



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ  
КАТЕДРА ЗА ХИДРОТЕХНИКУ И  
ВОДНО-ЕКОЛОШКО ИНЖЕЊЕРСТВО

МАСТЕР РАД

из уже научне области: ХИДРОЛОГИЈА,  
МЕХАНИКА ФЛУИДА И ХИДРАУЛИКА

Тема: Оптимално позиционирање сензора  
притиска у водоводној мрежи у циљу детекције  
губитака

Кандидат:

Никола Милев 564/20

Ментор:

доц. др Милош Милашиновић

Октобар 2023. године

# Садржај:

1. Увод
2. Материјали и методе
3. Анализа мреже и предложена мерна места
4. Резултати и дискусија
5. Закључак

# 1. Увод

- Губици воде су интернационално дефинисани као „NRW – Non-revenue water“, односно „вода која не доноси приход“.
- Подаци Удружења за технологију воде и санитарно инжењерство (УТВСИ)

Ред. бр.	Губици воде	2019	2020	2021
1.	Нефактурисана вода / вода унета у систем (произведена)	41%	41%	42%
2.	Губици воде m <sup>3</sup> /km на дан	22	22,1	22,5
3.	Губици воде литара/прикључку на дан	485	486	488

- УТВСИ – губици 42% произведене воде; Републички завод за статистику (РЗС) – губици 35%
- Неопходно ефикасно детектовање губитка – први корак.
- У овом раду ће се обрадити једна од метода за одређивање оптималног броја и положаја сензора притиска.

## 2. Материјали и методе

### 2.1 Коришћени програми:

1. EPANET рачунарски програм – анализа мреже
2. EPANET-MATLAB софтверски алат – сложени хидраулички прорачуни разних варијанти стања система
  - Брзи сложени прорачуни – трајање прорачуна кода из овог рада – 10 мин
  - Богата библиотека функција
  - Функције коришћене у писању кода из овог рада:

---

#### Функције из EPANET-MATLAB библиотеке

- G.setTimeSimulationDuration
- getNodeJunctionIndex
- getNodeJunctionNameID
- getComputedHydraulicTimeSeries
- getNodeBaseDemands
- G.getNodeJunctionCount
- G.setNodeBaseDemands

#### MATLAB функције

- Length
- Find
- Union
- *For* петље





## КОРАК ОПИС КОРАКА

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(2)

```
imeFajla =  
'Becej2006-24h.inp';  
G =epanet(imeFajla);
```

## КОРАК ОПИС КОРАКА

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже
- (3) Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(3)

```
hrs = 24;
```

```
G.setTimeSimulationDuration(hrs*3600);
```



## КОРАК ОПИС КОРАКА

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже
- (3) Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања
- (4) Очитавање података о индексима чворова

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(4)

```
junctionIndex =  
G.getNodeJunctionInd  
ex;
```

**КОРАК ОПИС КОРАКА**

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже
- (3) Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања
- (4) Очитавање података о индексима чворова
- (5) Очитавање података о ID-јевима чворова

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(5)

```
junctionID =  
G.getNodeJunctionName  
eID
```

## КОРАК ОПИС КОРАКА

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже
- (3) Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања
- (4) Очитавање података о индексима чворова
- (5) Очитавање података о ID-јевима чворова
- (6) Очитавање свих хидрауличких параметара учитане мреже

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(6)

H =

```
G.getComputedHydraulicTimeSeries;
```

## КОРАК ОПИС КОРАКА

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже
- (3) Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања
- (4) Очитавање података о индексима чворова
- (5) Очитавање података о ID-јевима чворова
- (6) Очитавање свих хидрауличких параметара учитане мреже
- (7) Очитавање и додељивање променљивој BD0 потребе за водом у свим чворовима учитане мреже

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(7)

```
BD0=G.getNodeBaseDemands;
```

## КОРАК ОПИС КОРАКА

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже
- (3) Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања
- (4) Очитавање података о индексима чворова
- (5) Очитавање података о ID-јевима чворова
- (6) Очитавање свих хидрауличких параметара учитане мреже
- (7) Очитавање и додељивање променљивој  $BD0$  потребе за водом у свим чворовима учитане мреже
- (8) Уношење индекса чворова предложених као мерна места у променљиву  $PMM$

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(8)

