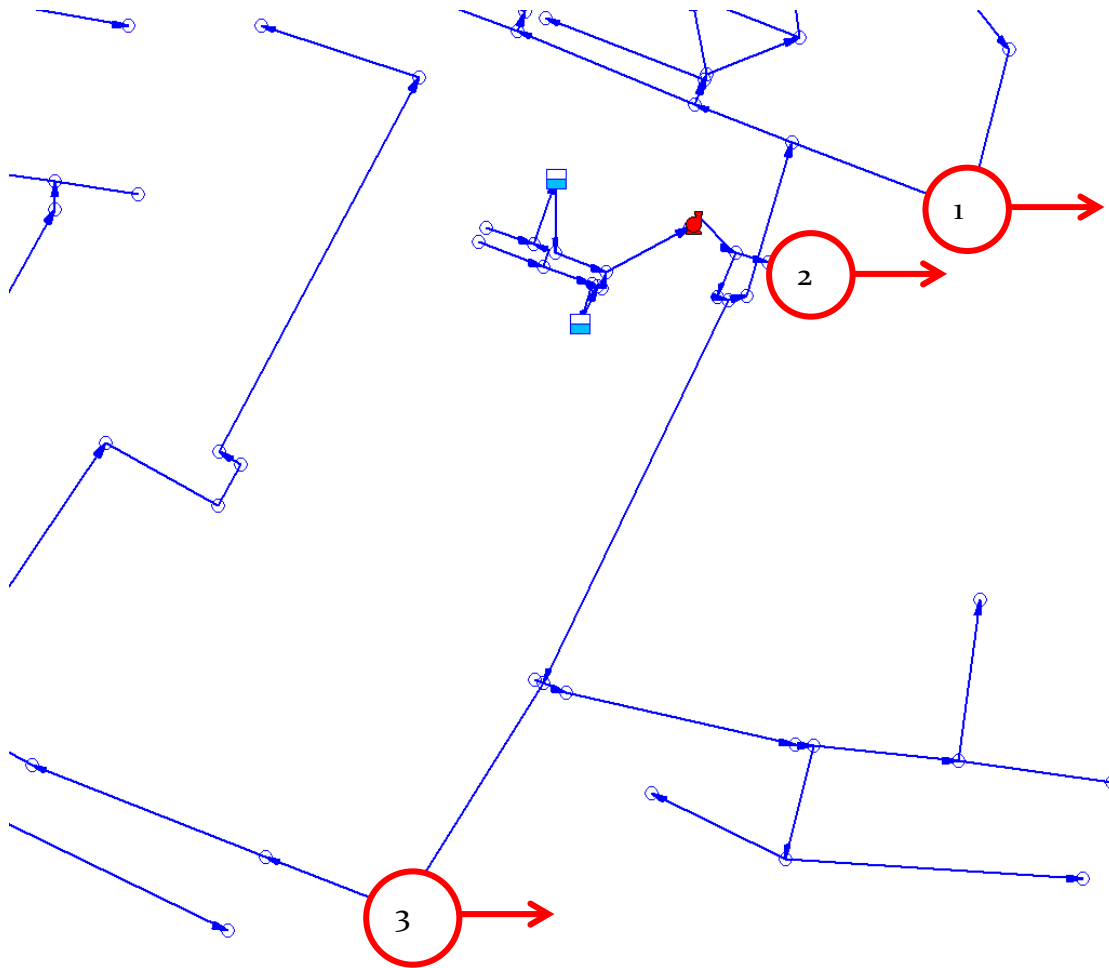


Слика 21: Трећа група дијаграма

Калибрација

За потребе калибрације је из резултата мерења са терена одређен је један дан који је представљао еталон за упоређивање вредности из математичког модела.

У процесу калибрације је прво одређена осетљивост модела на промену појединих параметара. Већина воде која се потискује у цевовод, око $2/3$, излази из система преко чворова који су на слици 22 означени бројевима 1, 2 и 3. Самим тим, гранични услови постају доминантан фактор и имају највећи утицај на резултате прорачуна.



