

**ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**



СИНТЕЗНИ ПРОЈЕКАТ

ПРЕДМЕТ:

МЕРЕЊА У ХИДРОТЕХНИЦИ

ТЕМА:

**ПРОЈЕКТОВАЊЕ И ИСПИТИВАЊЕ СИСТЕМА ЗА
МЕРЕЊЕ ПРОТОКА КИШНИЦЕ СА ДЕЛА КРОВА
ИНСТИТУТА ЗА ХИДРОТЕХНИКУ**

Кандидат:

Милош Којић 121/07

Ментор:

Проф. Др. Душан Продановић

Октобар, 2013.

САДРЖАЈ

	Страна
I. УВОД	3
II. ПРЕГЛЕД МЕТОДА МЕРЕЊА ПРОТОКА	4
a) Уопште о методама мерења протока.....	4
- Методе мерења протока код течења под притиском.....	4
- Методе мерења протока код течења са слободном површином	4
б) Могуће варијанте мерења протока кишнице са дела крова ИХ.....	5
- Варијанта 1: истицање из кутије са отворима.....	5
- Варијанта 2: преливање преко троугаоног прелива.....	6
- Варијанта 3: течење под притиском кроз ЕМ мерач.....	8
III. ОПИС ДИСПОЗИЦИЈЕ СИСТЕМА	10
a) Анализа карактеристичних кишна.....	10
б) Опис диспозиција мерног система.....	12
IV. МЕТОДОЛОГИЈА МЕРЕЊА	15
a) Одабир мерача за мерну кутију и калибрација мерача.....	15
б) Одабир величине мерне кутије.....	17
в) Провера рада комбинованог система - мерна кутија и ЕМ мерач.....	19
V. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА И ДИСКУСИЈА	22
a) Експеримент 1: Калибрација малог мерача за проток SI+ ЕМ DN8 и одређивање опсега протока које може да мери.....	22
б) Експеримент 2: Калибрација великог ЕМ мерача Данфос и упоређивање са зидним мерачем KROHNE Autofluks ICF110 DN200.....	23
в) Експеримент 3: Мерења опсега протока великог ЕМ мерача у зависности од његовог положаја.....	24
г) Експеримент 4: Испитивање утицаја смањења запремине мерне кутије на преливања преко троугаоног прелива.....	25
д) Експеримент 5: Калибрација троугаоног прелива.....	27
ђ) Експеримент 6: Провера могућности мерног система да мери нагле промене протока при малим и великим протоцима.....	31
VI. ПРЕДЛОГ ФИНАЛНОГ РЕШЕЊА СА ПРЕДМЕРОМ	35
a) Предлог финалног решења.....	35
б) Предмер потребног материјала.....	36
VII. ЛИТЕРАТУРА	37

I. УВОД

Са савременим тенденцијама унапређења заштите животне средине и побољшања услова живота људи уопште, расте потреба за познавањем и контролом утицаја које човек има на животну средину. Основни процес који регулише промене унутар животне средине и од којег зависи целокупан живот на Земљи је кружење воде у природи. Познавање овог сложеног процеса захтева познавање његових појединачних делова, као и како промене унутар једног дела утичу на цео процес.

Веома битан део овог процеса је кишни отицај, а пре свега отицај са урбаних површина, које су место живота највећег броја људи на планети. Према последњем извештају Уједињених Нација проценат урбане популације на планети је достигао 50%, а у развијеним земљама 80% . У урбаним срединама због повећаног учешћа непропусних површина долази до промена у хидролошком циклусу (слика 1.1) – количина инфилтриране и испарене воде се смањује, а површински отицај значајно повећава. Овај отицај чине отицаји са саобраћајница, са кровова и са зелених површина, и они се одвојено посматрају због различитих врста загађења која се у њима налазе, односно параметара квалитета који се мере. Квалитет воде која отиче односно параметри квалитета представљају показатеље човековог утицаја и као такви захтевају нашу пажњу. Међутим квалитет је у уској вези са квантитетом јер утицај присуства одређене материје, у одређеној концентрацији, у кишници итекако зависи од количине воде. Утицај ће бити мањи уколико су количине воде веће. Због тога је познавање квантитета кишнице битно, а основни показатељ квантитета је проток.

Овај рад се бави пројектовањем и испитивањем система за мерење протока кишнице и то оног дела урбаног кишног отицаја који се односи на отицај са кровова, где се као репрезентативан узорак користи део крова Института за Хидротехнику.



Слика 1.1. Утицај урбанизације на количину кишног отицаја

II. ПРЕГЛЕД МЕТОДА МЕРЕЊА ПРОТОКА

Проток представља протеклу запремину у јединици времена. То је изведена величина и не може се мерити непосредно. Најчешћи начини мерења протока су волуметријски, где се мери запремина воде која истекне за одређено време или се пак мери брзина воде у неколико тачака па се интеграљењем брзина по површини протицајног профила добија проток. Методе мерења протока пре свега зависе од врсте течења воде, да ли је течење под притиском или течење са слободном површином.

Код течења под притиском за мерења се најчешће користе мерни претварачи који посредно мере проток преко неке друге физичке величине. На основу мерног принципа они се деле на:

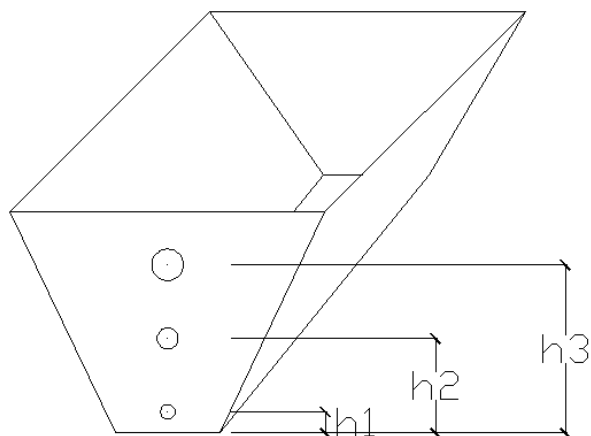
- Волуметријске-мере се елементарне запремине
- Разлике притисака-мери се пад енергије тока услед савлађивања неке препреке
- Фреквенције вртлога-мери се фреквенција вртлога низводно од препреке
- Брзине у тачки или дуж одабране линије-ЕМ, УЗВ, ласер, топли филм
- ЕМ (електромагнетни) претварачи раде на принципу Фарадејевог закона индукције-флуид се креће брзином и кроз цев око које се прави магнетно поље константне јачине B услед чега се индукује EMS у електродама мерача
- УЗВ (ултразвучни) Доплер анемометар користи одбијање звука од делића који се крећу заједно са флуидом и праве доплеров помак фреквенције звука (захтева присуство одређених честица, да би се мерење вршило у чистој води мора се вршити засејавање-додавање честица одређене величине)

Код течења са слободном површином постоји низ мерних метода које се могу поделити на:

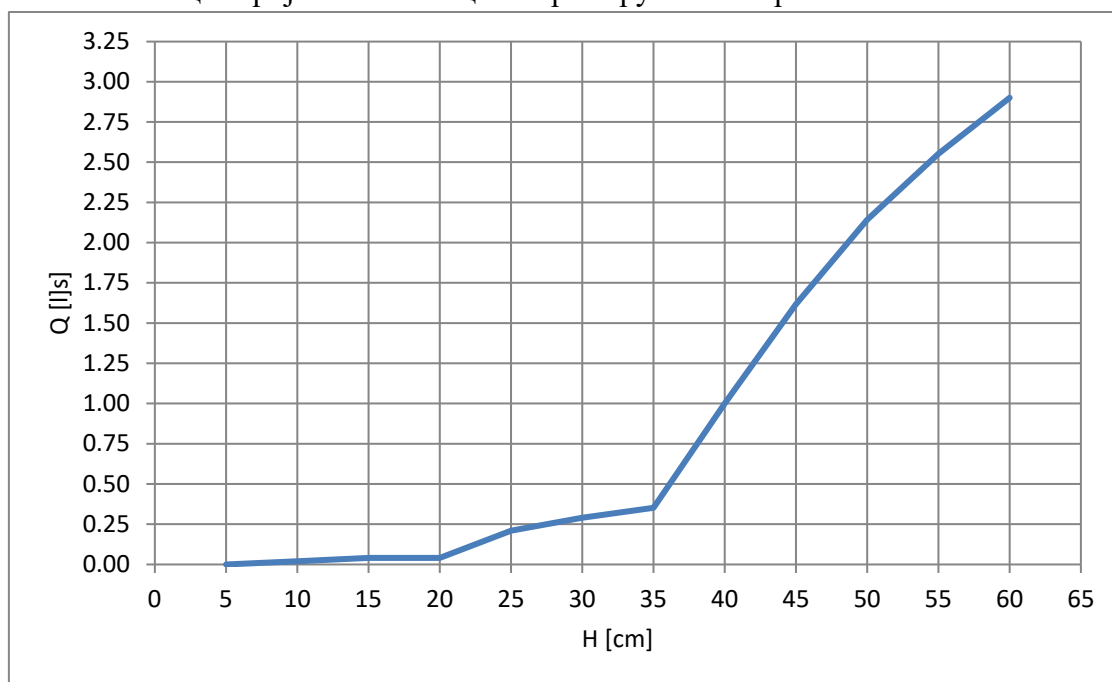
- Методе које се базирају на мерењу непоремећене дубине и уз предпостављене хидрауличке параметре, применом динамичке једначине, рачуна се проток
- Методе базиране на мерењу једне брзине и дубине, при чему постоји веза између мерене брзине и средње профилске брзине (крива протока)
- Методе којима се природни ток ремети, па се успоставља веза између поремећене дубине и протока-мерна сужења, мерни прагови, преливи практичног профила, оштроивични преливи
- Разне трасерске методе (у флуид се у једном тренутку убаци трасер, или се додаје континуално, па се низводно прати промена концентрације)

б) Могуће варијанте мерења протока кишнице са дела крова ИХ

Варијанта 1: Мерна кутија са кружним отворима на једном крају кроз које истиче вода. Мерио би се ниво воде у кутији и на основу њега рачунао проток, где би се поступком калибрације утврдила веза између истицајног протока и нивоа воде у кутији.



Слика 1: Скица варијанте 1- истицање кроз кружне отворе



Слика 2: Зависност протока од нивоа воде у кутији за случај варијанте 1:
 $h_1 = 5\text{ cm}$, $h_2 = 20\text{ cm}$, $h_3 = 35\text{ cm}$ и $d_1 = 0.5\text{ cm}$, $d_2 = 2\text{ cm}$, $d_3 = 5\text{ cm}$

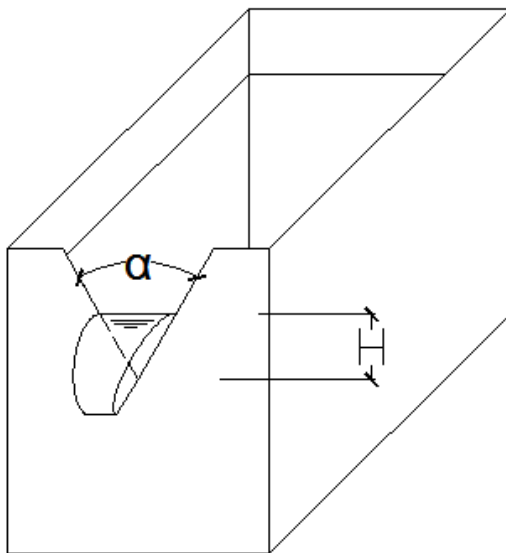
Проток се рачуна по формули:

$$Q_i = \begin{cases} C_q * \frac{d_i^2 \pi}{4} * \sqrt{2g(H - h_i)} , & H > h_i \\ 0 , & H \leq h_i \end{cases}$$

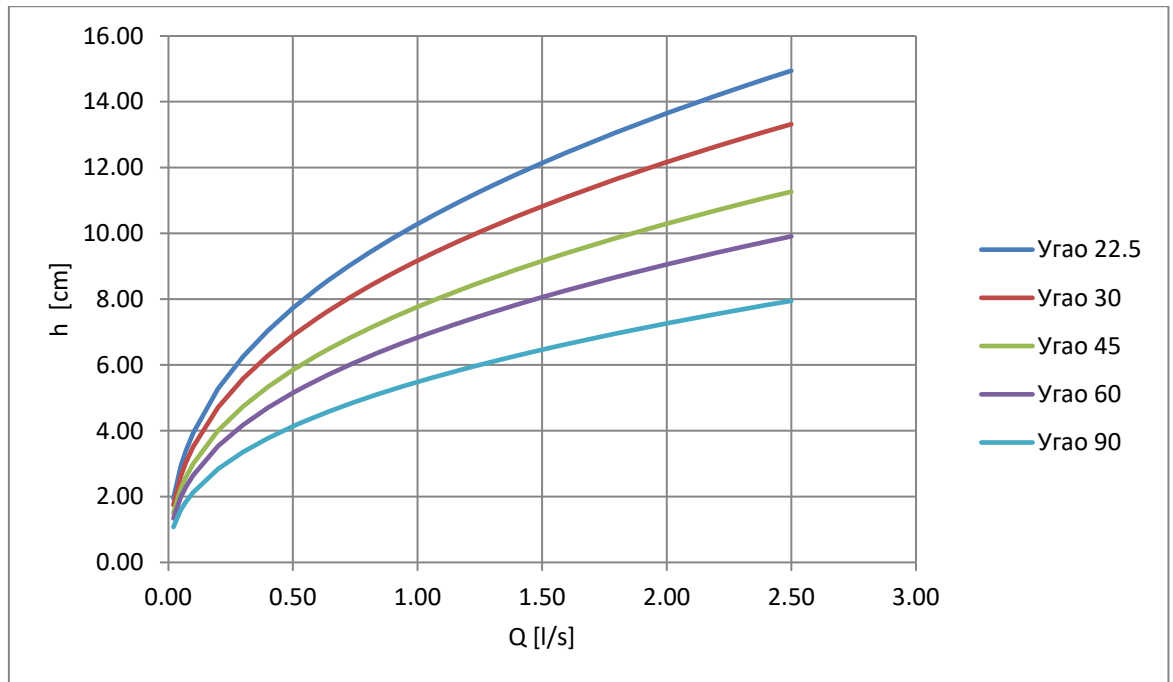
$$Q = \sum_1^3 Q_i \quad (1)$$

где су: Q-проток[l/s]; C_q-коэффицијент истицања[-]; d_i-пречник отвора[dm]; H-ниво воде у кутији[dm]; h_i-одстојање осовине отвора од дна кутије[dm]; g-гравитационо убрзање[dm/s²]

Варијанта 2: Мерна кутија са троугаоним (Thomson) преливом на једном крају. Мери се висина преливног млаза и из ње одређује проток.