$PMM = [ \dots ] ;$

## КОРАК ОПИС КОРАКА

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже
- (3) Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања
- (4) Очитавање података о индексима чворова
- (5) Очитавање података о ID-јевима чворова
- (6) Очитавање свих хидрауличких параметара учитане мреже
- (7) Очитавање и додељивање променљивој BD0 потребе за водом у свим чворовима учитане мреже
- (8) Уношење индекса чворова предложених као мерна места у променљиву PMM
- (9) Очитавање и чување почетних референтних притисака, у чворовима који су дефинисани као предложена мерна места за 24 h трајања симулације, и то у променљивој pressureRef

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(9)

```
pressureRef =  
H.Pressure (:, PMM) ;
```

## КОРАК ОПИС КОРАКА

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже
- (3) Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања
- (4) Очитавање података о индексима чворова
- (5) Очитавање података о ID-јевима чворова
- (6) Очитавање свих хидрауличких параметара учитане мреже
- (7) Очитавање и додељивање променљивој `BD0` потребе за водом у свим чворовима учитане мреже
- (8) Уношење индекса чворова предложених као мерна места у променљиву `PMM`
- (9) Очитавање и чување почетних референтних притисака, у чворовима који су дефинисани као предложена мерна места за 24 h трајања симулације, и то у променљивој `pressureRef`
- (10) Дефинисање празне матрице `sensitivity` за чување података о осетљивости сензора притиска у предложеним мерним местима

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(10)

```
sensitivity = [];
```

## КОРАК ОПИС КОРАКА

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже
- (3) Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања
- (4) Очитавање података о индексима чворова
- (5) Очитавање података о ID-јевима чворова
- (6) Очитавање свих хидрауличких параметара учитане мреже
- (7) Очитавање и додељивање променљивој BD0 потребе за водом у свим чворовима учитане мреже
- (8) Уношење индекса чворова предложених као мерна места у променљиву PММ
- (9) Очитавање и чување почетних референтних притисака, у чворовима који су дефинисани као предложена мерна места за 24 h трајања симулације, и то у променљивој pressureRef
- (10) Дефинисање празне матрице sensitivity за чување података о осетљивости сензора притиска у предложеним мерним местима
- (11) Очитавање и дефинисање броја чворова у мрежи као броја симулација

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(11)

```
numSimulation =  
G.getNodeJunctionCount;
```



## КОРАК ОПИС КОРАКА

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже
- (3) Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања
- (4) Очитавање података о индексима чворова
- (5) Очитавање података о ID-јевима чворова
- (6) Очитавање свих хидрауличких параметара учитане мреже
- (7) Очитавање и додељивање променљивој BD0 потребе за водом у свим чворовима учитане мреже
- (8) Уношење индекса чворова предложених као мерна места у променљиву PMM
- (9) Очитавање и чување почетних референтних притисака, у чворовима који су дефинисани као предложена мерна места за 24 h трајања симулације, и то у променљивој pressureRef
- (10) Дефинисање празне матрице sensitivity за чување података о осетљивости сензора притиска у предложеним мерним местима
- (11) Очитавање и дефинисање броја чворова у мрежи као броја симулација
- (12) Покретање for петље у којој ће се вештачки генерисати губици воде у i-том чвору, затим, по покретању хидрауличног прорачуна очитати и сачувати нови притисци у чворовима предложених мерних места за i-ту симулацију у променљивој pressureSim и урадити прорачун осетљивости преко корена средњег квадратног одступања - RMSE броја и за крај вратити почетне потребе за водом у истом i-том чвору. Вредности RMSE броја сачуваће се у матрици sensitivity.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left( p_{pmm,i}^{ref} - p_{pmm,i}^{sim} \right)^2}$$

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(12)

```
for i = 1:numSimulation
    newBD= BD0{1}(i) * 1.5;
    G.setNodeBaseDemands(i,newBD);

    H =
    G.getComputedHydraulicTimeSeries;

    pressureSim
    =H.Pressure(:,PMM);

    sensitivity(i,:) =
    sqrt((1/25) * (sum((pressureRef-
    pressureSim).^2)));

    G.setNodeBaseDemands(i,newBD/1.5);
end
```