Слика 22: Места са највећим утицајем на резултате прорачуна

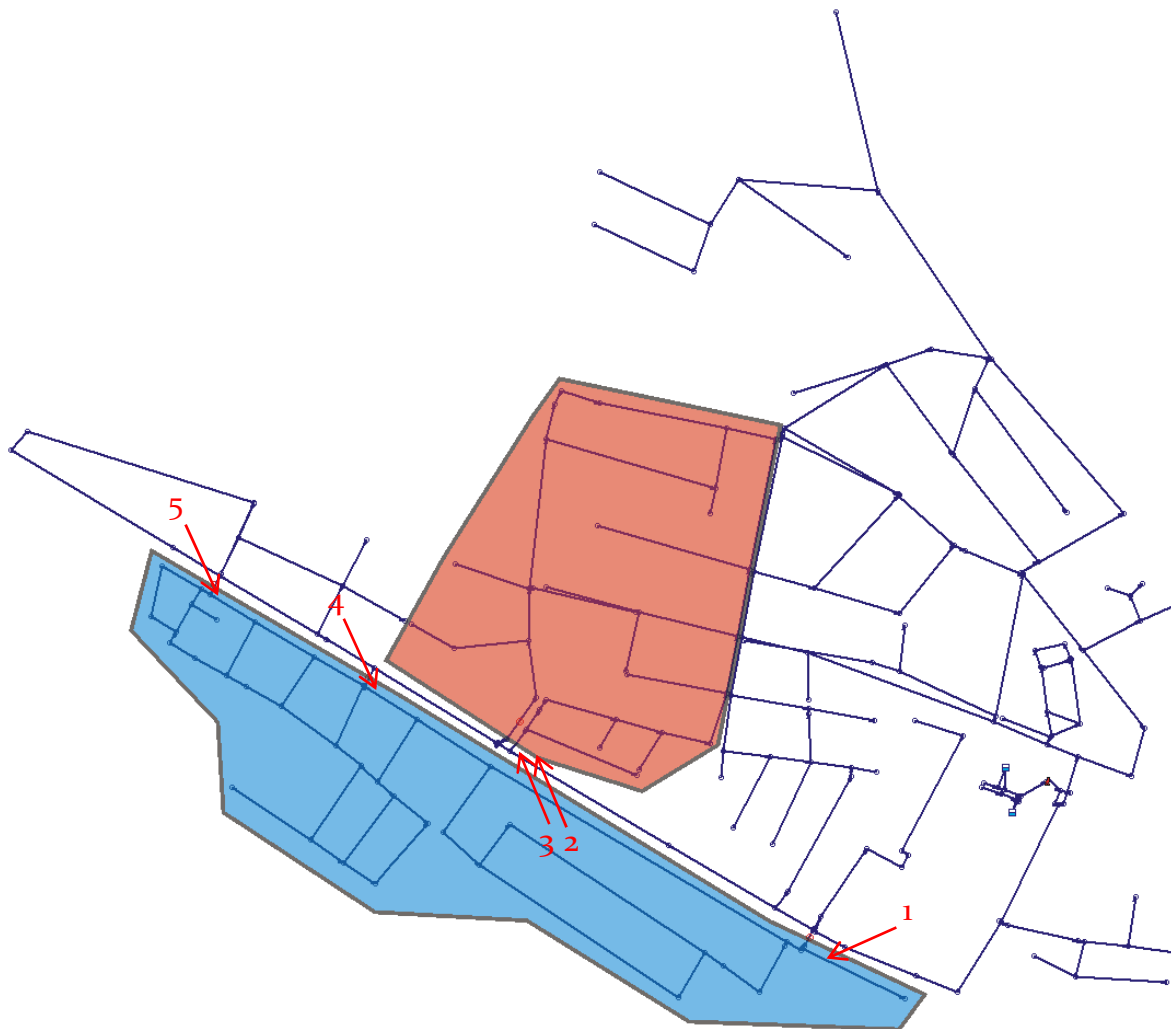
Калибрација модела је започета прилагођавањем промене протока у поменутиим чворовима. У првој итерацији су протоци мењани док није постигнуто да се минимуми и максимуми догађају у предвиђеним временским тренуцима. Следећи корак је било даље мењање тих података, са циљем поклапања и осталих промена притисака у току дана, великом паду притиска 4,30-7,15 часова, благог раста од 8,30-17,00, даљим релативно константим вредностима до поноћи и затим изразитим повећањем притиска до достизања максималне вредности око 4,30.

Промене у режиму дотока воде у резервоаре нису доносили промене у симулираним притисцима, тако да су те вредности остављене на почетном нивоу.

Притисци у свим тачкама су били знатно већи од мерених. Провером података је утврђено да постоје две одвојене пумпне станице, стара, која се користи, и нова. Њихове ознаке у информационом систему водовода су помешане и није сигурно које су криве пумпе које су у употреби, а које постројења које се не користи. Додатну сумњу у њихову истинитост уноси податак да су пумпе ремонтване, па је могуће да не одговарају вредностима за нове пумпе, које је произвођач навео.

На основу претходних сазнања, радне тачке пумпе су промењене. Проток није мењан, али су одговарајуће висине дизања спуштене. После ове измене, дошло је до бољег поклапања модела са еталоном.

Уочено је да постоје две зоне са притисцима који су већи од очекиваних, обележене на слици 23.



Слика 23: Зоне у којима су притисци у моделу већи од измерених притисака

Постоји вероватноћа да везе тих зона са остатком модела нису добро моделиране. Могуће је да на цевима 1, 2, 3, 4 и 5 постоје затварачи, да су пречници стварних цеви мањи, да су неке од тих цеви затворене или укинуте. У моделу је испробано неколико варијанти и најбоље резултате је дало решење са постављањем затварача на цеви 1, 3, 4 и 5, потпуним затварањем затварача на цеви 5 и делимичним притварањем на преосталим цевима. Ово је довело до бољег подударања са постојећим мерењима.

На следећем нивоу калибрације је приступљено подели потрошача према спратности објеката. Објекти до 2 спрата су уврштени у „куће“, од 2 до 6 спратова у „зграде“, а објекти веће спратности у „високе зграде“, како што је шематски приказано на слици 24.



Слика 24: Подела потрошача према спратности објеката

На почетку је био дефинисан само један тип потрошње и коришћена је зависност добијена из ЈКП БВК, међутим оваква стратегија није дала задовољавајуће резултате. Дијаграми из прве групе нису дали довољно добра слагања, ни у погледу неравномерности притисака, ни по распонима између минималних и максималних вредности. Друга група је имала боља поклапања, али су и даље постојала одређена неслагања у појединим деловима дана, или зона. Трећа група је имала најбоље резултате, што је било и очекивано с обзиром на начин на који су направљени.

Уношењем треће групе дијаграма потрошње, модел је показао задовољавајући степен поклапања са мерењима на физичком моделу у већини тачака. У делу мреже, који је на слици 23 офарбан плавом бојом, су постојала значајна одступања. Максимални симулирани притисци су били 2 бара већи од измерених, док су минимални били мало изнад измерених.