Слика 3: Скица варијанте 2 - течење са слободном површином, преливање преко троугаоног прелива



Слика 4: Зависност протока преко Томсоновог прелива од висине преливног млаза, H (слика 3), за различите углове прелива, α (слика 3), на основу формуле 2

Проток преко прелива се рачуна по формули¹:

$$Q = \frac{8}{15} C \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \sqrt{2g} \cdot (h - k)^{\frac{5}{2}} \quad (2)$$

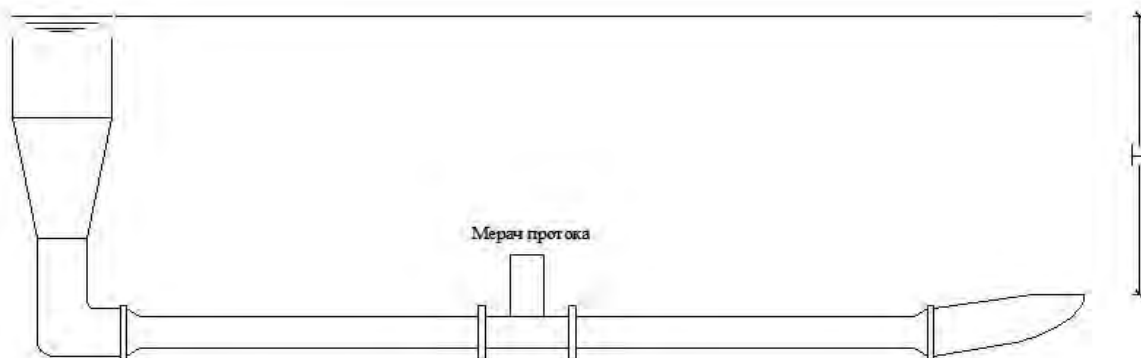
$$C = 0.607165052 - 0.000874466963\alpha + 6.10393334 \times 10^{-6} \alpha^2$$

$$k = 0.004416816 - 0.0001034964\alpha + 1.005288321 \times 10^{-6} \alpha^2 - 3.23744667 \times 10^{-9} \alpha^3$$

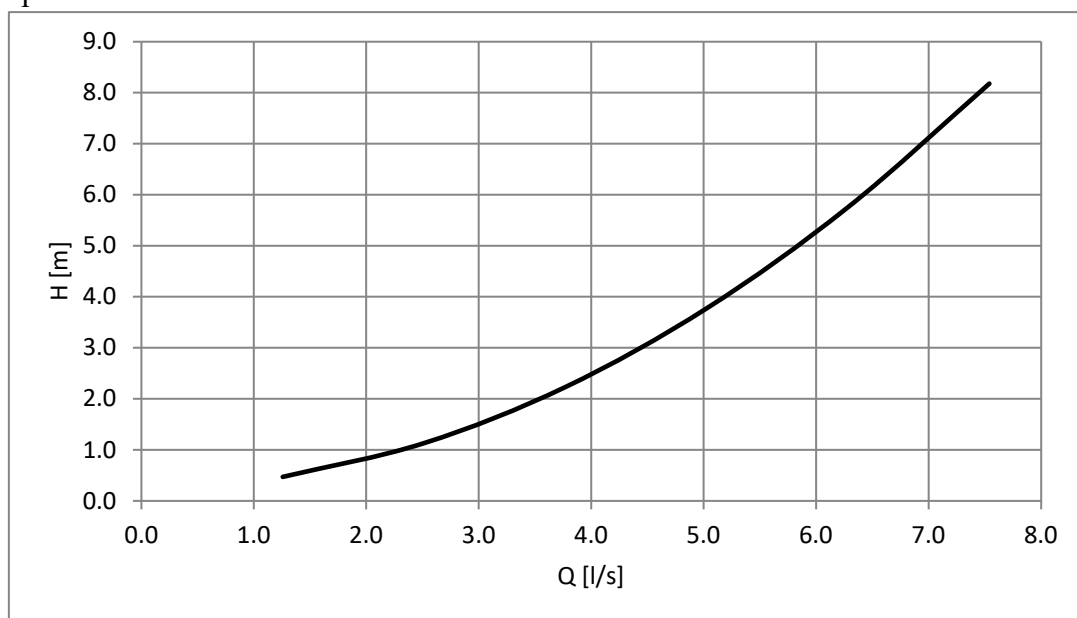
где су: Q -проток [m^3/s]; C -коэффицијент преливања[-]; α -угао прелива [$^\circ$]; h - висина преливног млаза [m]; g -гравитационо убрзање [m/s^2]; k -фактор корекције висине преливног млаза [m]

¹ Формула за израчунавање протока је из Water Measurement Manual, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1997, прилагођена СИ јединицама

Варијанта 3: Цев под притиском на коју би се ставио електромагнетни мерач протока. Течење под притиском би се обезбедило издицањем излива на одређену висину изнад мерача.



Слика 5: Скица варијанте 3– течење под притиском кроз цевовод са ЕМ мерачем протока



Слика 6: Зависност висине формираног успора испред мерача од протока кроз мерач

Висина успора се рачуна по формули:

$$H = \left(\sum \xi + \lambda \frac{L}{D} \right) * \frac{\left(\frac{4Q}{D^2 \pi} \right)^2}{2g} \quad (3)$$

где су: H-висина успора[m]; ξ -коэффициент локалног губитка[-]; λ -коэффициент линијског губитка[-]; L-дужина цеви[m]; D-пречник цеви[m]; Q-проток кроз мерач[m³/s]; g-гравитационо убрзање[m/s²]

$$\sum \xi = \xi_{\text{кол}} + \xi_{\text{суж}} + \xi_{\text{прош}} + \xi_{\text{изл}} = 2.5^2$$

$$\lambda = \frac{1}{2 \log\left(\frac{k}{3.71D}\right)}^2 \quad k=0.01 \text{ mm}, \quad D=0.04 \text{ m} \quad L=1.5 \text{ m} \quad g=9.81 \text{ m/s}^2$$

² Вредности коэффицијената локалних губитака усвојени су на основу препоруке литературе: Хадин Г. Увођење у хидраулику, Грађевински факултет, Београд, 2002

На основу анализе варијаната 1,2,3 формира се следећи закључак:

- Варијанта 1
За пречнике отвора $d_1=5$ mm, $d_2=20$ mm, $d_3=50$ mm и одстојања осовина отвора од дна кутије $h_1 = 5$ cm, $h_2 = 20$ cm, $h_3 = 35$ cm добија се мерени опсег протока од 0,01 до 3 l/s при дубини воде у кутији од 10 до 60 cm. Зависност протока од дубине воде у кутији приказана је на слици 2. Због недовољног опсега и велике потребне запремине, ова варијанта се неће разматрати.

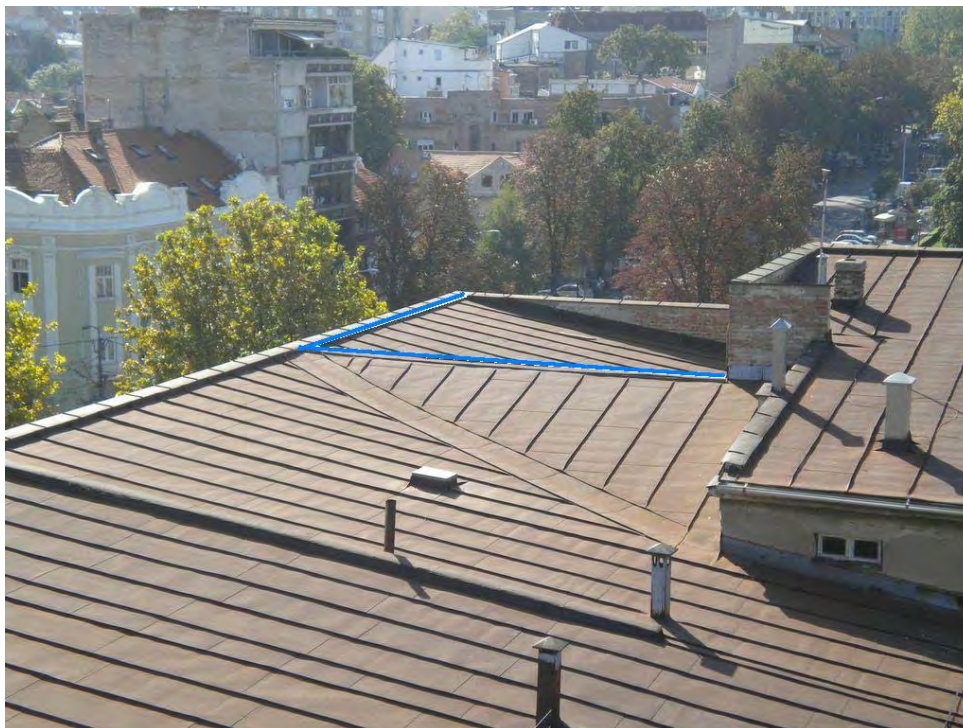
- Варијанта 2
Троугаони прелив није погодан за мерење малих протока, испод 0,2 l/s, јер се при таквим условима преливања јавља велика грешка у мерењу. При протоку од 0,2 l/s висина преливног млаза за преливе под углом од 60° и 90° износи 3, односно 2 cm. Веза између висине преливног млаза и протока, за прелив под различитим угловима, приказана је на слици 4.

- Варијанта 3
Цев са ЕМ мерачем, која мора бити стално под притиском да би мерач правилно функционисао, при великим протоцима, формира успор. Овај успор може изазвати загушење доводне цеви, па чак и штету услед изливања воде на улазу у цев. Зависност величине успора од протока приказана је на слици 6.

- У раду ће бити испитане посебно варијанте 2, течење са слободном површином, 3, течење под притиском, и комбинација варијанти 2 и 3 тј. комбинација две мерне методе, течења под притиском и течења са слободном површином.

III. ОПИС ДИСПОЗИЦИЈЕ СИСТЕМА

Локација: Булевар Краља Александра 73, Београд, Србија
Део крова Института за Хидротехнику површине 100 m²



Слика 7: Део крова Института за Хидротехнику површине 100 m² који служи као репрезентативан узорак за анализу протока кишнице са кровова

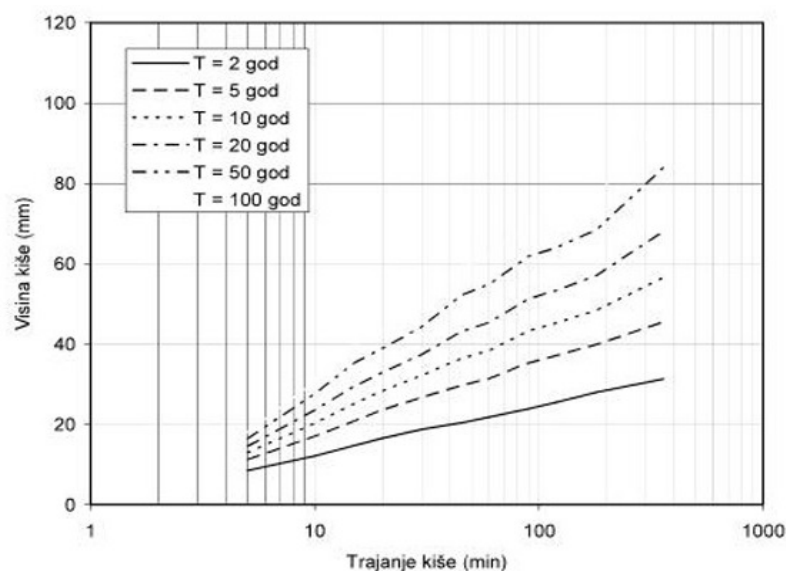
Прорачун отицаја са крова ради се применом рационалне методе и коришћењем постојећих крива зависности интензитет – падавине – трајање. Повратни период кише за који се ради прорачун је 2 године, јер то одговара правилима пројектовања канализације за атмосферску воду у подручјима малог ризика.

Претпоставља се да је коефицијент отицаја $c=1.0$ (тј. да се сва количина кишнице претвара у отицај).

Табела 1: Прорачун отицаја са дела крова ИХ од киша различитог трајања, повратног периода $T = 2$ године

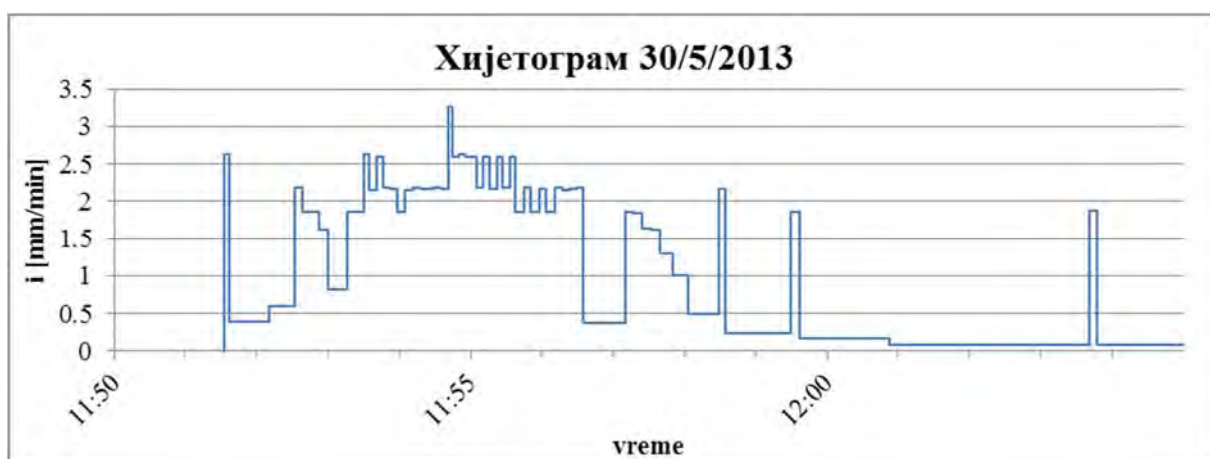
Трајање кише	t [min]	5	10	15	20
Укупне падавине	P [mm]	9	13	15	18
Интензитет кише	i [mm/min]	1.8	1.3	1.0	0.9
Укупан отицај	Q [l/s]	3.00	2.17	1.67	1.50

$$i=P/t \quad Q=i*c*A \quad A=100m^2 \quad c\approx 1$$



Zavisnost HTP za pluviografsku stanicu Beograd-Vračar (period obrade 1925-1989); izvor: Institut za hidrotehniku (1990)

Слика 8: Криве зависности висина кише - трајање кише - повратни период за pluviografsku stanicu Beograd-Vračar



Слика 9: Хијетограм интензитета падавина током једне кишне епизоде дана 30/5/2013 (осмотрено на експерименталном полигону Грађевинског факултета, А. Тодоровић)

На основу анализа просечних киша за Београд, повратног периода $T=2$ године, одређен је максимални проток од 3 L/s . Међутим анализа је спроведена и за кишну епизоду дана 30/5/2013, која је установљена као изузетан догађај, и мерена је кишомером постављеним на самој локацији. На основу података са слике 9 одређен је изузетан интензитет од 3.25 mm/min , који би на површини крова изазвао отицај од 5.4 L/s . Проток од 5.4 L/s ће послужити као гранични, да би се испитало како се мерни систем понаша у изузетним околностима.