## КОРАК ОПИС КОРАКА

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже
- (3) Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања
- (4) Очитавање података о индексима чворова
- (5) Очитавање података о ID-јевима чворова
- (6) Очитавање свих хидрауличких параметара учитане мреже
- (7) Очитавање и додељивање променљивој BD0 потребе за водом у свим чворовима учитане мреже
- (8) Уношење индекса чворова предложених као мерна места у променљиву PММ
- (9) Очитавање и чување почетних референтних притисака, у чворовима који су дефинисани као предложена мерна места за 24 h трајања симулације, и то у променљивој pressureRef
- (10) Дефинисање празне матрице sensitivity за чување података о осетљивости сензора притиска у предложеним мерним местима
- (11) Очитавање и дефинисање броја чворова у мрежи као броја симулација
- (12) Покретање for петље у којој ће се вештачки генерисати губици воде у i-том чвору, затим, по покретању хидрауличног прорачуна очитати и сачувати нови притисци у чворовима предложених мерних места за i-ту симулацију у променљивој pressureSim и урадити прорачун осетљивости преко RMSE броја и за крај вратити почетне потребе за водом у истом i-том чвору. Вредности RMSE броја сачуваће се у матрици sensitivity.
- (13) Скалирање матрице sensitivity на вредности од 0 до 1

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(13)

```
sensitivity =  
sensitivity./max(sen  
sitivity);
```

## КОРАК ОПИС КОРАКА

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже
- (3) Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања
- (4) Очитавање података о индексима чворова
- (5) Очитавање података о ID-јевима чворова
- (6) Очитавање свих хидрауличких параметара учитане мреже
- (7) Очитавање и додељивање променљивој BD0 потребе за водом у свим чворовима учитане мреже
- (8) Уношење индекса чворова предложених као мерна места у променљиву PMM
- (9) Очитавање и чување почетних референтних притисака, у чворовима који су дефинисани као предложена мерна места за 24 h трајања симулације, и то у променљивој pressureRef
- (10) Дефинисање празне матрице sensitivity за чување података о осетљивости сензора притиска у предложеним мерним местима
- (11) Очитавање и дефинисање броја чворова у мрежи као броја симулација
- (12) Покретање for петље у којој ће се вештачки генерисати губици воде у i-том чвору, затим, по покретању хидрауличног прорачуна очитати и сачувати нови притисци у чворовима предложених мерних места за i-ту симулацију у променљивој pressureSim и урадити прорачун осетљивости преко RMSE броја и за крај вратити почетне потребе за водом у истом i-том чвору. Вредности RMSE броја сачуваће се у матрици sensitivity.
- (13) Скалирање матрице sensitivity на вредности од 0 до 1
- (14) Усвајање и дефинисање променљиве r као прага осетљивости

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(14)

$$p = 0.5;$$

- параметар  $p = 0 \div 1$
- Усвојено  $p = 0,5$
- Вредност параметра је избор корисника кода

## КОРАК ОПИС КОРАКА

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже
- (3) Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања
- (4) Очитавање података о индексима чворова
- (5) Очитавање података о ID-јевима чворова
- (6) Очитавање свих хидрауличких параметара учитане мреже
- (7) Очитавање и додељивање променљивој BD0 потребе за водом у свим чворовима учитане мреже
- (8) Уношење индекса чворова предложених као мерна места у променљиву PMM
- (9) Очитавање и чување почетних референтних притисака, у чворовима који су дефинисани као предложена мерна места за 24 h трајања симулације, и то у променљивој pressureRef
- (10) Дефинисање празне матрице sensitivity за чување података о осетљивости сензора притиска у предложеним мерним местима
- (11) Очитавање и дефинисање броја чворова у мрежи као броја симулација
- (12) Покретање for петље у којој ће се вештачки генерисати губици воде у i-том чвору, затим, по покретању хидрауличног прорачуна очитати и сачувати нови притисци у чворовима предложених мерних места за i-ту симулацију у променљивој pressureSim и урадити прорачун осетљивости преко RMSE броја и за крај вратити почетне потребе за водом у истом i-том чвору. Вредности RMSE броја сачуваће се у матрици sensitivity.
- (13) Скалирање матрице sensitivity на вредности од 0 до 1
- (14) Усвајање и дефинисање променљиве r као прага осетљивости
- (15) Дефинисање празне матрице cvorovi за чување резултата