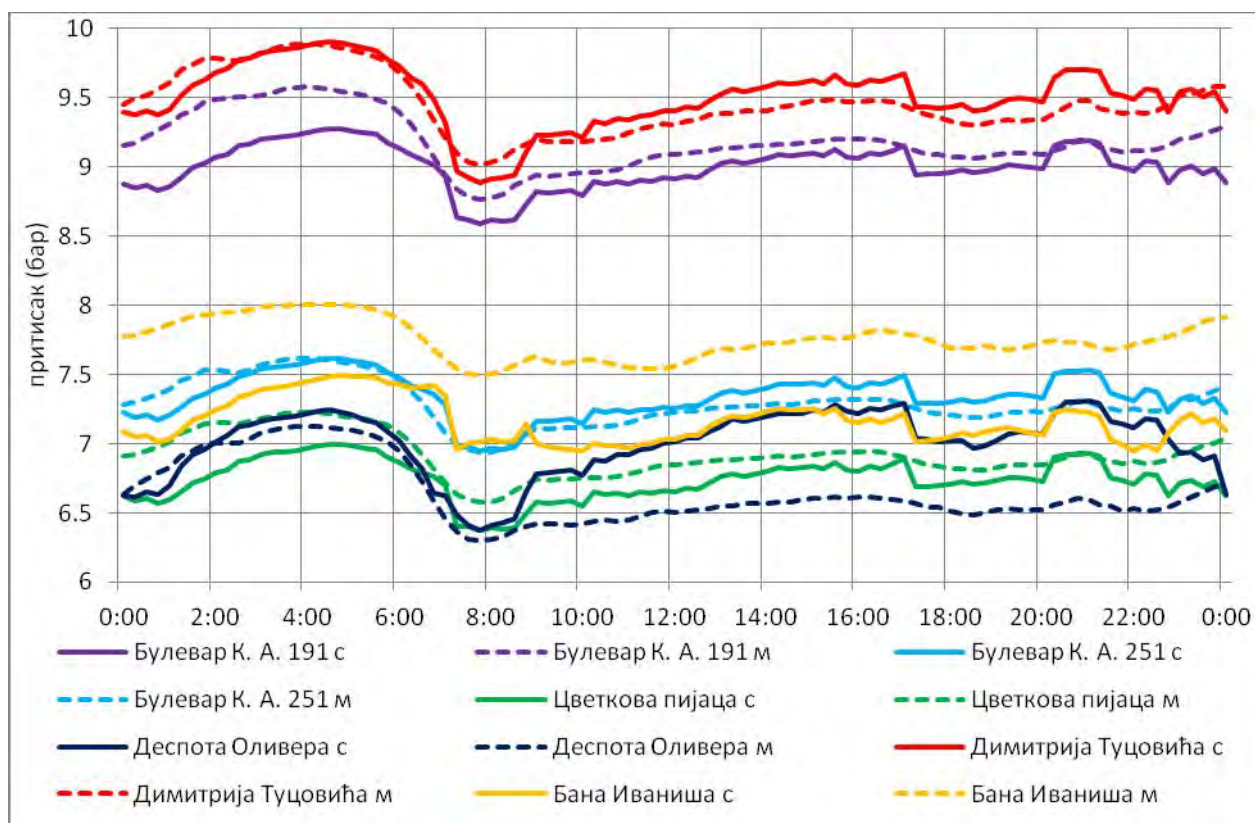
Локално смањење максималних притиска је решено увођењем губитака воде у тој зони. Како је водоводна мрежа у тој области стара, уношење губитака воде у модел је оправдано. Губици зависе од тренутног притиска у цеви и повећавају се са његовим порастом, па су тако и задати.

Губици воде су повећавани док није постигнуто жељено поклапање притисака. Задати губици износе 4% укупне количине воде у систему, у току једнодневне симулације модела, што износи око 10 литара у секунди.

Резултати

Математички модел описује тренутно стање система. Резултати симулације у 6 контролних тачака су упоређени са мереним вредностима.

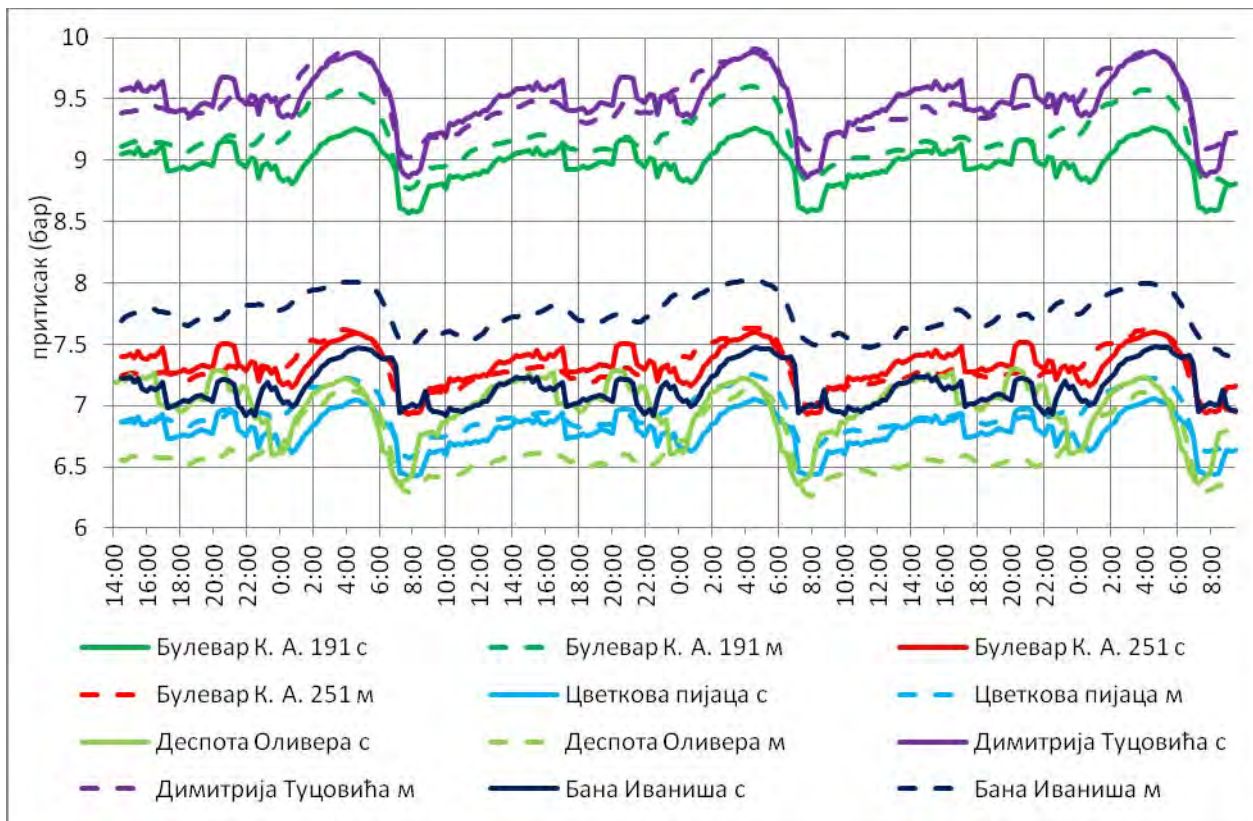
На слици 25 су приказане вредности измерених притисака 5.10.2011. (испрекиданим линијама) и резултати једнодневне симулације математичког модела (пуним линијама).