Будући да је планирано да се мерни систем користи и за одређивање квалитета кишног отицаја, потребно је одредити и минимални мерни проток. Како још увек не постоје прелиминарне анализе квалитета кишнице на овом подручју, а познавајући феномен првог отицаја ("first flush") који уједно и носи највећу концентрацију и масу загађења, усвојиће се доста строг критеријум за минимални проток и захтеваће се да мерни систем са довољном тачношћу мери и проток од 0.02 L/s . Дакле, опсег протока који ће

се испитати је од 0.02 до 3.5 L/s и провериће се понашање система при већим протоцима, до 5 L/s.

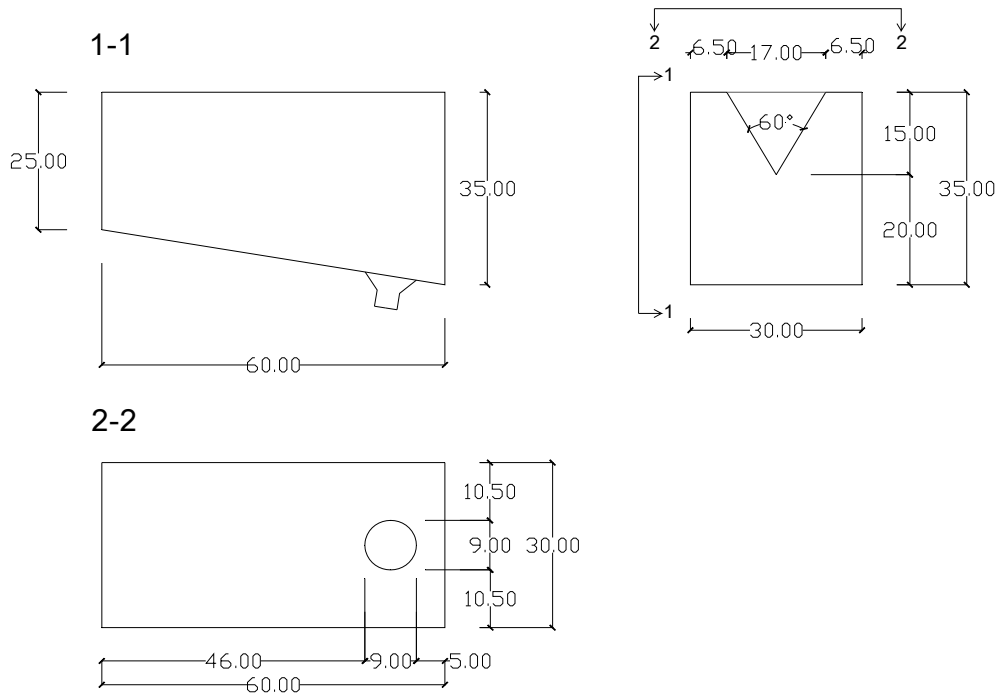
Предвиђа се израда мерне кутије која ће на једном свом крају имати троугаони прелив са углом $\alpha=60^\circ$, а на дну кутије ће бити кружни отвор пречника 90 mm и конусно сужење на 40 mm на које се качи црево пречника 40 mm којим се вода спроводи ка ЕМ мерачу протока (слика 10).

Вода се у кутију доводи вертикалном цеви дужине 7 m која симулира олук (слика 13), а цев је цревом прикачена на хидрант са затварачем. Затварачем се на хидранту регулишу протоци који иду кроз систем (слика 14).

Ради смањења запремине система, да би се побољшала динамика система и због економичности, и постизања што тачнијих мерења, испитиваће се различите диспозиције мерне кутије као и различити положаји мерача и диспозиције довода до мерача (слике 10, 11,12).

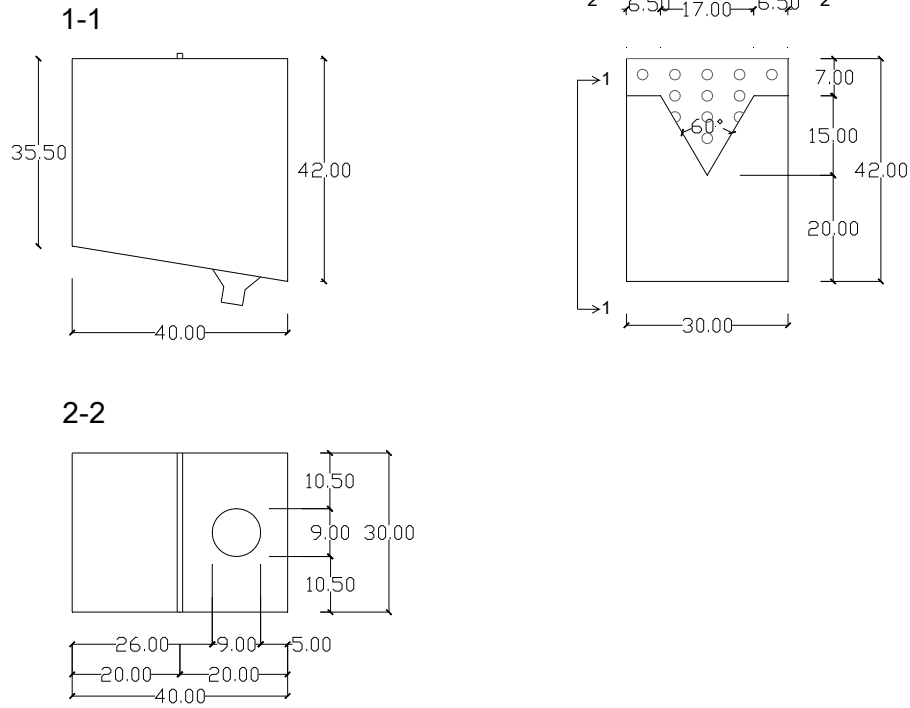
Испитиваће се два различита положаја ЕМ мерача, са различитим ΔH које диктира протоке кроз мерач, и испитиваће се три различите диспозиције мерне кутије у циљу смањења запремине целокупног мерног система.

Dispozicija 1



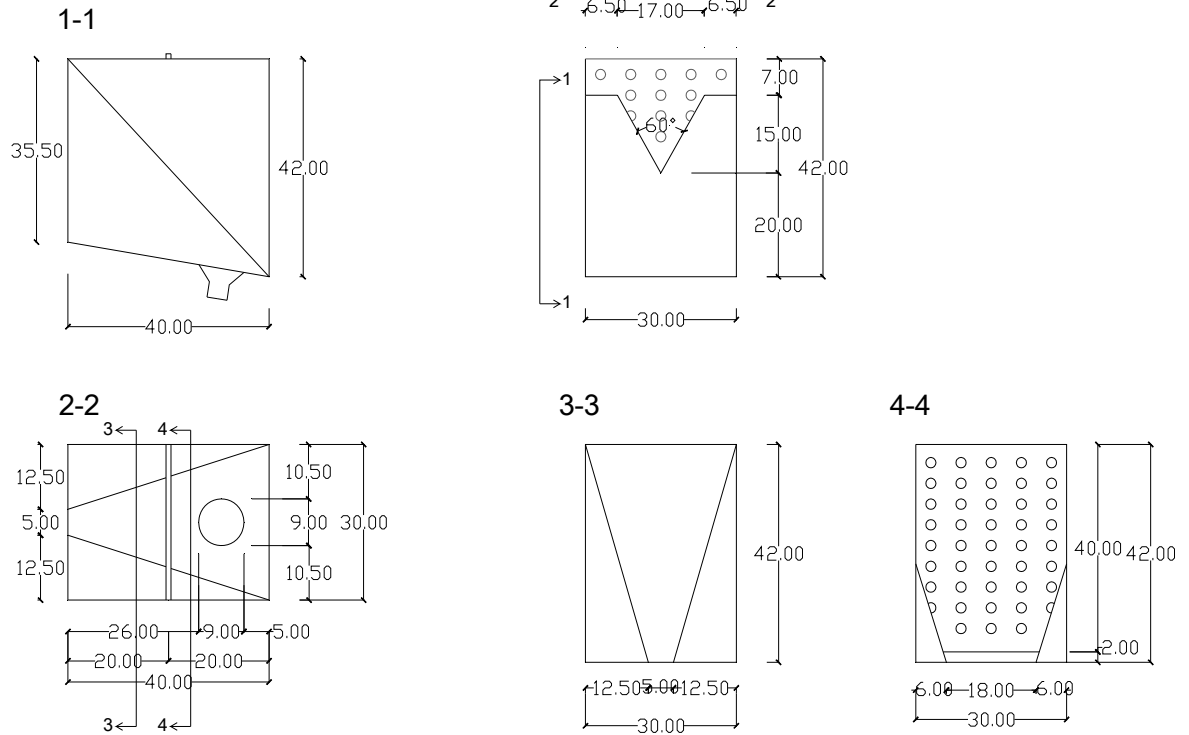
Слика 10: Прва диспозиција мерне кутије, дужина кутије 60 cm

Dispozicija 2



Слика 11: Друга диспозиција мерне кутије, дужина кутије 40 см, постављен умиривач

Dispozicija 3



Слика 12: Трећа диспозиција мерне кутије, дужина кутије 40 см, постављен умиравач и „бочним крилима“ смањена расположива запремина кутије



Слика 13: Цев која симулира олук



Слика 14: Хидрант са затварачем

IV. МЕТОДОЛОГИЈА МЕРЕЊА

а) Одабир мерача за мерну кутију и калибрација мерача

На располагању су два електро-магнетна (ЕМ) мерача: „мали“ мерач, SI+ ЕМ DN8, и „велики“ мерач Данфос MAGFLO 5100 DN40. За оба мерача ће бити одређен опсег протока који могу да мере. Уколико се покаже да су протоци на „малом“ мерачу исувише мали, даља испитивања се настављају са „великим“ ЕМ мерачем.

Велики мерач је потребно и калибрисати у односу на зидни мерач KROHNE Autofluks ICF110 DN200 и одредити опсег протока који зависи од његовог висинског положаја у односу на мерну кутију и троугаони прелив.

- *Експеримент 1: Калибрација малог мерача* за проток SI+ ЕМ DN8 и одређивање опсега протока које може да мери:

Мали мерач SI+ качи се на буре пречника $D=50$ cm и укупне запремине 120 l градуисано на сваких 10 l. Буре се напуни до запремине од 60 l при чему је ниво воде у бурету 30 cm, затим се пусти да вода истиче кроз мерач и прати се пад нивоа воде и запремине воде у бурету, у току времена. Интеграцијом промене запремине воде у току времена добија се проток који се затим повезује са нивоом воде.

- *Експеримент 2: Калибрација великог ЕМ мерача Данфос* и упоређивање са зидним мерачем KROHNE Autofluks ICF110 DN200 у лабораторији ИХ Велики мерач се качи на хидрант, који је једини „потрошач“ у току споровођења експеримента, и при различитим отвореностима затварача на хидранту, бележе се вредности протока приказане на мерачу Данфос и на зидном мерачу KROHNE.

- *Експеримент 3: Мерења опсега протока великог ЕМ мерача* у зависности од његовог положаја и упоређивање резултата

Велики мерач се качи на мерну кутију, при диспозицији 1 мерне кутије, одређује се његов висински положај тако да разлика између коте нуле троугаоног прелива и коте излива мерача буде 38,7 cm. Пуштају се различити протоци кроз систем и одређују се најмањи проток који мерач може да измери, као и највећи пре него што почне преливање преко троугаоног прелива. Мења се положај мерача тако да разлика између коте нуле троугаоног прелива и коте излива мерача буде 25 cm, а затим се понавља експеримент.



Слика 15: Мали мерач протока SI+ EM DN8 и инсталација за калибрацију мерача



Слика 16: Велики мерач Данфос у положају 1, $\Delta H=38,7$ cm

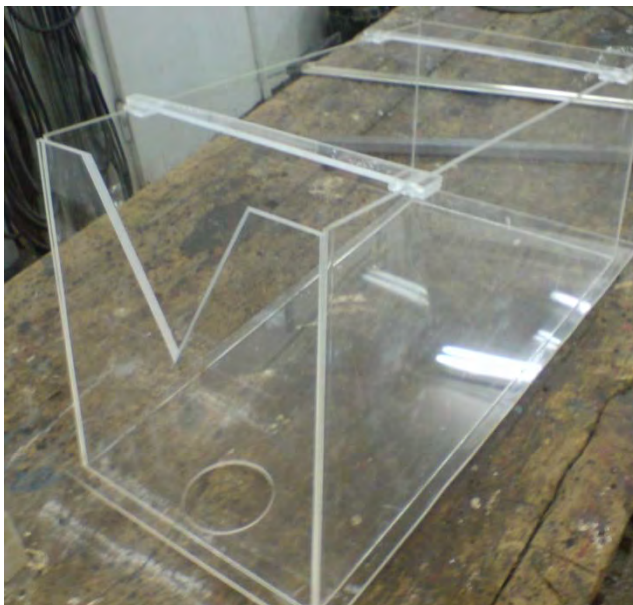


Слика 17: Велики мерач Данфос у положају 2, $\Delta H=25$ cm

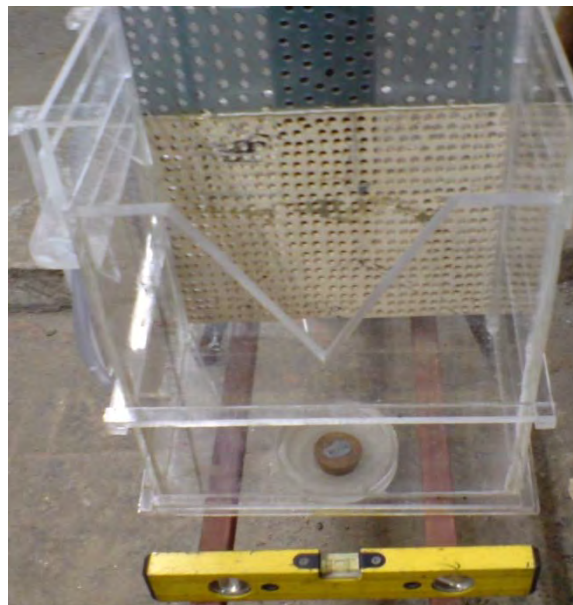
б) Одабир величине мерне кутије

- *Експеримент 4: Испитивање утицаја смањења запремине мерне кутије на преливања преко троугаоног прелива*

Отвор на дну кутије се затвара и вода прелива само преко троугаоног прелива. Кроз вертикалну цев дужине 7 m (која симулира олук) пушта се вода у кутију. Пуштају се различити протоци. Са мерне траке, залепљене на кутију, читава се висина преливног млаза преко троугаоног прелива и бележи се заједно са показивањем на зидном мерачу. Експеримент се прво врши на диспозицији 1 (дужина кутије је 60cm, без умиривача), а затим на диспозицији 2 (дужина кутије је 40cm, са умиривачем на 20cm).