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(15)

```
cvorovi = [];
```

## КОРАК ОПИС КОРАКА

- (1) Покретање EPANET-MATLAB алата
- (2) Учитавање EPANET мреже
- (3) Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања
- (4) Очитавање података о индексима чворова
- (5) Очитавање података о ID-јевима чворова
- (6) Очитавање свих хидрауличких параметара учитане мреже
- (7) Очитавање и додељивање променљивој BD0 потребе за водом у свим чворовима учитане мреже
- (8) Уношење индекса чворова предложених као мерна места у променљиву PMM
- (9) Очитавање и чување почетних референтних притисака, у чворовима који су дефинисани као предложена мерна места за 24 h трајања симулације, и то у променљивој pressureRef
- (10) Дефинисање празне матрице sensitivity за чување података о осетљивости сензора притиска у предложеним мерним местима
- (11) Очитавање и дефинисање броја чворова у мрежи као броја симулација
- (12) Покретање for петље у којој ће се вештачки генерисати губици воде у i-том чвору, затим, по покретању хидрауличног прорачуна очитати и сачувати нови притисци у чворовима предложених мерних места за i-ту симулацију у променљивој pressureSim и урадити прорачун осетљивости преко RMSE броја и за крај вратити почетне потребе за водом у истом i-том чвору. Вредности RMSE броја сачуваће се у матрици sensitivity.
- (13) Скалирање матрице sensitivity на вредности од 0 до 1
- (14) Усвајање и дефинисање променљиве p као прага осетљивости
- (15) Дефинисање празне матрице cvorovi за чување резултата
- (16) Покретање for петље у којој ће се одредити број чворова из мреже у којима сензори региструју промену већу од задатог прага осетљивости

## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(16)

```
for
i=1:length(PMM)
tmp =
sensitivity(:,i);

nm{i} = find
(tmp>p);

cvorovi = union
(cvorovi, nm{i})

end
```

КОРАК	ОПИС КОРАКА
(1)	Покретање EPANET-MATLAB алата
(2)	Учитавање EPANET мреже
(3)	Временско подешавање прорачуна задавањем времена трајања
(4)	Очитавање података о индексима чворова
(5)	Очитавање података о ID-јевима чворова
(6)	Очитавање свих хидрауличких параметара учитане мреже
(7)	Очитавање и додељивање променљивој BDO потребе за водом у свим чворовима учитане мреже
(8)	Уношење индекса чворова предложених као мерна места у променљиву PMM
(9)	Очитавање и чување почетних референтних притисака, у чворовима који су дефинисани као предложена мерна места за 24 h трајања симулације, и то у променљивој pressureRef
(10)	Дефинисање празне матрице sensitivity за чување података о осетљивости сензора притиска у предложеним мерним местима
(11)	Очитавање и дефинисање броја чворова у мрежи као броја симулација
(12)	Покретање for петље у којој ће се вештачки генерисати губици воде у i-том чвору, затим, по покретању хидрауличног прорачуна очитати и сачувати нови притисци у чворовима предложених мерних места за i-ту симулацију у променљивој pressureSim и урадити прорачун осетљивости преко RMSE броја и за крај вратити почетне потребе за водом у истом i-том чвору. Вредности RMSE броја сачуваће се у матрици sensitivity.
(13)	Скалирање матрице sensitivity на вредности од 0 до 1
(14)	Усвајање и дефинисање променљиве p као прага осетљивости
(15)	Дефинисање празне матрице cvorovi за чување резултата
(16)	Покретање for петље у којој ће се одредити број чворова из мреже у којима сензори региструју промену већу од задатог прага осетљивости
(17)	Бележење крајњег резултата покривености мреже сензорима у виду броја чворова у којима ће се за задати број и распоред сензора регистровати губици воде у учитаној мрежи.