Слика 25: Упоредни приказ резултата симулације и мерених вредности, за 1 дан

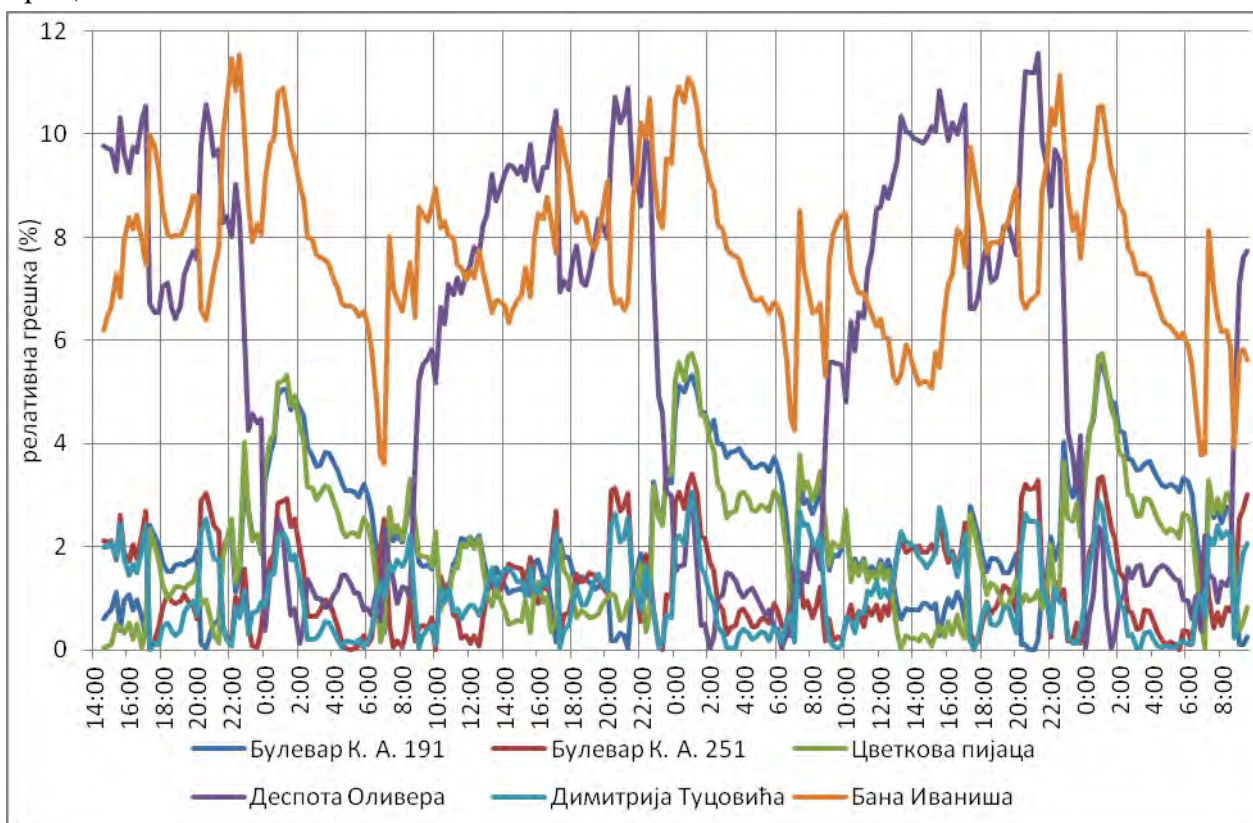
Промене у математичком моделу прате трендове понашања физичког система, уз достизање екстремних вредности у истим временским тренуцима. У 3 од 6 тачака постоји одлично слагање симулације са мерењима, док у 3 постоје мања одступања у вредностима.

Испробано је и поклапање модела са комплетним мерењима, које је приказано на слици 26. Упоређени су подаци забележени од 14,30 4.10.2011. до 9,30 7.4.2011, са тродневном симулацијом модела. Модел је, и у овом случају, пружио добра поклапања, као што се и очекивало, јер су температурни и временски услови у посматраном периоду били слични, па су и мерени притисци показали поновљивост.



Слика 26: Упоредни приказ резултата симулације и мерених вредности, за цео посматрани период

На слици 27 су приказане релативне разлике између мерених и симулираних вредности притисака, у процентима.



Слика 27: Релативна грешка између симулираних и мерених вредности притисака

Може се закључити да модел даје одличне резултате у већини контролних тачака, јер у 4 од 6 тачака релативне грешке износе мање од 5%, за цео модел се грешке крећу углавном испод 10%, док максимална релативна грешка износи 11,6%.

Највероватнији узрок нешто већих одступања резултата на 2 мерна места су лоше одређене везе између појединих чворова, или погрешно унесени тј. промењени пречници неких цеви.

Зонирање издвојеног дела мреже помоћу математичког модела

Приступило се одређивању стварно потребних притисака, анализи тренутних вредности притисака и налажењу решења за његово смањивање.

Одређивање потребних притисака

На слици 28 је приказано како су одређени потребни притисци у мрежи, узимајући у обзир спратност прикључених објеката.