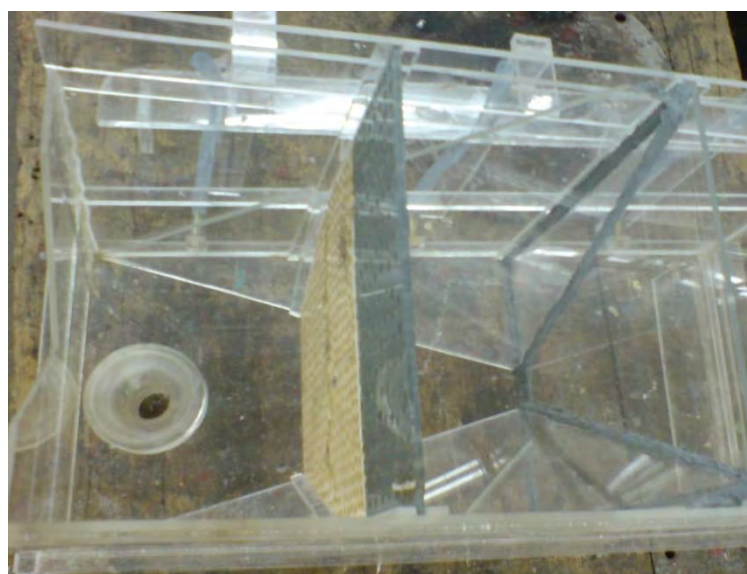
Слика 18: Мерна кутија, диспозиција 1



Слика 19: Умиривач



Слика 20: Мерна кутија, диспозиција 2



Слика 21: Мерна кутија, диспозиција 3

в) Провера рада комбинованог система: мерна кутија и ЕМ мерач

- Спајање мерне кутије и мерача

Постављање повољније диспозиције мерне кутије (одређене у експерименту 4), и спајање мерача са кутијом уз његово висинско позиционирање (одређено у експерименту 3).

- *Експеримент 5: Калибрација троугаоног прелива*

У овом експерименту вода тече кроз инсталацију преко прелива и кроз ЕМ мерач, па је потребно мерити и збирни проток да би било могуће калибрисати троугаони прелив. Збирни проток се мери помоћу „зидног“ мерача, који је тако постављен да мери укупан проток који се упушта у инсталацију. Из разлике збирног протока и протока који иде кроз ЕМ мерач на инсталацији, одређује се проток који прелива преко троугаоног прелива.

Задаје се проток постављањем затварача на хидранту у одређени положај, затим се читавају зидни мерач, велики мерач и висина преливног млаза (са мерне траке). Читања се понављају за различите протоке. Ова врста експеримента се ради за диспозицију 2 и диспозицију 3 мерне кутије.

- *Експеримент 6: Провера „динамике“ тј. могућности мерног система да мери нагле промене протока при малим и великим протоцима*

Велики протоци: Врше се нагле промене положаја затварача на хидранту, у одређеним временским интервалима (нпр. сваких 60 секунди), и читавају се вредности протока на зидном мерачу. Истовремено се записују показивања великог мерача и висина преливног млаза (са мерне траке) сваке 2 секунде.

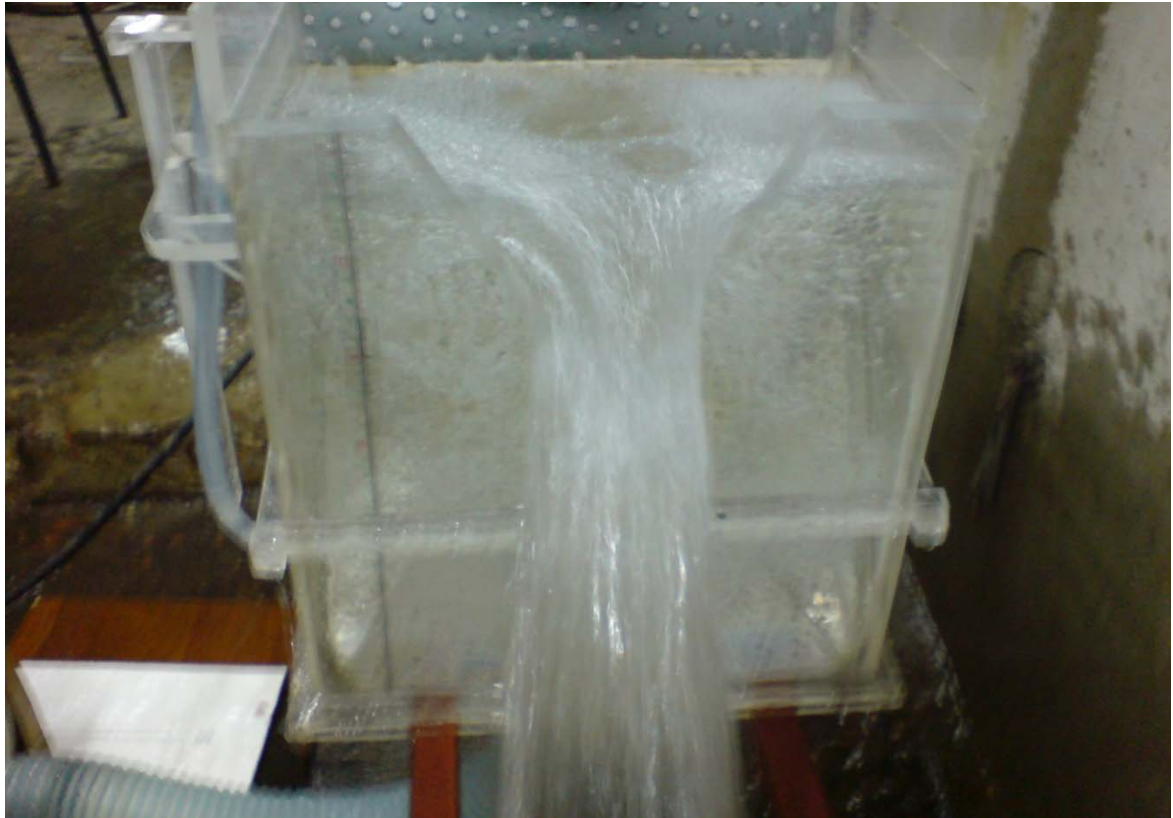
Мали протоци: Градуисано буре из експеримента 1 се напуни до запремине од 100 l. На затварач, који се налази на дну бурета, качи се црево, чији се други крај спушта у мерну кутију. Нагло се мења положај затварача (отвара се и затвара у одређеном временском интервалу) и мери се време истицања воде из бурета, а истовремено се читају протоци на великом мерачу.



Слика 22: Мерна кутија + мерач, диспозиција 2 , калибрација прелива, проток кроз систем 1.8 l/s



Слика 23: Мерна кутија + мерач, диспозиција 2, провера динамике система, тренутни проток кроз систем 3.5 l/s



Слика 24: Мерна кутија + мерач, диспозиција 3, калибрација прелива, проток кроз систем 4.1 l/s

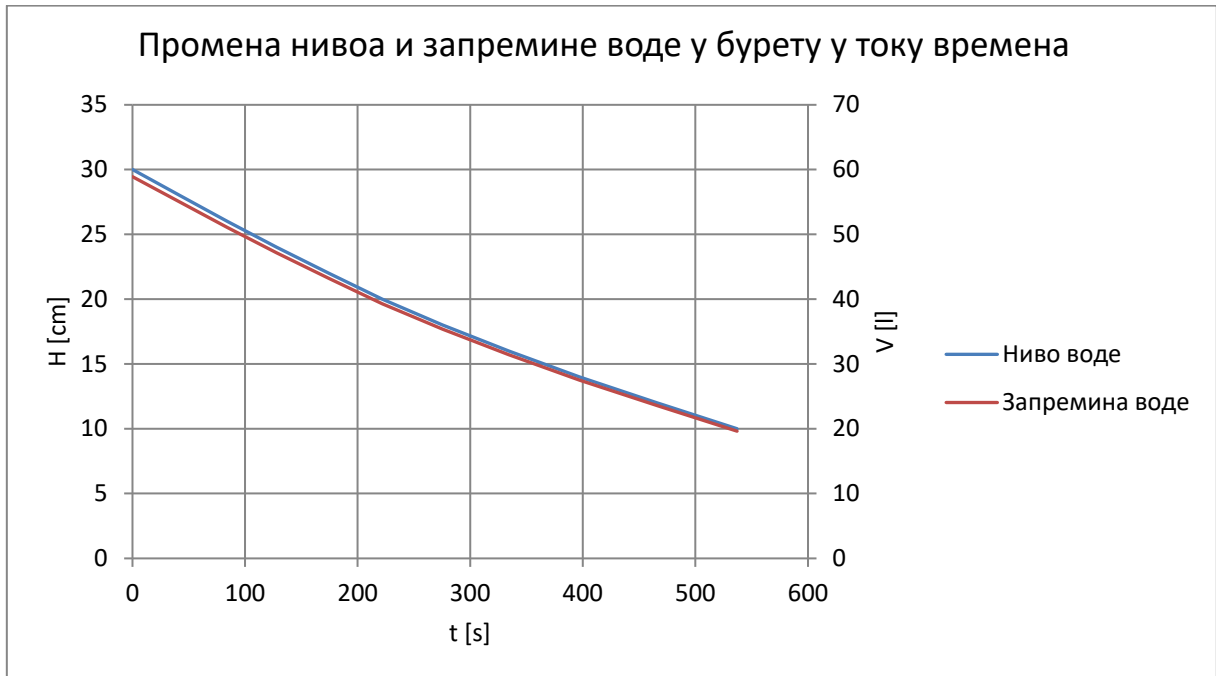


Слика 25: Мерна кутија + мерач, диспозиција 3, провера динамике система, тренутни проток кроз систем 2.8 l/s

V. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА И ДИСКУСИЈА

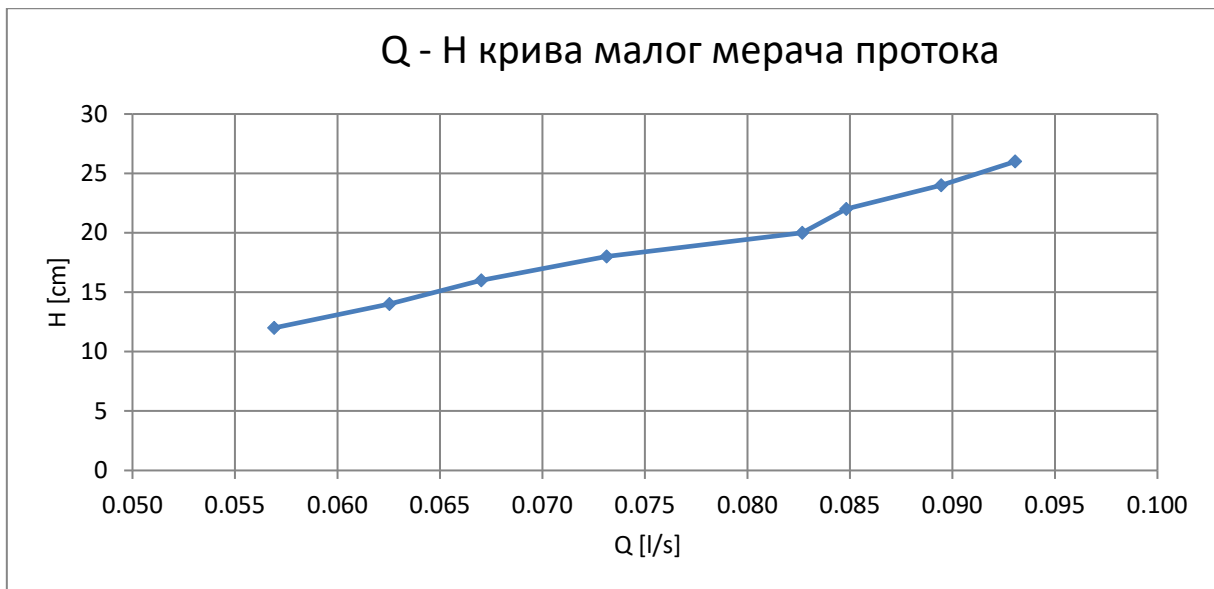
Експеримент 1

На слици 26 је приказан резултат мерења промена нивоа и запремина воде у бурету у току времена. Интеграцијом површина испод дијаграма промене запремине воде одређује се проток кроз мали мерач.



Слика 26: Смањење нивоа и запремине воде у бурету у току времена, истицањем воде кроз мали мерач SI+ EM

На слици 27 је приказан резултат мерења протока кроз мали мерач SI+ EM помоћу бурета. За „надслој“ воде у бурету од 15 – 30 cm, колико се очекује да ће бити на будућој инсталацији, могуће је измерити проток од 0.055 до 0.095 l/s. То је исувише мало за потребе мерног система, те се при даљим испитивањима овај EM мерач (SI+ EM) неће користити, већ се прелази на „велики“ EM мерач типа Данфос.