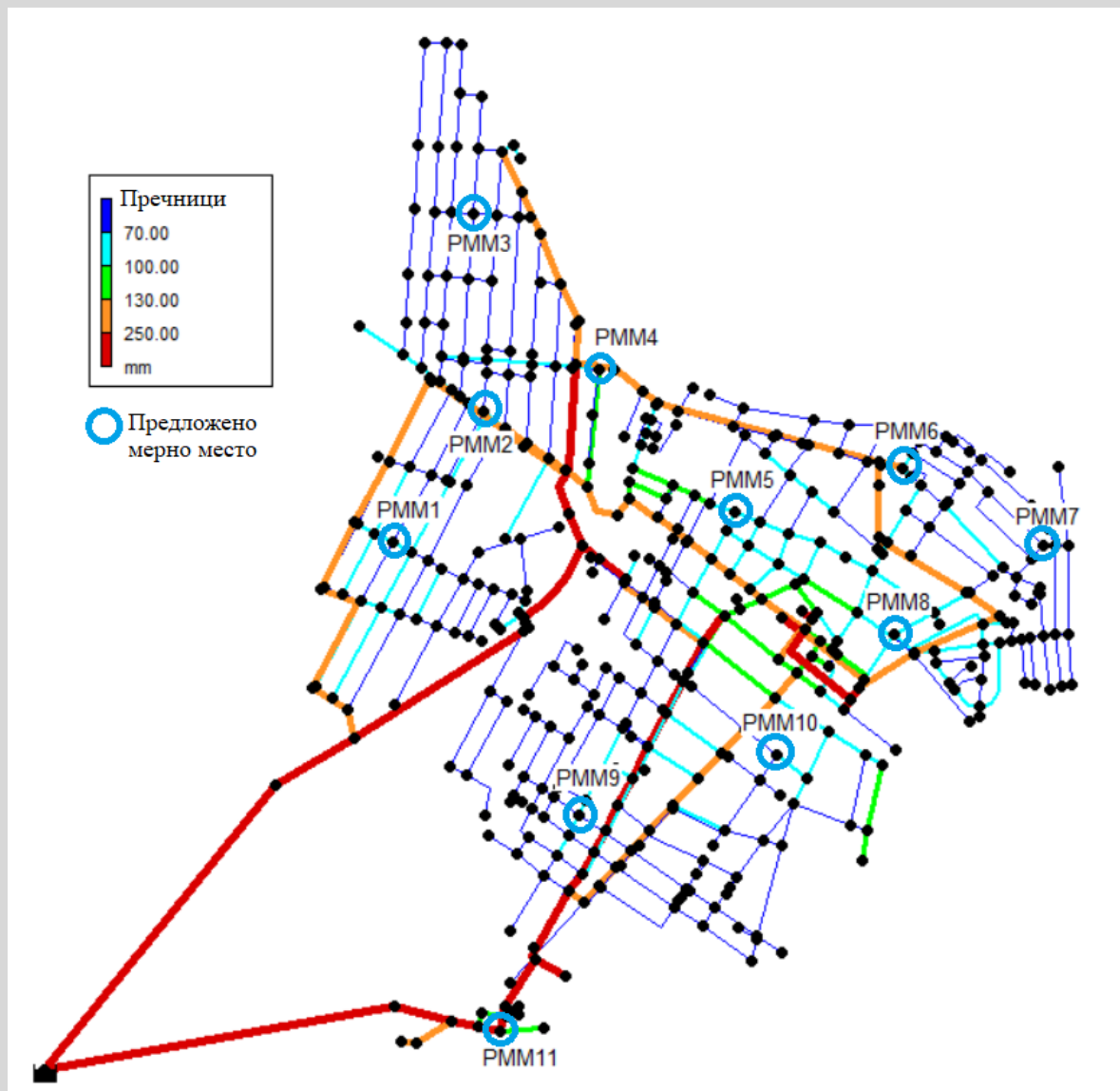
## 2. Материјали и методе

### 2.2. Алгоритам писања кода

(17)

```
broj_pokrivenih_cvorova = length
(cvorovi)
```

### 3. Анализа мреже и предложена мерна места

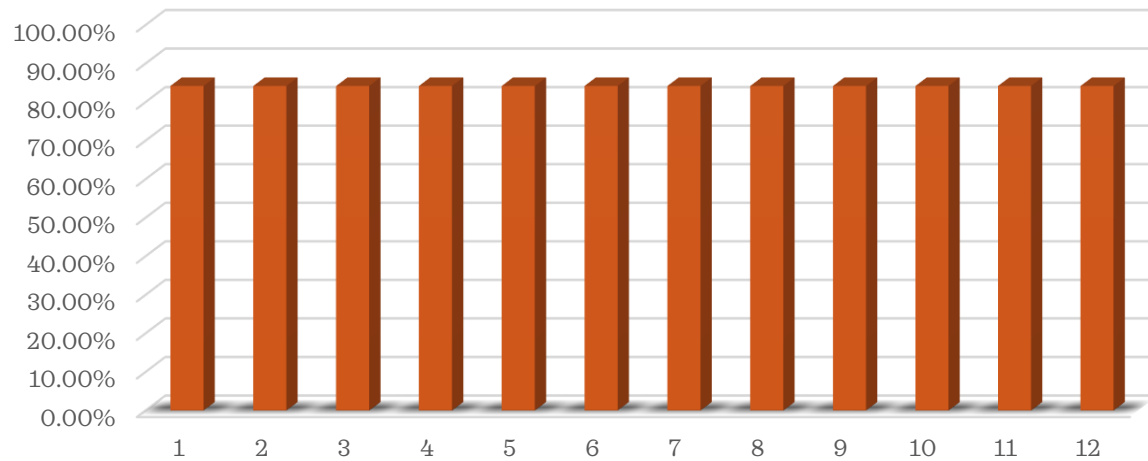


#### Предложена мерна места

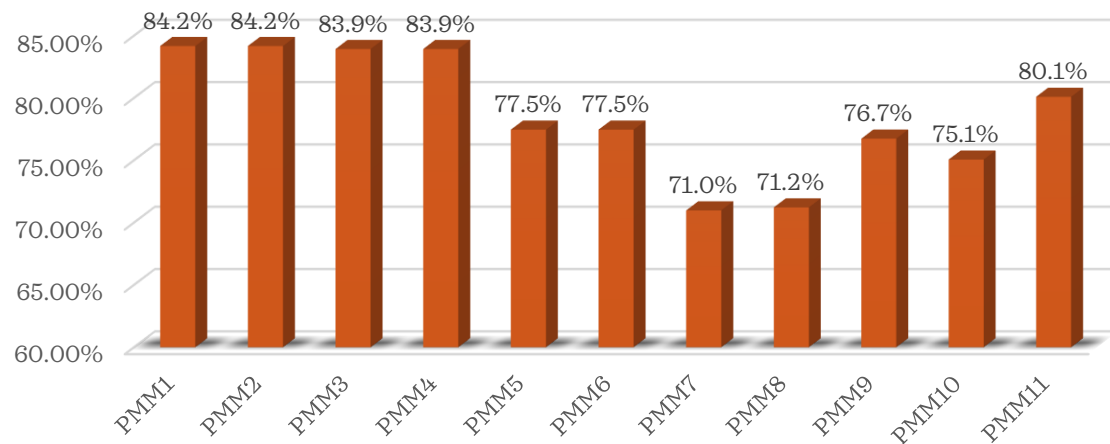
PMM1	Зона високих притисака – стамбена зона
PMM2	Зона високих притисака – главни ценовод
PMM3	Стамбена зона и школа
PMM4	Чвор на главном ценоводу
PMM5	Зона велике потрошње (стамбена зона, школе, геронтолошки центар)
PMM6	Стамбена зона
PMM7	Стамбена зона
PMM8	Зона велике потрошње (основне, средња школа, вртић, Д.З., ПИК Бечеј...)
PMM9	Зона високих притисака – стамбена зона
PMM10	Зона велике потрошње (ПИК Бечеј и гимназија, СЦ Младост...)
PMM11	Зона високих притисака – индустријска зона

## 4. Резултати и дискусија

Процентулана покривеност мреже по комбинацијама



Процентулана покривеност мреже појединачно по сензорима



- Варијанта са свих 11 и све комбинације са 10 сензора притиска дају исте резултате
- Приступа се анализи покривености сензора појединачно
- Помоћу кода написаног у EPANET-MATLAB алату за потребе овог рада, број мерних места за постављање сензора притиска за детекцију губитака у водоводној мрежи се, са почетно предложених 11 мерних места, спустио на усвојених 5 мерних места.
- Усвојена мерна места:

Ред. бр.	Назив предложеног мерног места	Junction ID	Индекс чвора
1	PMM2	Junction 411	376
2	PMM5	Junction 393	321
3	PMM7	Junction 345	285
4	PMM8	Junction 316	261
5	PMM11	Junction 44	393



## 5. Закључак

Код написан у овом раду:

- Олакшава анализу распореда и броја сензора притиска у моделима водоводних мрежа,
- Помаже при одређивању оптималног броја и распореда сензора,
- Има могућности за даље модификације и развој.

Може се закључити да код написан за потребе овог рада испуњава задатак одређивања оптималног броја и позиције сензора притиска у водоводној мрежи, у циљу детекције губитака.

**ХВАЛА НА ПАЖЊИ**