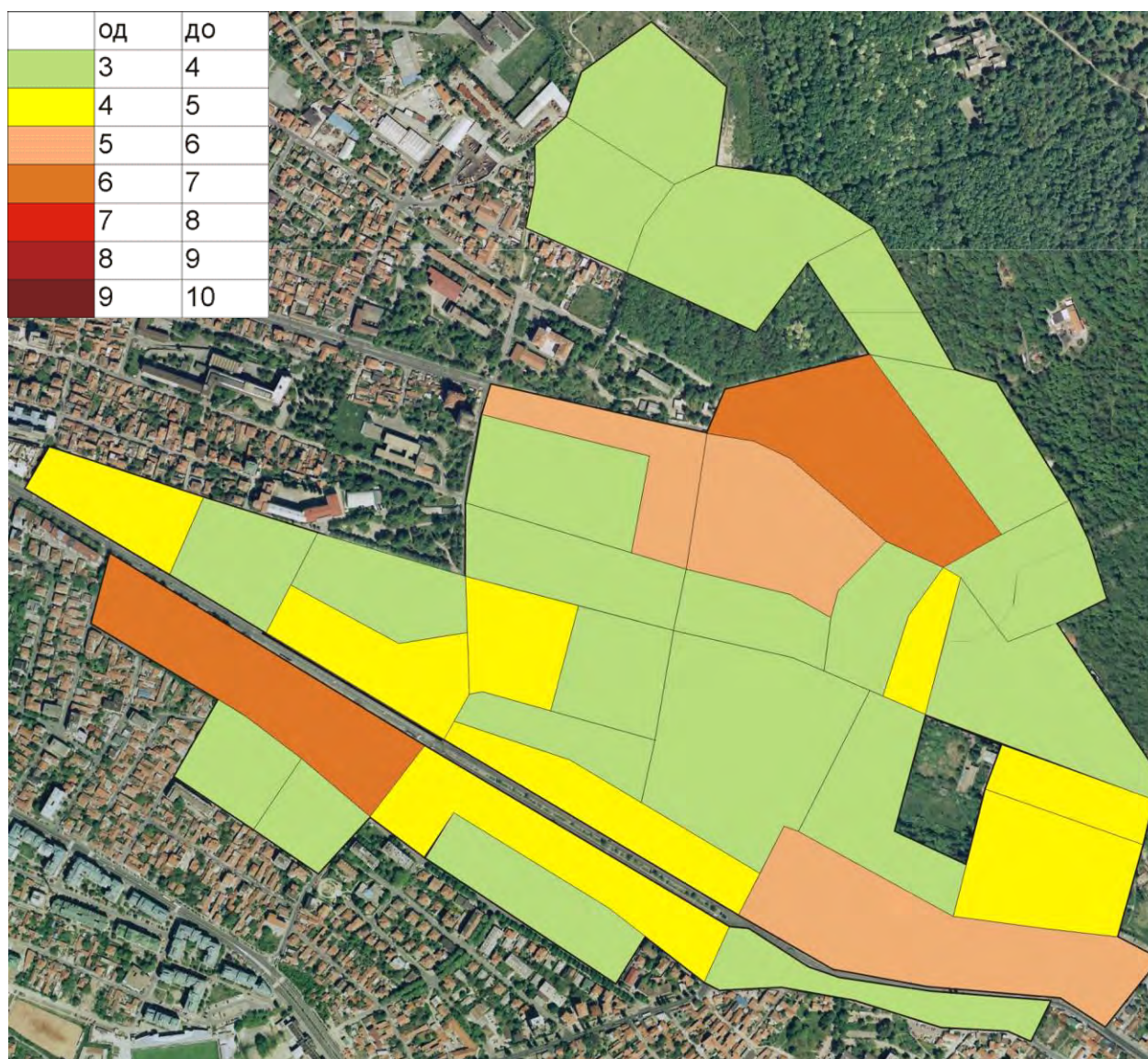
Број спратова + приземље	3	5	7	11	16
Спратна висина у метрима	3				
Висина до последњег излива, у метрима	9	15	21	33	48
Потребан притисак на последњем нивоу у барима	1,5				
Минимални потребни притисак у барима	2,38	2,97	3,56	4,74	6,21
Усвојени минимални притисак у барима	3	3	4	5	6

Слика 28: Прорачун потребних притисака

Минимални потребни притисак (п) је одређен преко формуле:

$$p = \text{висина до последњег излива у м} * 0,0981 + \text{пот. прит. на последњем нивоу у барима}$$