Слика 27: Зависност протока кроз мали мерач SI+ EM од нивоа воде у бурету

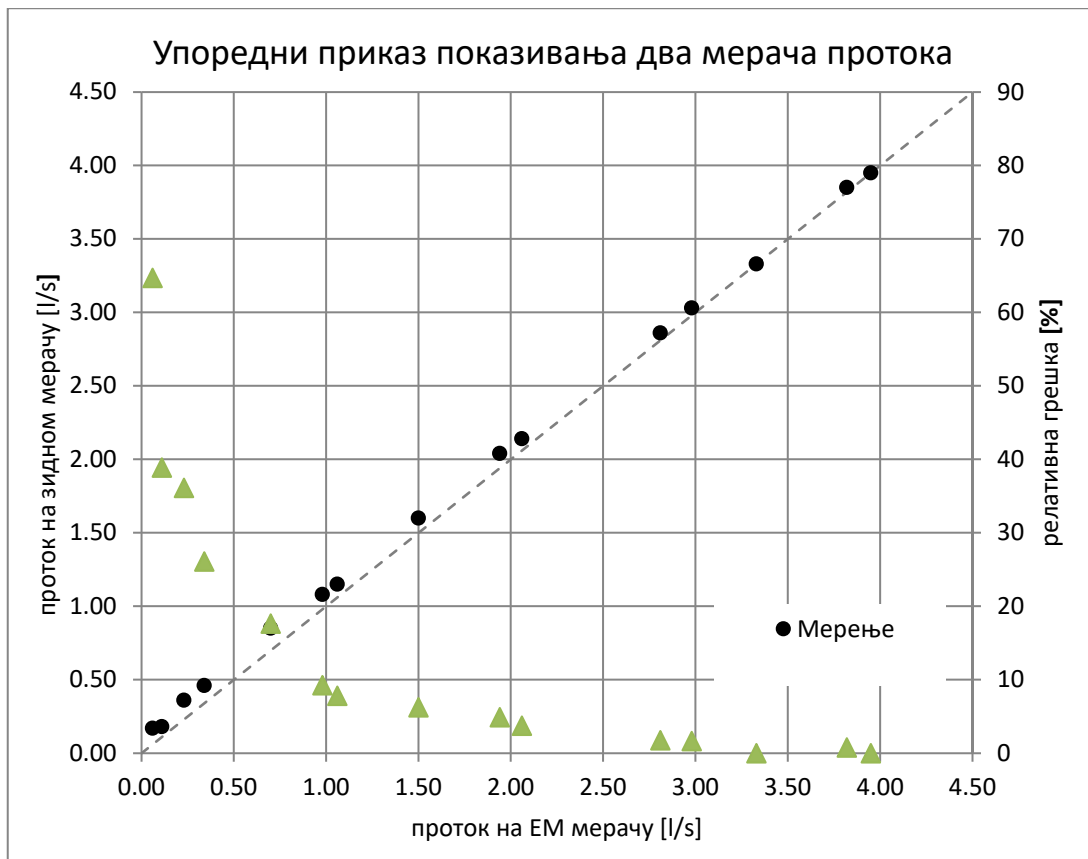
Експеримент 2

На слици 28 је приказан резултат калибрације великог мерача Данфос. Уочава се да је разлика показивања два мерача тј. релативна грешка при малим протоцима велика, док је при већим протоцима веома мала или чак и не постоји. При протоцима испод 1 l/s релативна грешка је 20%, при протоцима испод 0.5 30%, при 0.1 l/s 60%. То може бити последица разлике номиналних пречника мерача; велики мерач Данфос је DN40, а зидни мерач KROHNE је DN200, тако да вода, при истим протоцима, кроз зидни мерач тече мањом брзином. Што се проток повећава, преко 2.5 l/s, то су показивања два мерача скоро иста, тако да је оправдано користити зидни мерач за калибрацију троугаоног прелива када се споје мерна кутија и велики мерач. То је омогућено чињеницом да у тој варијанти мерног система вода тече кроз мерач и преко троугаоног прелива при протоцима од 2 l/s и већим.

Релативна грешка се рачуна по формули:

$$\Delta = \frac{|Q_{\text{зидног мерача}} - Q_{\text{великог мерача}}|}{Q_{\text{зидног мерача}}} \times 100 \quad (4)$$

где је: Δ -релативна грешка [%]; $Q_{\text{зидног мерача}}$ -проток на зидном мерачу KROHNE DN200 [l/s]; $Q_{\text{великог мерача}}$ -проток на великом мерачу Данфос DN40 [l/s].



Слика 28: Дијаграм релативне грешке, у процентима, показивања великог мерача Данфос и зидног мерача KROHNE при различитим протоцима

Експеримент 3

Табела 2: Табеларни приказ минималних протока које ЕМ мерач Данфос може да мери, у зависности од његовог положаја

Положај мерача	ΔH мерача [cm]	Q_{min} [l/s]	Q_{prel} [l/s]
1	38.7	0.02	2.05
2	25.0	0.01	1.60

ΔH мерача-висинска разлика између коте излива мерача и коте нуле троугаоног прелива

Q_{min} -најмањи проток који мерач може да мери у датом положају

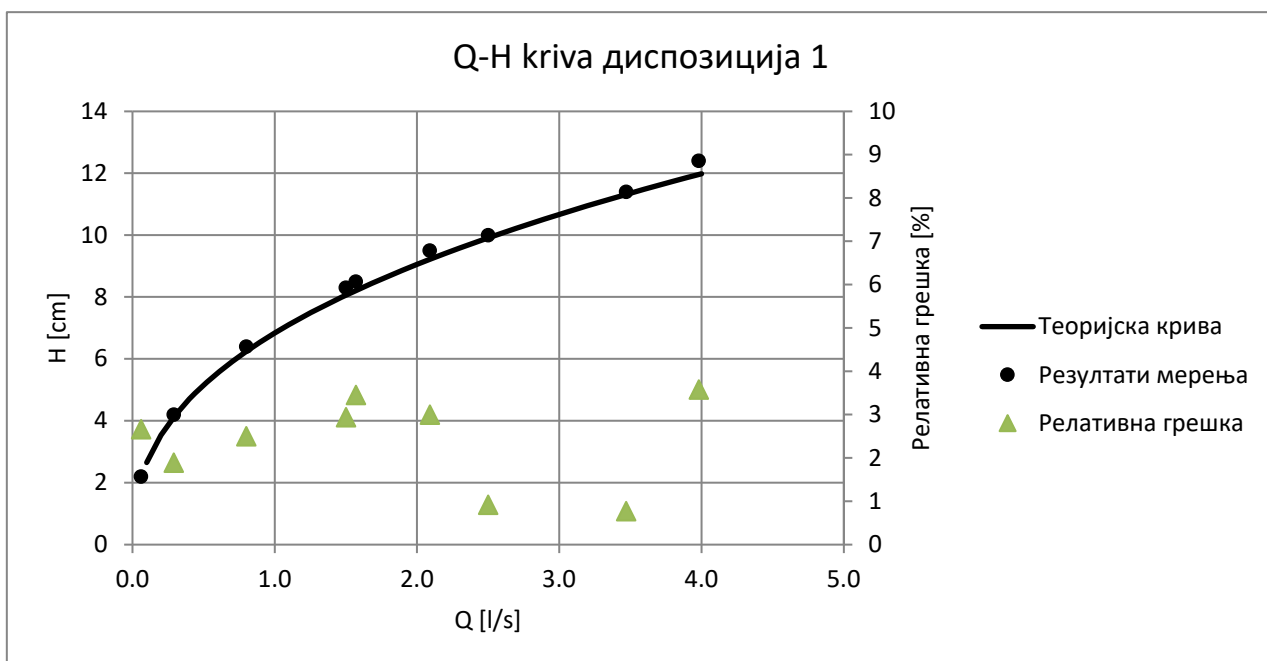
Q_{prel} -проток на мерачу при којем започиње преливање преко троугаоног прелива

У табели 2 приказани су минимални протоци које ЕМ мерач може да мери, у одређеном положају, а који зависе од висинске разлике коте излива мерача и коте нуле Томсоновог прелива (ΔH). Такође су приказани и максимални протоци које мерач може да мери, односно протоци при којима започиње преливање преко Томсоновог прелива (вода тече кроз инсталацију преко прелива и кроз ЕМ мерач).

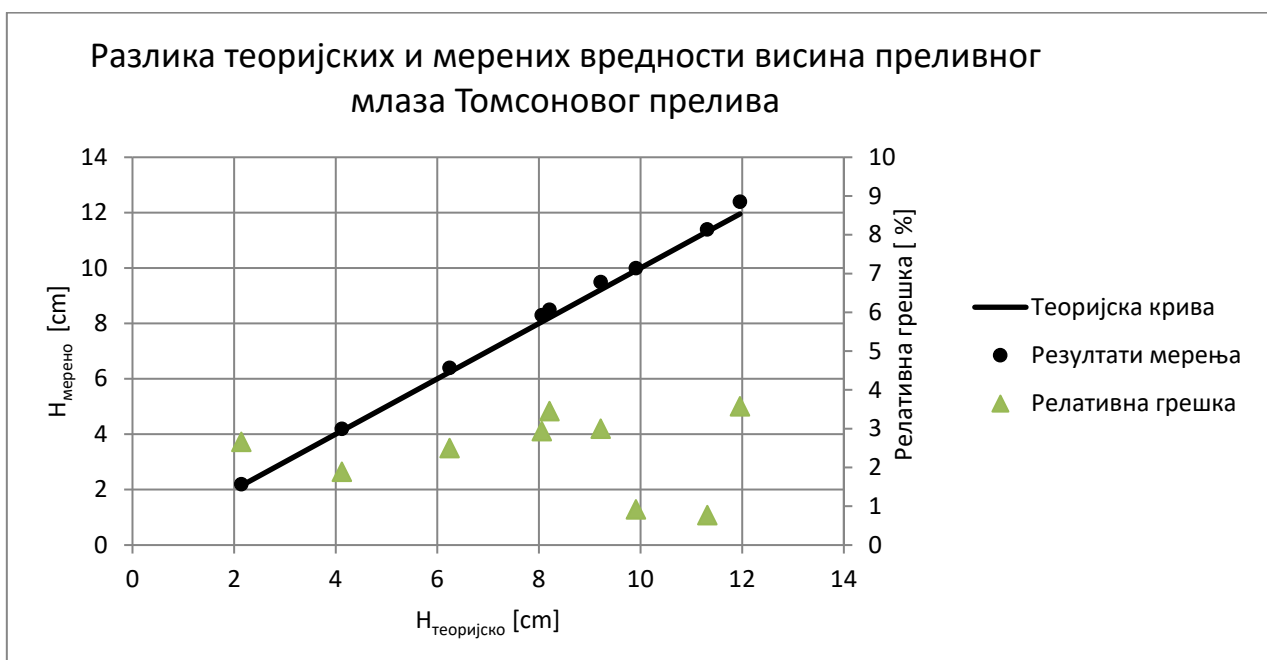
Као коначни положај ЕМ мерача Данфос усваја се положај 2. Овај положај је усвојен јер се тиме обезбеђује мерење веома малих протока (до 0.01 l/s).

Експеримент 4

На сликама 29 и 30 дат је приказ мерене зависности проток преко Томсона-висина преливног млаза у односу на теоријску зависност, и дијаграм релативне грешке мерене зависности у односу на теоријску, за прву диспозицију мерне кутије (дужина кутије 60 cm, без умиривача). Теоријска зависност Q-H рачуна се по једначини 2.

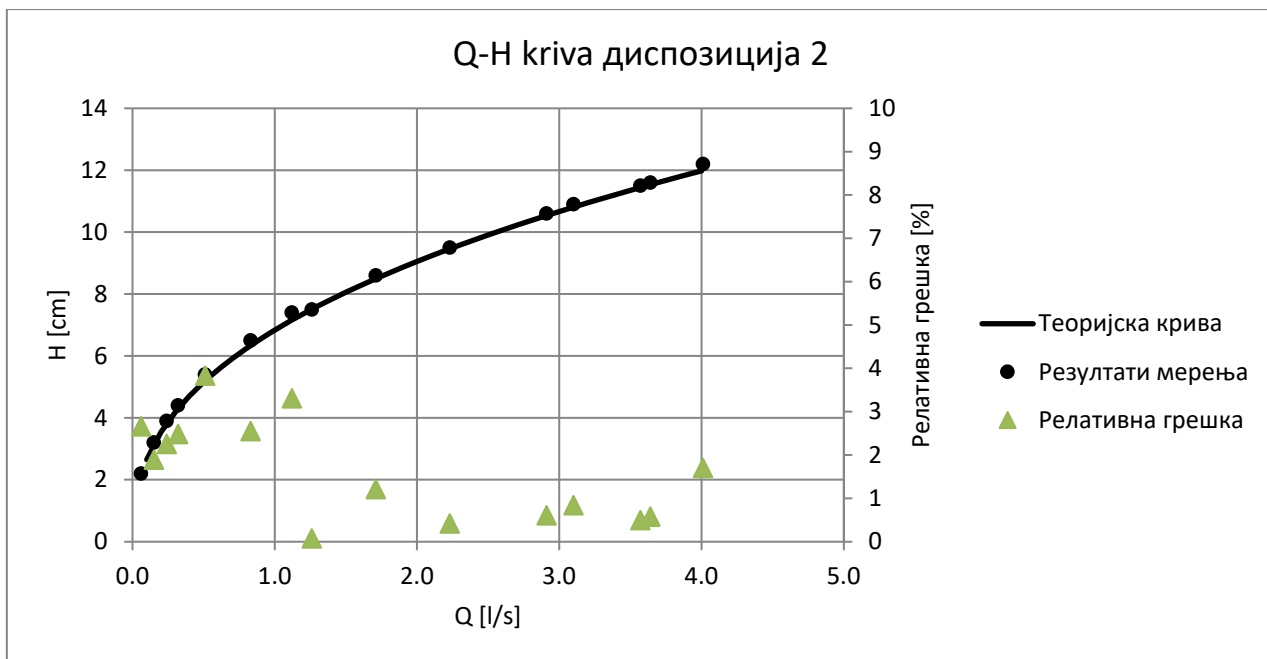


Слика 29: Зависност протока од висине преливног млаза за теоријске и мерене вредности и дијаграм релативне грешке, у процентима, диспозиција 1 мерне кутије (дужина кутије 60 cm, без умиривача)

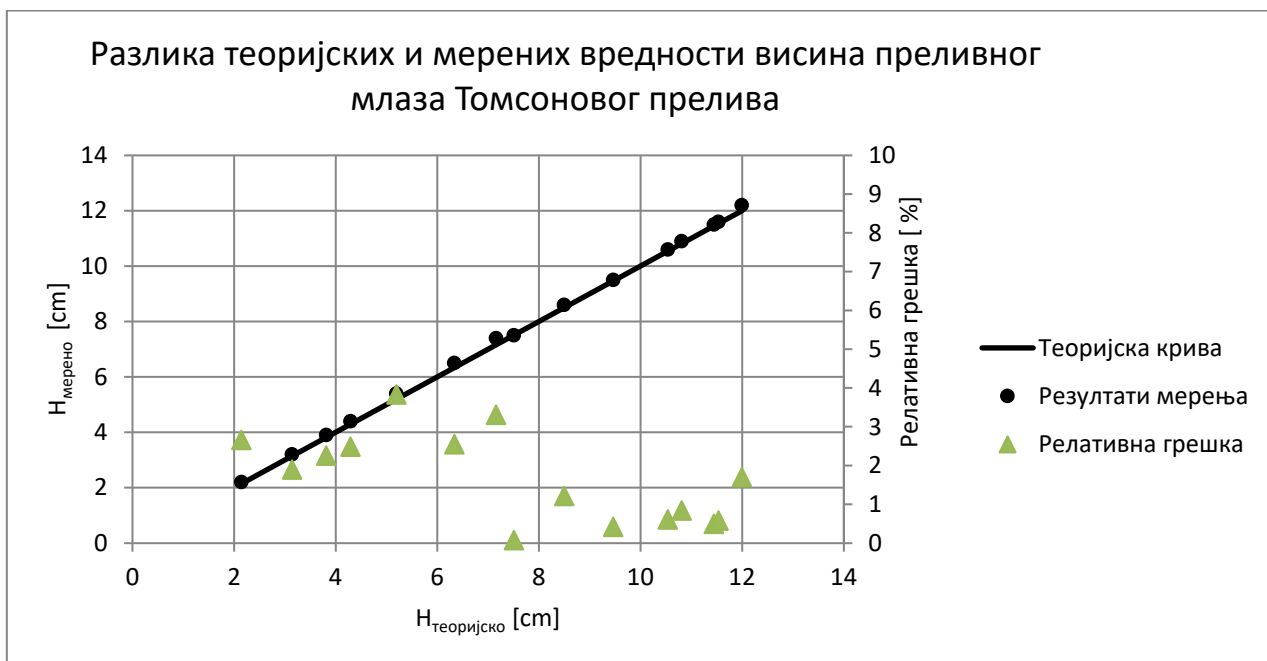


Слика 30: Дијаграм релативне грешке, у процентима, теоријских и мерених вредности висина преливног млаза, диспозиција 1 мерне кутије (дужина кутије 60 cm, без умиривача)

На сликама 31 и 32 дат је приказ мерене зависности проток преко Томсона-висина преливног млаза у односу на теоријску зависност, и дијаграм релативне грешке мерене зависности у односу на теоријску, за другу диспозицију мерне кутије (дужина кутије 40 cm, умиривач на 20 cm). Теоријска зависност Q-H рачуна се по једначини 2.