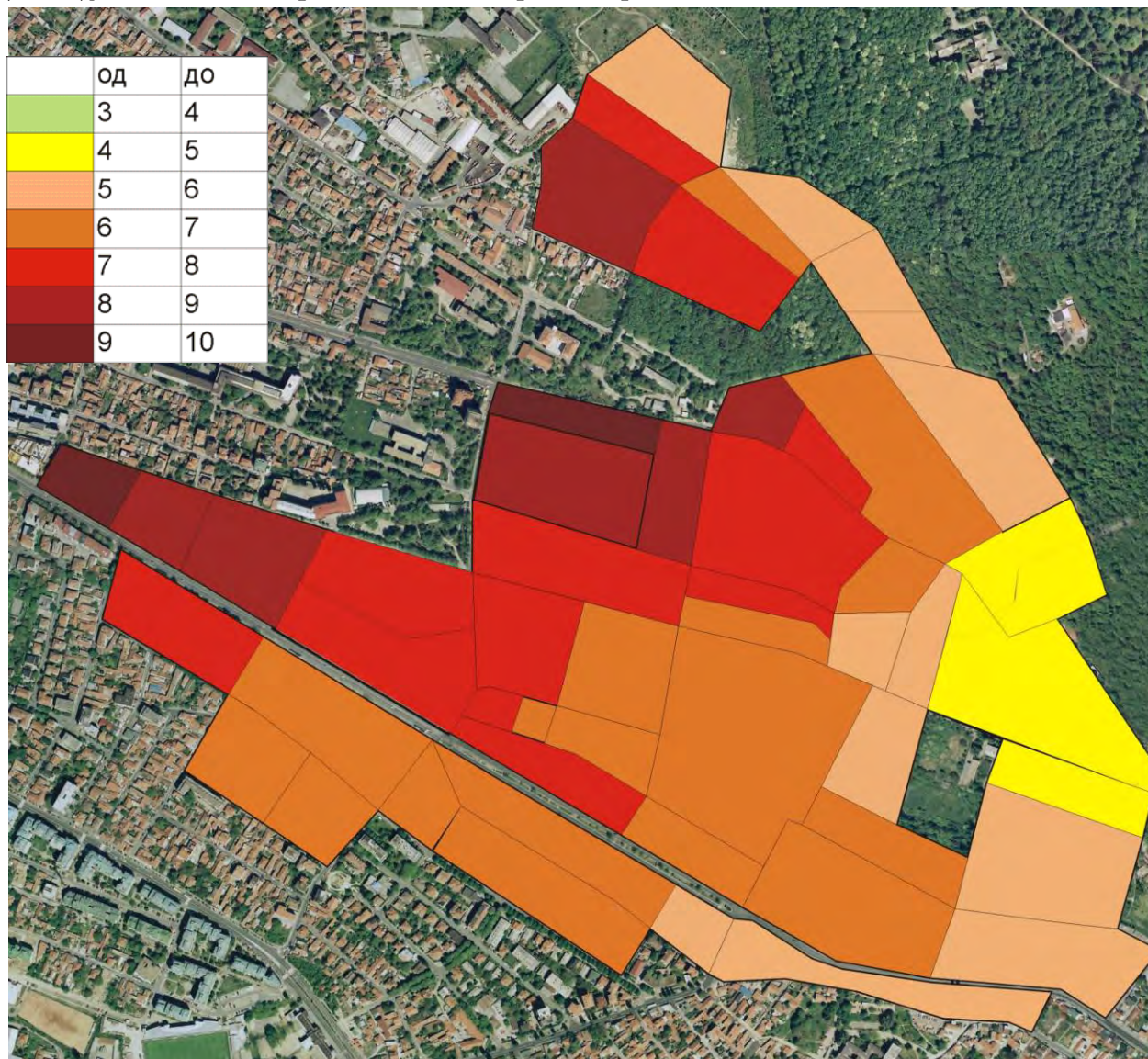
Добијене вредности су уцртане на орто-фото снимак посматране области и приказане на слици 29.



Слика 29: Потребни минимални притисци, у барима

Тренутно стање

Слика 30 приказује тренутно стање притисака у мрежи, добијених коришћењем калибрисаног математичког модела. Може се приметити да се у скоро свим областима јављају знатно већи притисци од стварно потребних.



Слика 30: Тренутни минимални притисци, у барима

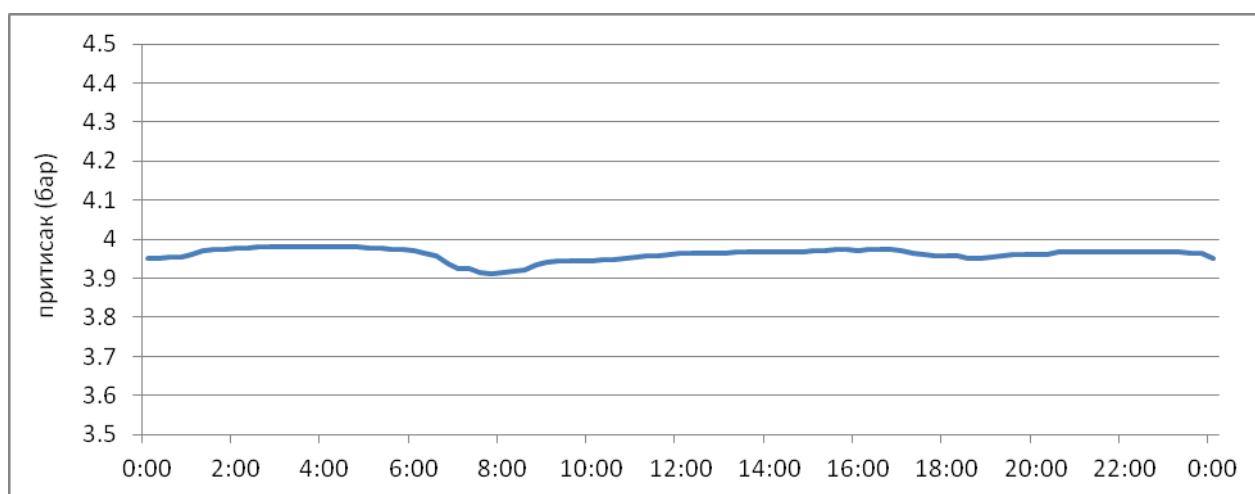
Издвајање одређених зона и њихова регулација

На почетку је уочено да постоје одређене зоне које се лако могу издвојити од остатка модела и мењати притисак унутар њих, без утицаја на остатак мреже. Постављена су додатна 3 затварача за одржавање низводног притиска и додата је једна цев са лептирастим затварачем. На слици 31 су заокружене унете измене.



Слика 31: Предложене измене мреже

Коришћењем затварача, притисци су спуштени у деловима мреже који се налазе низводно од њих. Сем нижег притиска у цевима, овим је постигнута још једна позитивна промена, добијен је скоро константан притисак у цевоводу, са занемарљивим осцилацијама у току дана, као што се може видети на слици 32.

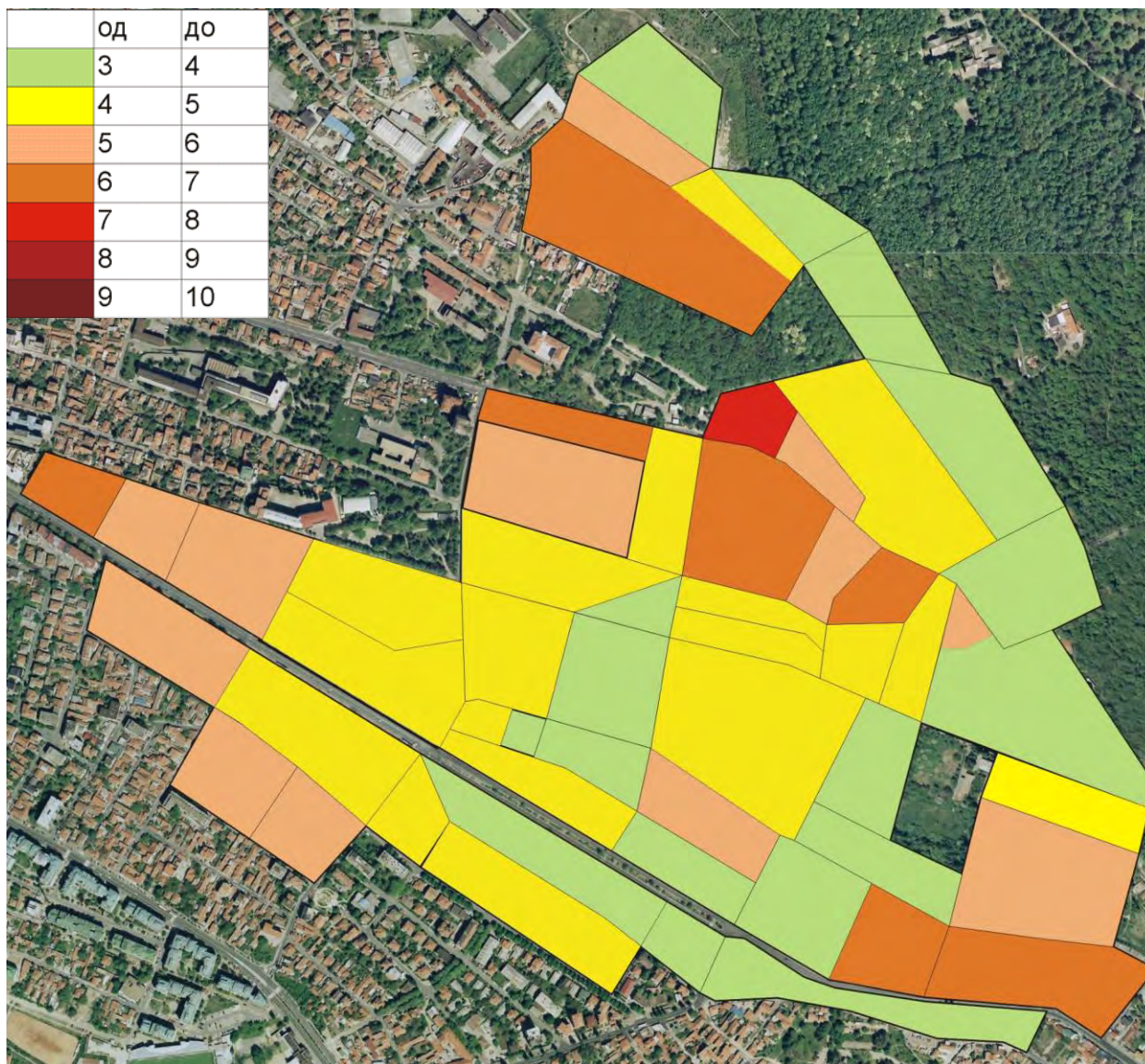


Слика 32: Очекивани притисци на мерном месту булевар Краља Александра 251

Цев пречника $\varnothing 200$ је додата јер су, у делу обележеном плавом бојом на слици 23, добијени нижи притисци од потребних. На нову цев је стављен затварач, како би било могуће укинути ту везу, уколико се касније јави потреба за тим.

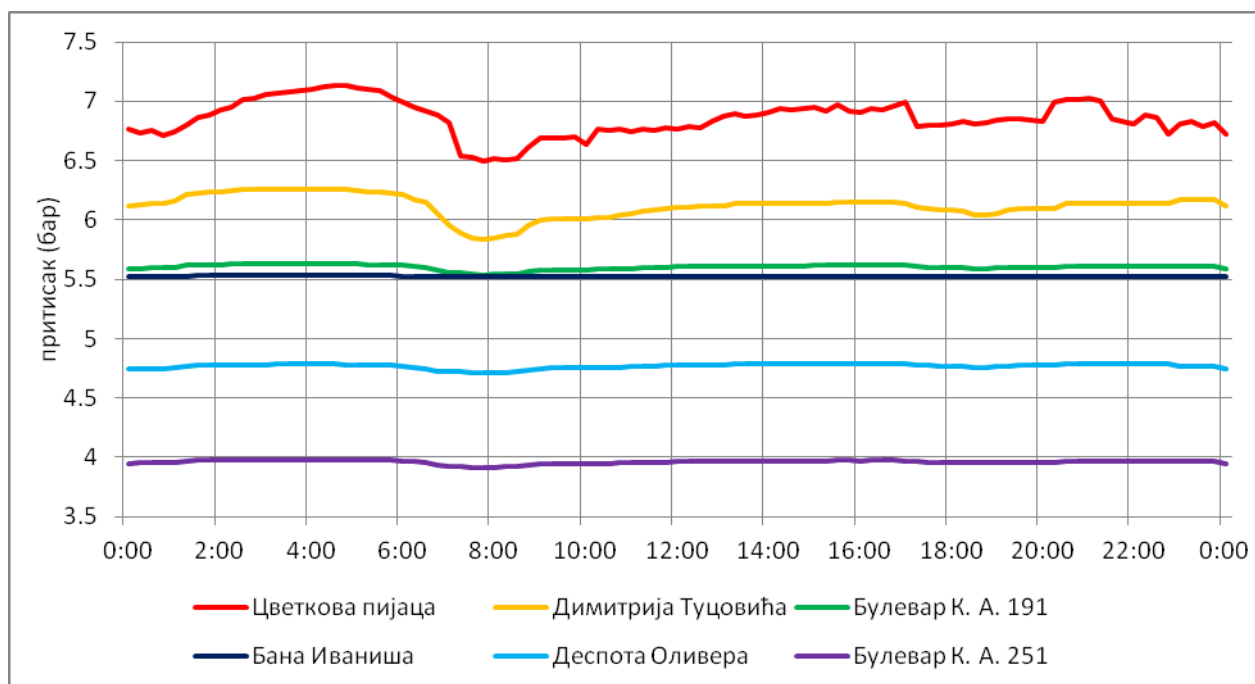
Резултати

Слика 33 приказује вредности притисака, након уношења предложених измена у постојеће стање.