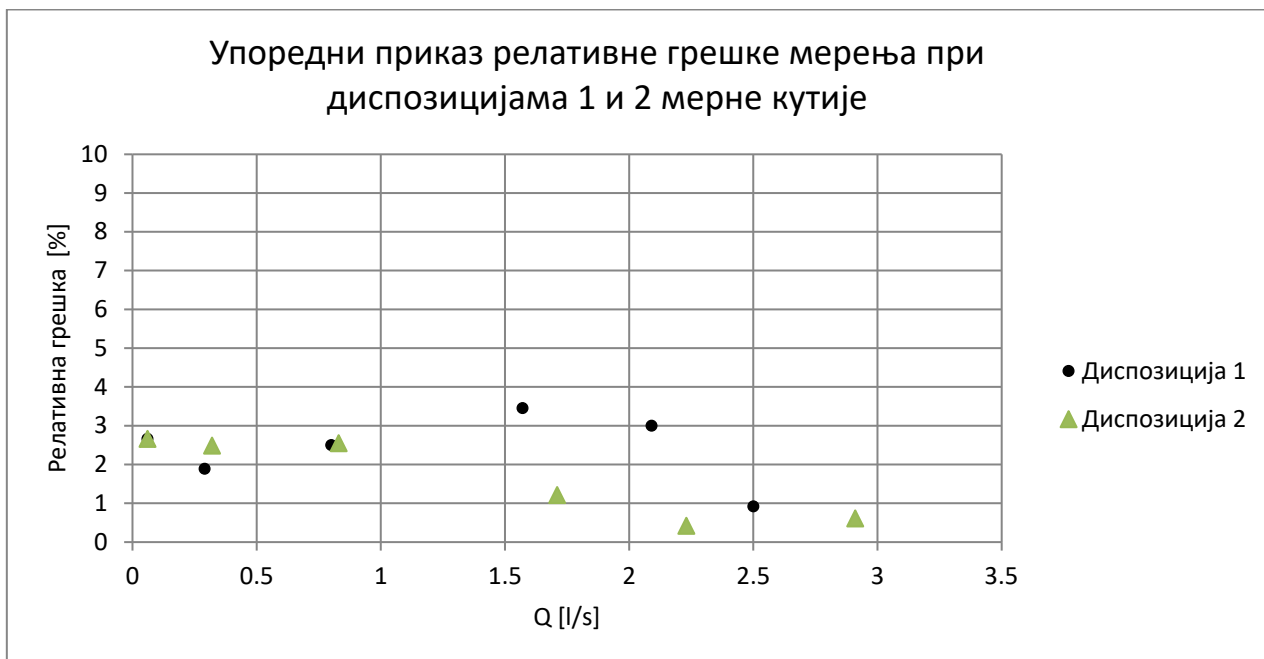


Слика 31: Зависност протока од висине преливног млаза за теоријске и мерене вредности и дијаграм релативне грешке,у процентима, диспозиција 2 мерне кутије (дужина кутије 40 cm, умиривач на 20 cm)



Слика 32: Дијаграм релативне грешке,у процентима, теоријских и мерених вредности висина преливног млаза, диспозиција 2 мерне кутије (дужина кутије 40 cm, умиривач на 20 cm)

На слици 33 дат је упоредни приказ релативне грешке мерења за прву (дужина кутије 60 cm, без умиривача) и другу диспозицију мерне кутије (дужина кутије 40 cm, умиривач на 20 cm).

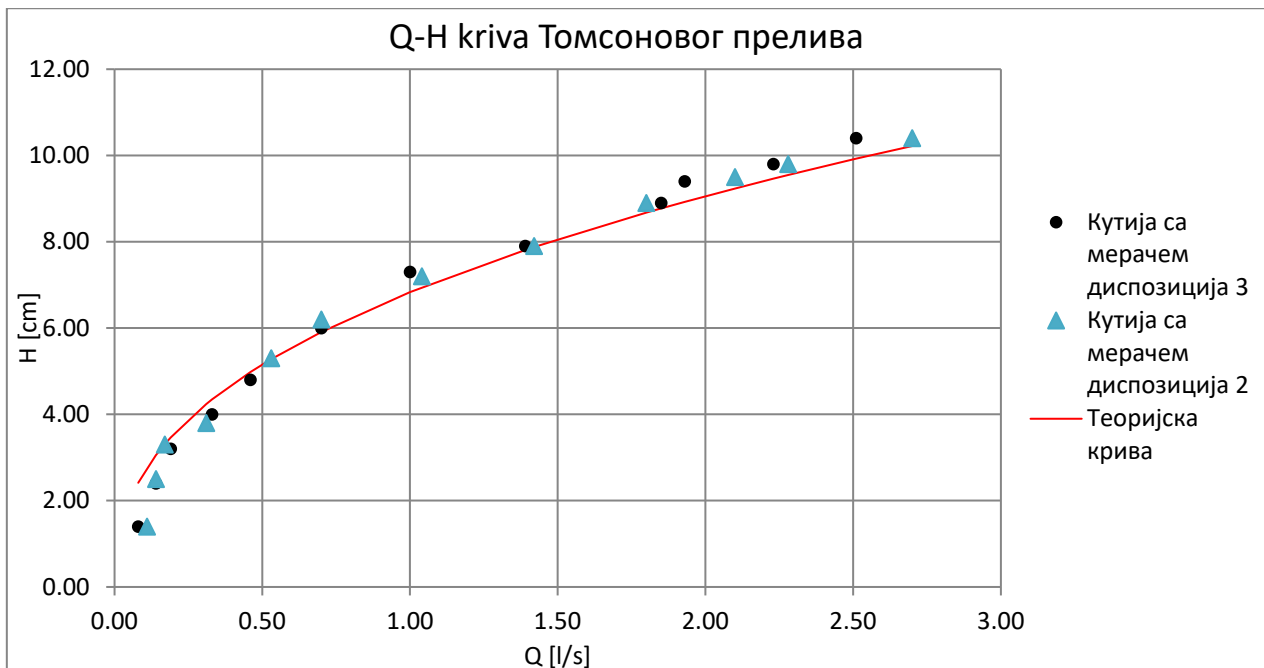


Слика 33: Дијаграм релативне грешке, у процентима, теоријских и мерених вредности висина преливног млаза, за диспозиције 1 и 2 мерне кутије

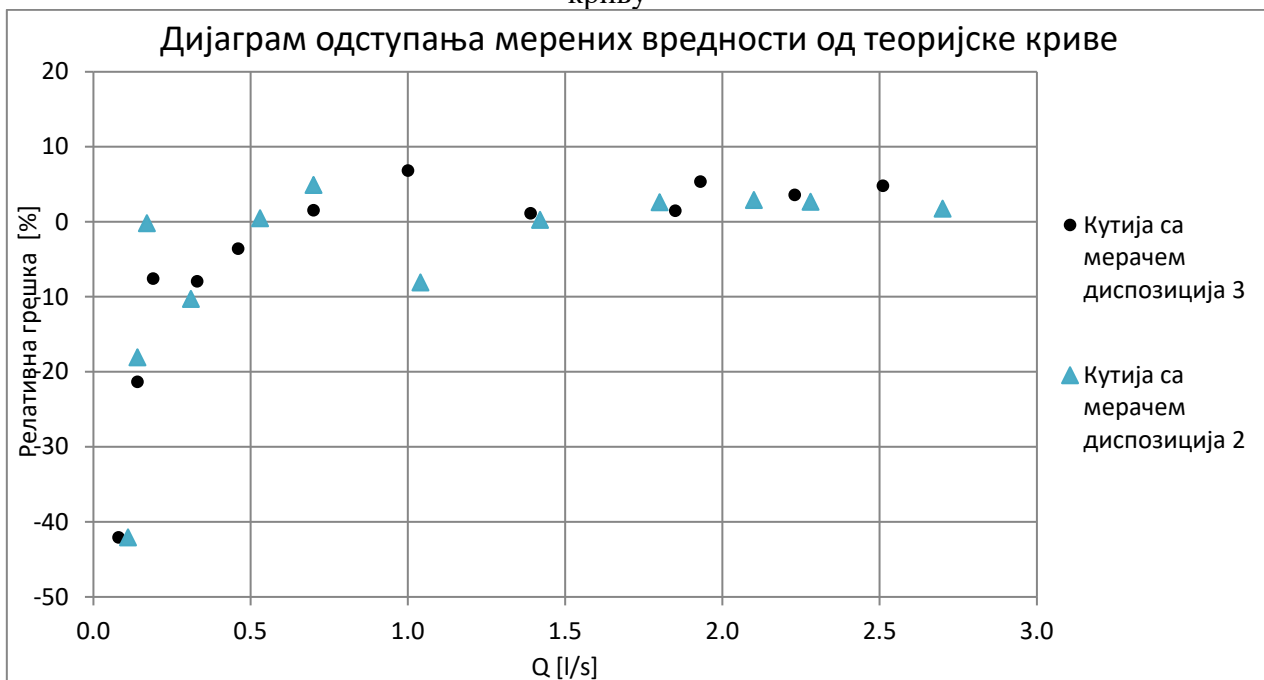
На краћој диспозицији мерне кутије (дужине 40 cm) неопходно је поставити умиривач како би преливање преко Томсоновог прелива било што мирније. На тај начин мерење висине преливног млаза постаје прецизније, а самим тим и мерење протока тачније. Уочава се да постављање одговарајућег умиривача омогућава смањење димензија мерне кутије тј. смањење њене запремине, што представља један од циљева пројектовања мерног система.

Експеримент 5

На сликама 34 и 35 дати су резултати калибрације Томсоновог прелива (за диспозицију система мерач у положају 2 спојен са мерном кутијом у диспозицијама 2 и 3). На слици 34 представљена је мерена зависности проток преко Томсона-висина преливног млаза за другу (дужина кутије 40 cm, умиривач на 20 cm) и трећу диспозицију мерне кутије (дужина кутије 40 cm, умиривач на 20 cm, бочна крила) у односу на теоријску зависност. На слици 35 представљене су разлике између мерених и теоријских вредности, при диспозицијама система мерач (у положају 2, $\Delta H=25$ cm) и мерна кутија диспозиције 2 и 3. Теоријска зависност $Q-H$ рачуна се по једначини 2.



Слика 34: Упоредни приказ зависности проток преко прелива-висина преливног млаза, мерач(положај 2, $\Delta H=25\text{cm}$)+мерна кутија диспозиције 2 и 3 у односу на теоријску криву



Слика 35: Дијаграм одступања, у процентима, теоријских и мерених вредности, мерач(положај 2, $\Delta H=25\text{cm}$)+мерна кутија диспозиције 2 (дужина кутије 40 см, умиривач на 20 см) и 3 (дужина кутије 40 см, умиривач на 20 см, бочна крила)

На слици 36 представљена је мерена зависност укупан проток кроз мерни систем-ниво воде у мерној кутији за другу (дужина кутије 40 cm, умиривач на 20 cm) и трећу диспозицију мерне кутије (дужина кутије 40 cm, умиривач на 20 cm, бочна крила) у односу на теоријску зависност, рачунату на основу једначине 5 (теоријска зависност за Томсонов прелив + мерач).

На слици 37 представљене су разлике између мерених и теоријских вредности, при диспозицијама система мерач (у положају 2, $\Delta H=25$ cm) и мерна кутија диспозиције 2 и 3. Теоријска зависност Q-H рачуна се по једначини 5:

$$Q = Q_{\text{ТП}} + Q_{\text{М}} \quad (5)$$

$$Q_{\text{М}} = \left(\frac{V_{\text{М}}}{10}\right) * \frac{d_{\text{М}}^2 \pi}{4}$$

$$V_{\text{М}} = \sqrt{\frac{2gH_{\text{М}}}{\sum \xi + \lambda \frac{L}{D}}}$$

$$H_{\text{М}} = H + 5 \text{ cm}$$

$$h = H - 20 \text{ cm}$$

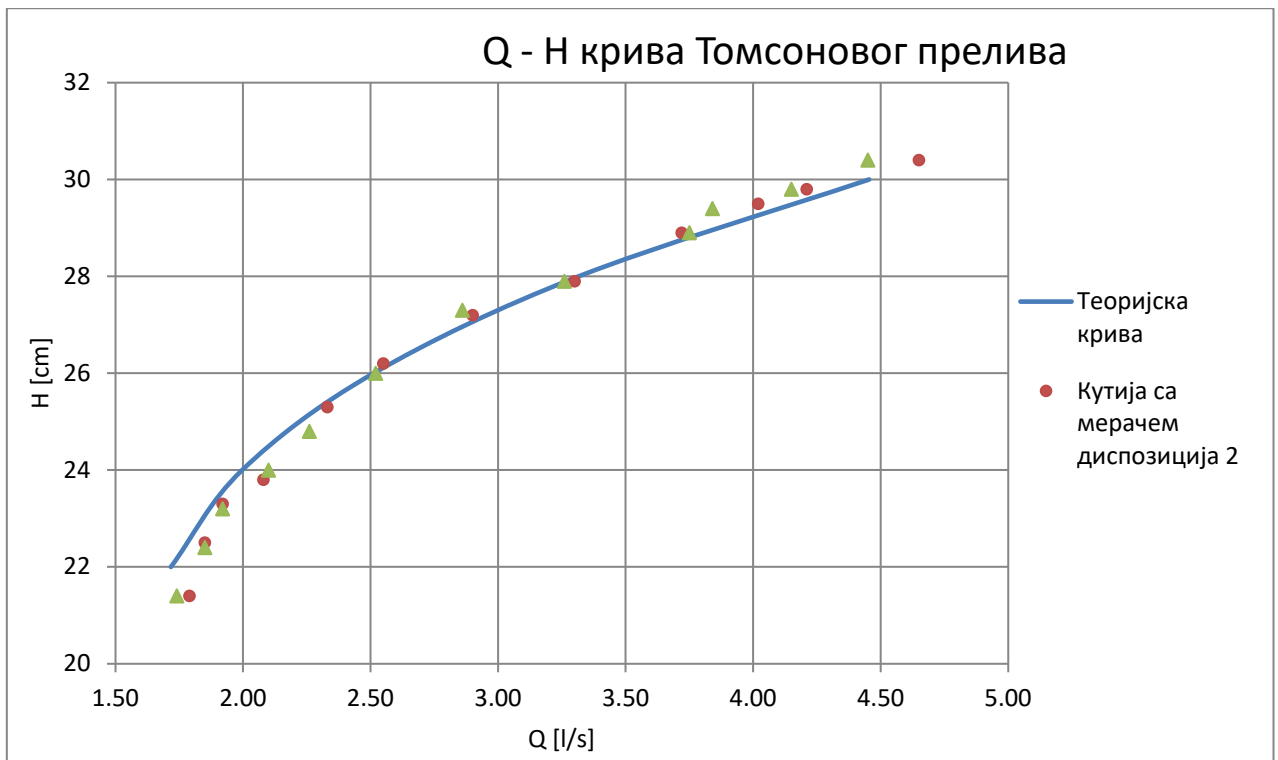
$$Q_{\text{ТП}} = \begin{cases} Q \text{ из једначине 2,} & h > 0 \\ 0, & h \leq 0 \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{1}{2 \log\left(\frac{k}{3.71D}\right)}^2 \quad k=0.01 \text{ mm}, \quad D=4 \text{ cm} \quad L=50 \text{ cm} \quad g=981 \text{ cm/s}^2 \quad d_{\text{М}}=0.4 \text{ dm}$$