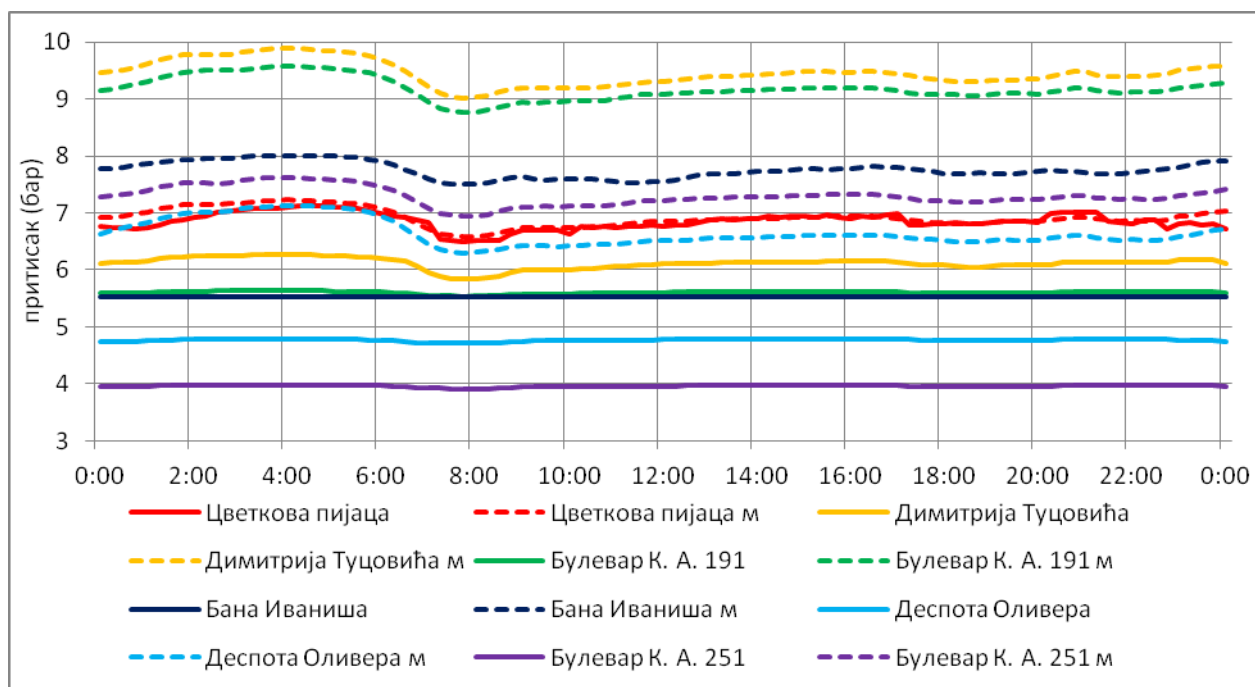
Слика 33: Минимални притисци, по моделу предложеног решења, у барима

На слици 34 су приказане вредности притисака који се очекују у систему, у контролним тачкама.



Слика 34: Очекивани притисци у моделу предложеног решења

Притисци су знатно нижи и уједначенији него у моделу тренутног стања и приближнији потребним. На слици 35 се може видети колико су велике разлике између измерених вредности притисака и очекиваних притисака након измена на мрежи.



Слика 35: Мерење и очекиване вредности у систему

Смањење притиска износи између 3 и 4 бара у већини тачака. Нижи притисци се не могу очекивати на мерном месту код Цветкове пијаце, јер се оно налази узводно од предложених измена. Та локација је намерно изузета, јер се налази у непосредној близини цевовода којим се вода даље транспортује уз булевар Краља Александра, због чега је потребан толики притисак, на месту које се налази 150 метара узводно од прикључка за потрошаче на Цветковој пијаци.

Закључак

Опште

Направљена су 2 математичка модела, један који представља тренутно стање и други који садржи предложено решење за смањење притисака. У моделу су искоришћени постојећи подаци о мрежи, уз калибрисање података о граничним условима и потрошњи воде. Одређене су потребне величине притисака по зонама и предложено је како да се ти притисци постигну.

Коментар резултата

Постигнуто је добро слагање математичког модела са физичким системом. На 2 места постоје мања одступања од мерених вредности, чији су највероватнији узроци промењени услови течења у физичком моделу.

Калибрисани модел даје довољно добар увид у тренутно стање и промене у водоводној мрежи, па се може користити за тестирање различитих мера смањења притисака.

Модел, у који су унешене предложене измене, представља један од могућих начина решења проблема са високим притисцима. Представљени предлог се показао као добар, јер захтева минималне измене у постојећој мрежи, а пружа одличне резултате. Вредности притисака се крећу око потребних величина и имају веома мале осцилације у времену.

Предлог даљих мерења

Модел постојећег стања се може додатно побољшати. Највећу неодређеност у модел уносе гранични услови и потребно је измерити протоке на водоводној мрежи, на свим местима где је мрежа пресечена, која су на слици 8 обележена црвеном бојом.

Треба извршити истовремена мерења на неколико места и на основу њих добити поуздане дијаграме потрошње, који осликавају реалније стање, са израженијим разликама између дневних и ноћних потреба за водом.

У току калибрације модела су добијени резултати који упућују на закључак да у зони, на слици 7 обележеној сивом бојом, постоје знатни губици воде, па је потребно утврдити да ли они заиста постоје и којег су реда величине.

На слици 23 су две области означене наранџастом и плавом бојом, код којих постоји сумња у исправност чворних веза и пречнике припадајућих цевовода, јер се код њих јавио проблем калибрације са почетним елементима.

Литература

Иветић, М. (1996), Рачунска хидраулика – Течење у цевима, 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.

Тутуновић, К. (2011), AquanetS for Windows v.7.3.2. Упутство, Беоинжењеринг 2000 д.о.о.