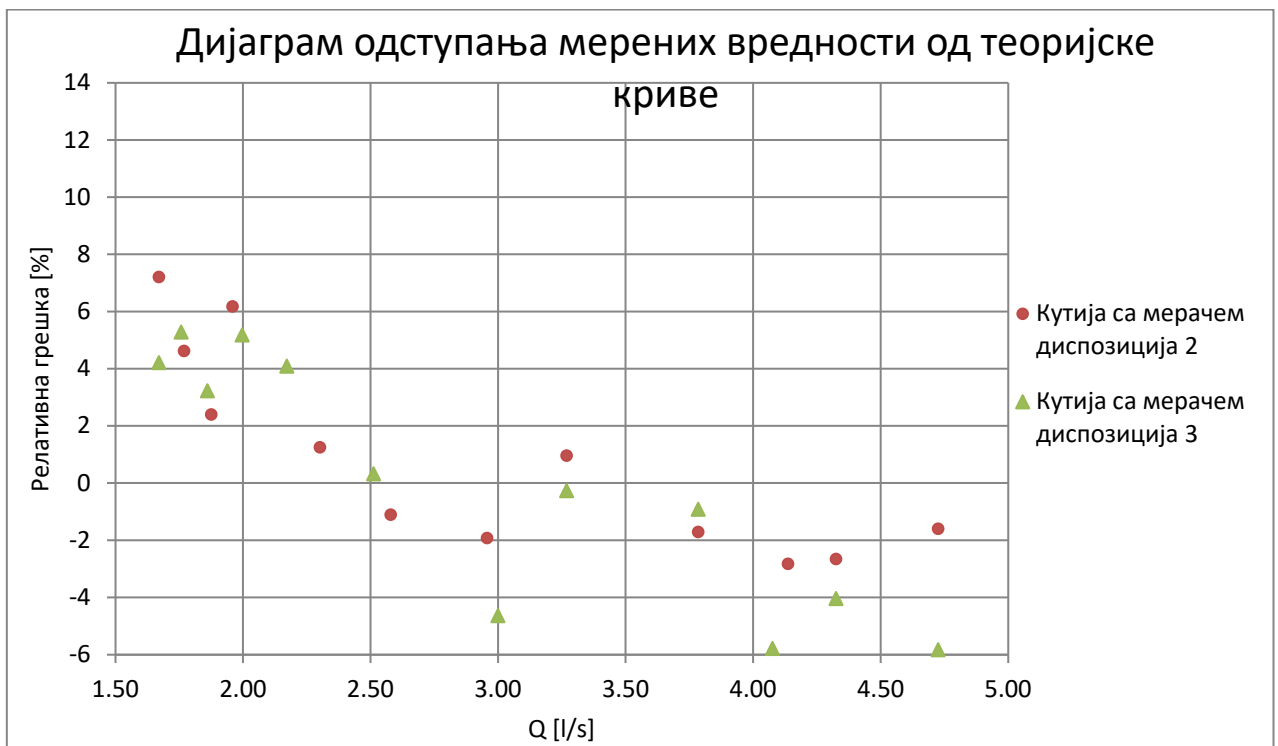
$$\sum \xi = \xi_{\text{кол}} + \xi_{\text{суж}} + \xi_{\text{прош}} + \xi_{\text{изл}} = 2.4^3$$

где су: H-ниво воде у мерној кутији[cm]; ξ -коэффицијент локалног губитка[-]; λ -коэффицијент линијског губитка[-]; L-дужина деонице[cm]; D-пречник деонице[cm]; $V_{\text{М}}$ -брзина течења воде кроз мерач [cm/s]; g-гравитационо убрзање[cm/s²]; $H_{\text{М}}$ -ниво воде у односу на кату излива мерача[cm]; h-висина преливног млаза Томсоновог прелива[cm]; $d_{\text{М}}$ -пречник ЕМ мерача протока[dm]; $Q_{\text{ТП}}$ -проток воде преко Томсоновог прелива[l/s]; $Q_{\text{М}}$ -проток воде кроз мерач[l/s]; Q-укупан проток кроз мерни систем[l/s].

³ Вредности коэффицијената локалних губитака усвојени су на основу препоруке литературе: Хадин Г. Увођење у хидраулику, Грађевински факултет, Београд, 2002

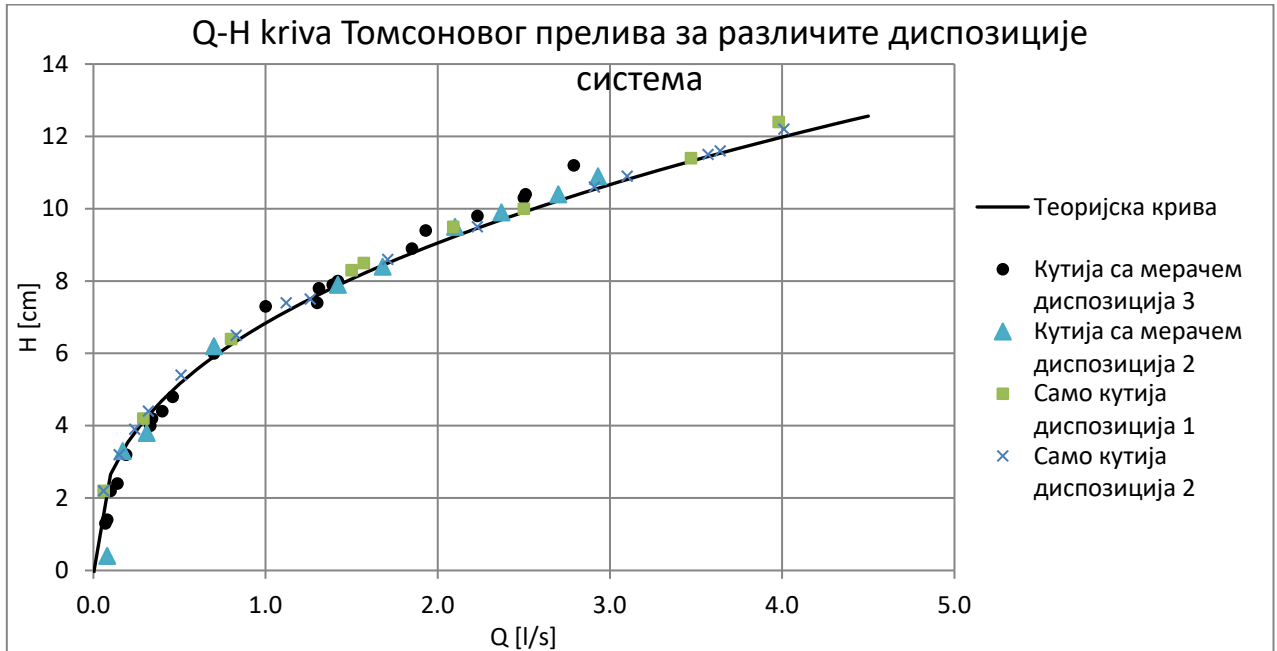


Слика 36: Упоредни приказ зависности укупан проток кроз мерни систем-ниво воде у мерној кутији, мерач(положај 2, $\Delta H=25\text{cm}$)+мерна кутија диспозиције 2 и 3 у односу на теоријску криву (рачунату на основу једначине 5)



Слика 37: Дијаграм одступања, у процентима, теоријских и мерених вредности, мерач(положај 2, $\Delta H=25\text{cm}$)+мерна кутија диспозиције 2 (дужина кутије 40 cm, умиривач на 20 cm) и 3 (дужина кутије 40 cm, умиривач на 20 cm, бочна крила)

На слици 38 преклапају се резултати експеримената 4 (калибрације Томсоновог прелива при диспозицијама 1 и 2 мерне кутије) и 5 (калибрације Томсоновог прелива при диспозицијама 2 и 3 мерне кутије, велики ЕМ мерач је спојен на мерну кутију). Уочава се да расипање резултата није велико односно да смањење запремине мерне кутије нема велики утицај на зависност проток преко Томсона-висина преливног млаза.



Слика 38: Упоредни приказ зависности проток преко прелива-висина преливног млаза, при диспозицијама система мерач (положај 2, $\Delta H=25\text{cm}$) + мерна кутија диспозиције 2 и 3, мерна кутија диспозиције 1 и 2 у односу на теоријску криву

Експеримент 6

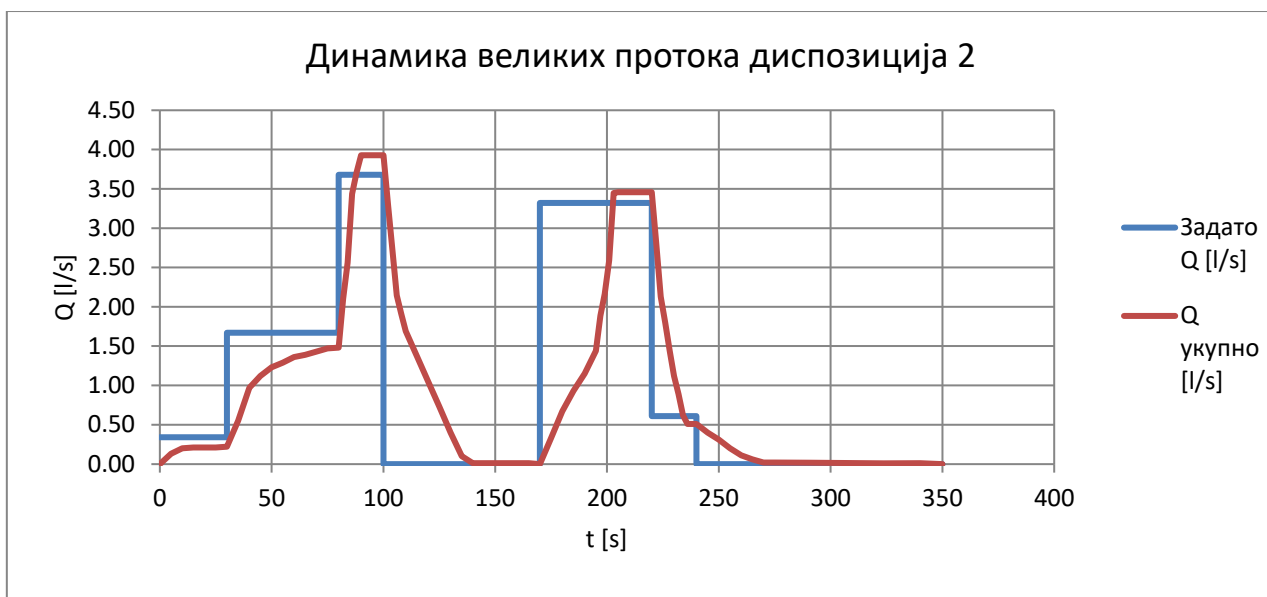
На сликама 39 и 40 приказана је динамика мерног система-велики мерач у положају 2 ($\Delta H=25\text{cm}$) спојен са мерном кутијом у диспозицији 2 (дужина кутије 40 cm, умиривач на 20 cm). На сликама 41 и 42 приказана је динамика мерног система-велики мерач у положају 2 ($\Delta H=25\text{cm}$) спојен са мерном кутијом у диспозицији 3 (дужина кутије 40 cm, умиривач на 20 cm, бочна крила). Уочава се да мерени проток касни при наглom повећању и смањењу протока, и то више при смањењу протока. За оцену грешке мерења, тј. разлику између задатог и измереног протока, користи се релативна грешка у запремини. Релативна грешка у запремини се рачуна по формули:

$$\Delta = \frac{|\sum V_{\text{задато}} - \sum V_{\text{измерено}}|}{\sum V_{\text{задато}}} \times 100 \quad (6)$$

$$\sum V_{\text{задато}} = \int_0^t Q_{\text{задато}}(t) dt$$

$$\sum V_{\text{измерено}} = \int_0^t Q_{\text{измерено}}(t) dt$$

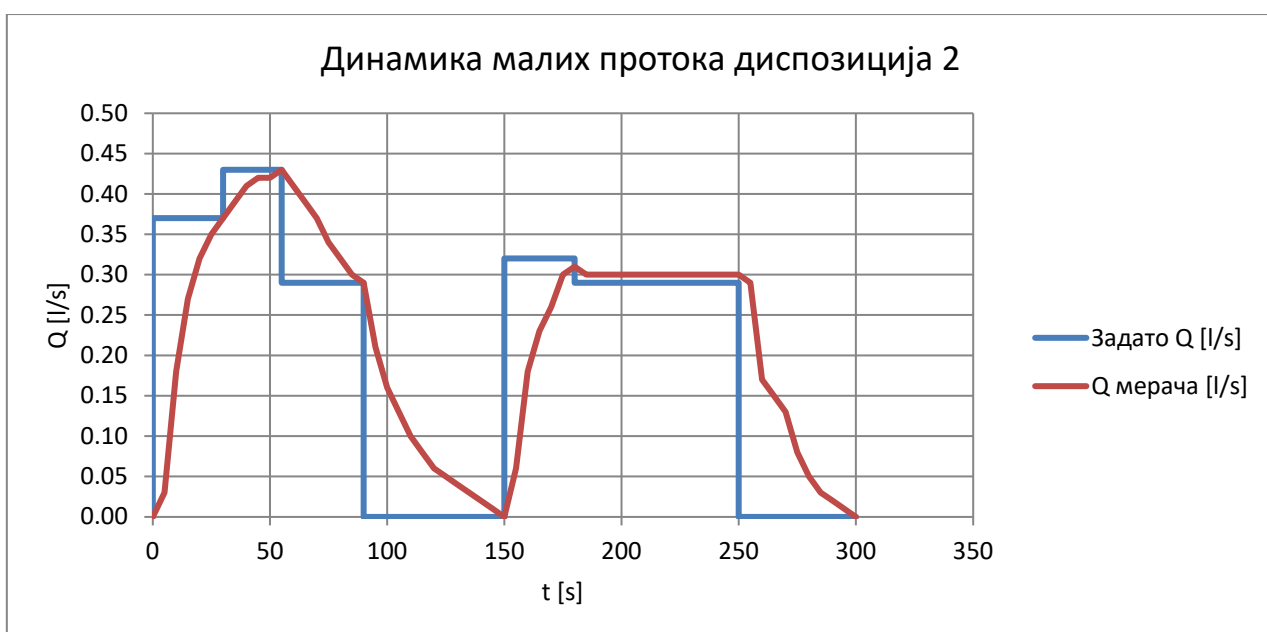
где је: Δ -релативна грешка у запремини [%]; $\sum V_{\text{задато}}$ -површина испод дијаграма задатог Q на сликама 39,40,41,42 [l]; $\sum V_{\text{измерено}}$ -површина испод дијаграма измереног Q на сликама 39,40,41,42 [l]



Слика 39: Дијаграм задатих и измерених протока мерног система у зависности од времена, велики мерач, положај 2+мерна кутија диспозиција 2, при протоцима од 0 l/s до 4 l/s

На основу једначине 6:

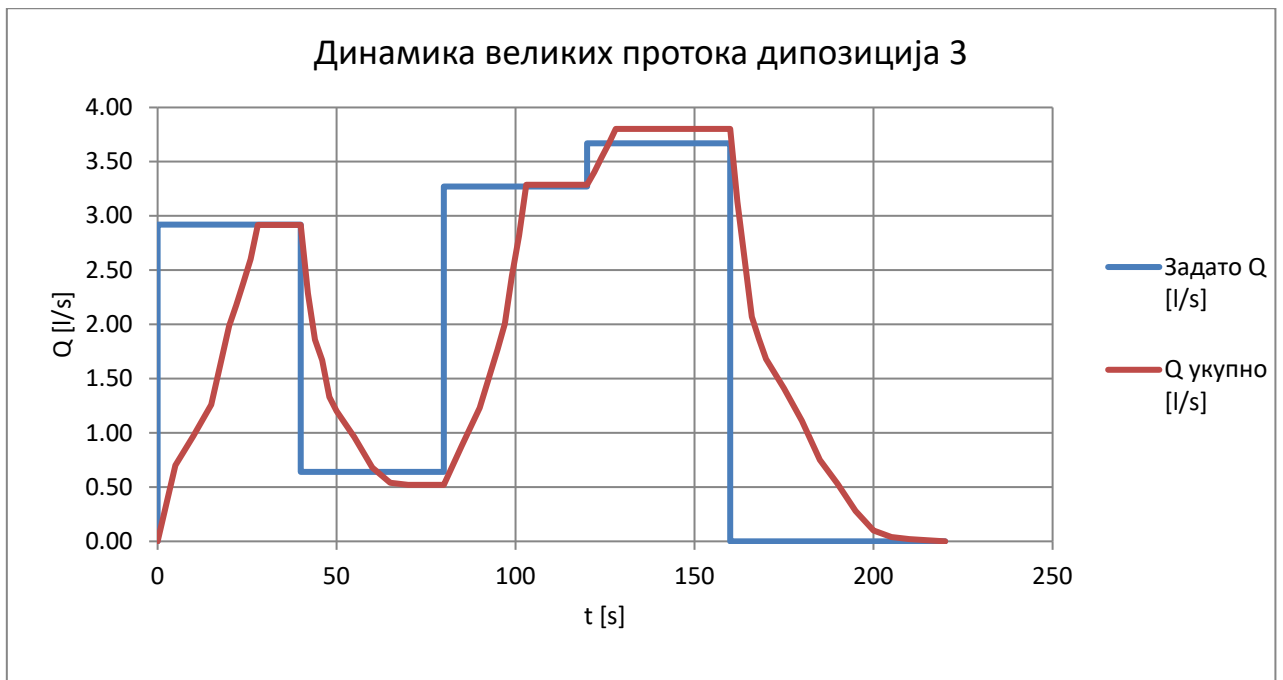
$$\sum V_{\text{задато}} = 345,5 \text{ l} \quad \sum V_{\text{измерено}} = 311,75 \text{ l} \quad \Delta = 9,77 \%$$



Слика 40: Дијаграм задатих и измерених протока мерног система у зависности од времена, велики мерач, положај 2+мерна кутија диспозиција 2, при протоцима од 0 l/s до 0.5 l/s

На основу једначине 6:

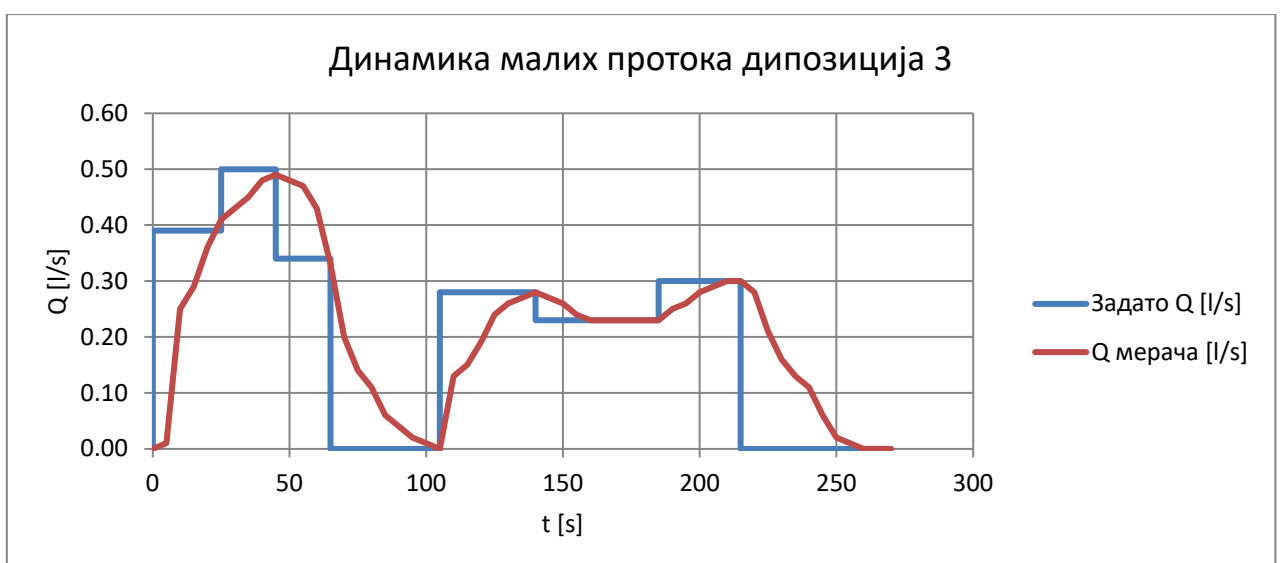
$$\sum V_{\text{задато}} = 61,9 \text{ l} \quad \sum V_{\text{измерено}} = 66,85 \text{ l} \quad \Delta = 8,00 \%$$



Слика 41: Дијаграм задатих и измерених протока мерног система у зависности од времена, велики мерач, положај 2+мерна кутија дипозиција 3, при протоцима од 0 l/s до 4 l/s

На основу једначине 6:

$$\sum V_{\text{задато}} = 420,0 \text{ l} \quad \sum V_{\text{измерено}} = 404,6 \text{ l} \quad \Delta = 3,67 \%$$



Слика 42: Дијаграм задатих и измерених протока мерног система у зависности од времена, велики мерач, положај 2+мерна кутија дипозиција 3, при протоцима од 0 l/s до 0.5 l/s

На основу једначине 6:

$$\sum V_{\text{задато}} = 55,7 \text{ l} \quad \sum V_{\text{измерено}} = 58,95 \text{ l} \quad \Delta = 5,83 \%$$

Упоређивањем резултата експеримента 6, при диспозицијама мерне кутије 2 и 3 (велики ЕМ мерач протока је у оба случаја у истом положају), односно упоређивањем релативних грешака у запремини, уочава се да су релативне грешке у запремини мање при диспозицији 3 мерне кутије (дужина кутије 40 cm, умиривач на 20 cm, бочна крила). Када је мерна кутија у диспозицији 3 (смањењем запремине), вредности измерене запремине воде која је прошла кроз мерни систем мање се разликују од задатих вредности.

VI. ПРЕДЛОГ ФИНАЛНОГ РЕШЕЊА СА ПРЕДМЕРОМ

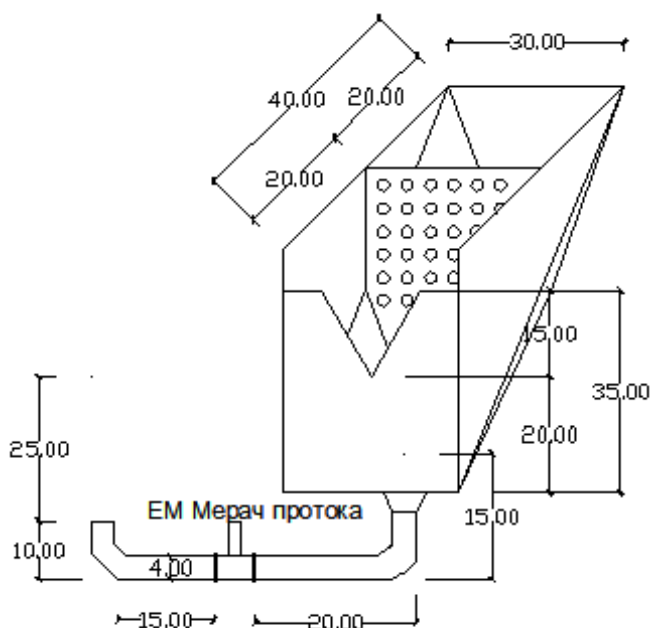
На основу анализе резултата експеримената 1,2,3,4,5,6 предлаже се следеће као финално решење система за мерење протока кишнице са дела крова ИХ:

Спајање две мерне методе (течење под притиском и течење са слободном површином).

Мерни систем који се састоји из мерне кутије диспозиције 3 (дужина кутије 40 cm, ширина кутије 30 cm, постављен умиривач на 20-ом cm дужине кутије, троугаони прелив на крају кутије укупне висине 35 cm, са котом нуле на 20 cm од дна кутије, и „бочним крилима“ смањена расположива запремина кутије) спојене са великим ЕМ мерачом типа Данфос (у положају 2, висинска разлика између коте нуле троугаоног прелива и коте нуле излива мерача је 25 cm) цревом пречника 40 mm и дужине 35 cm.

Овај мерни систем, са довољном тачношћу, може да мери протоке у опсегу од 0.01 l/s до 5 l/s, и да са довољном брзином „ухвати“ нагле промене и великих и малих протока.

На слици 43 дата је скица финалног решења система за мерење протока кишнице са појединим димензијама битним за позиционирање и израду система.

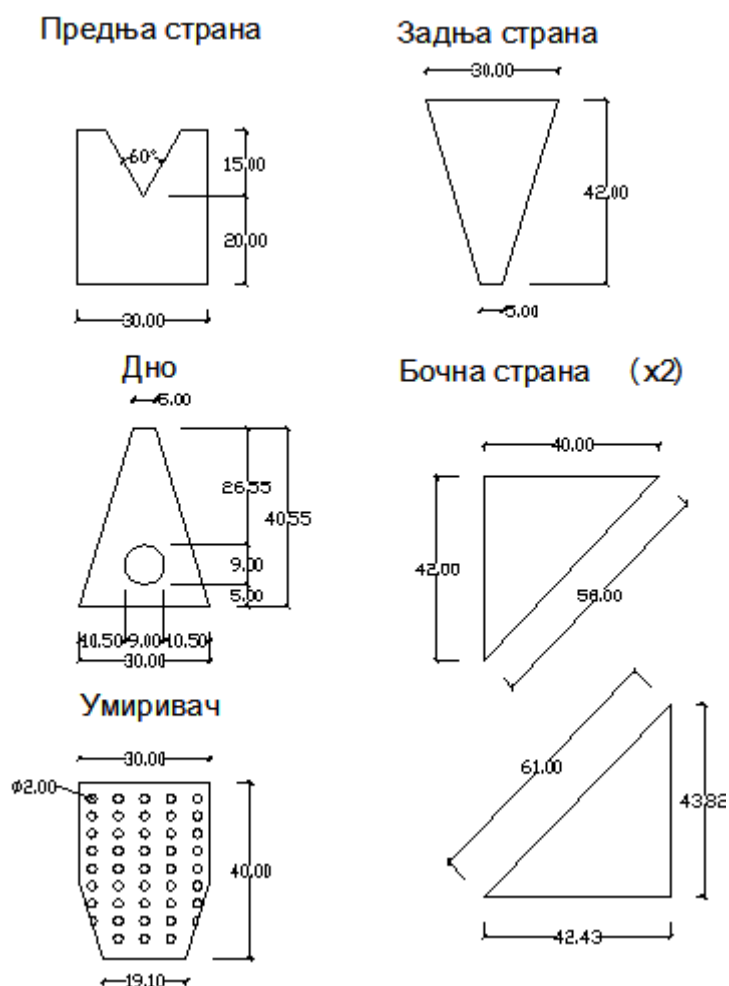


Слика 43: Скица финалног решења система за мерење протока кишнице

За овако усвојени мерни систем урађен је предмер потребног материјала. Мерни систем се састоји из:

- Мерне кутије
- Мерача
- Црева пречника 40 mm и дужине 35 cm које спаја мерач са мерном кутијом
- Излива мерача-цев пречника 40 mm и дужине 15 cm и два колена од по 45°, пречника 40 mm

На слици 44 приказане су димензије појединачних делова мерне кутије. Укупна површина свих елемената износи $5375 \text{ cm}^2 \approx 0.6 \text{ m}^2$



Слика 44: Скице елемената мерне кутије са димензијама за израду

VII. ЛИТЕРАТУРА

- Хајдин Г. Механика флуида, Књига друга, Увођење у Хидраулику, Грађевински факултет, Београд, 2002
- Капор Р. Хидраулика, Грађевински факултет, Београд, 2008
- Продановић Д. Скрипта са предавања, Мерења у хидротехници, Грађевински факултет, Београд, 2002 (<http://hikom.grf.bg.ac.rs>)
- Максимовић Ч. Мерења у Хидротехници, Грађевински факултет, Београд, 1993
- Максимовић Ч., Радојковић М. Истраживања процеса отицања са урбаних сливова за потребе пројектовања објеката кишне канализације, Грађевински факултет, Београд, 1986
- Тодоровић А. Анализа једне кишне епизоде дана 30/5/2013 (осмотрено на експерименталном полигону Грађевинског факултета), Грађевински факултет, Београд, 2013
- U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Water Measurement Manual, 1997
- <http://hikom.grf.bg.ac.rs>
- <http://www.lmnoeng.com/Weirs/vweir.htm>