



Жарко Сретеновић¹, Лазар Радивојевић²
Марко Ћурчић³, Миодраг Поповић⁴

Стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25231S

ПРИМЕНА МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛИРАЊА У ПЛАНИРАЊУ АТМОСФЕРСКЕ КАНАЛИЗАЦИЈЕ – НАСЕЉА СЕВЕРНО ОД КАНАЛА СЕБЕШ

Резиме: У раду су приказани резултати хидрауличког моделирања система атмосферске канализације за сливно подручје северно од канала Себеш (Борча, Овча, насеље Збег). Модел је развијен коришћењем софтверског пакета MIKE+, уз примену синтетичких рачунских киша формираних методом Chicago Design Storm. Анализирано је више варијантних решења, а избор оптималне конфигурације распореда колектора и пумпних станица спроведен је применом АНР методе вишекритеријумске анализе. Добијени резултати модела омогућили су прецизно димензионисање система и његову оптимизацију. Рад потврђује значај математичког моделирања у савременом урбаном планирању и заштити од плавлeња, али наглашава и друге важне факторе који су неопходни за успешну имплементацију техничког решења.

Кључне речи: атмосферска канализација, математичко моделирање, заштита од плавлeња

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING IN STORMWATER NETWORK PLANNING – SETTLEMENTS NORTH OF THE SEBEŠ CANAL

Abstract: The paper presents the results of hydraulic modeling of the stormwater drainage system for the catchment area north of the Sebeš Canal (Borča, Ovča, Zbeg settlement). The model was developed using the MIKE+ software package, applying synthetic design storms generated by the Chicago Design Storm method. Several alternative solutions were analyzed, and the optimal configuration of collectors and pumping stations was selected using the AHP multi-criteria analysis method. The obtained model results enabled precise system dimensioning and optimization. The paper confirms the importance of mathematical modeling in modern urban planning and flood protection, while also emphasizing other key factors necessary for the successful implementation of the proposed technical solution.

Key Words: stormwater drainage, mathematical modeling, flood protection

¹ Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, zarko.sretenovic@jcerni.rs; ORCID: 0000-0002-3931-6569

² Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, lazar.radivojevic@jcerni.rs

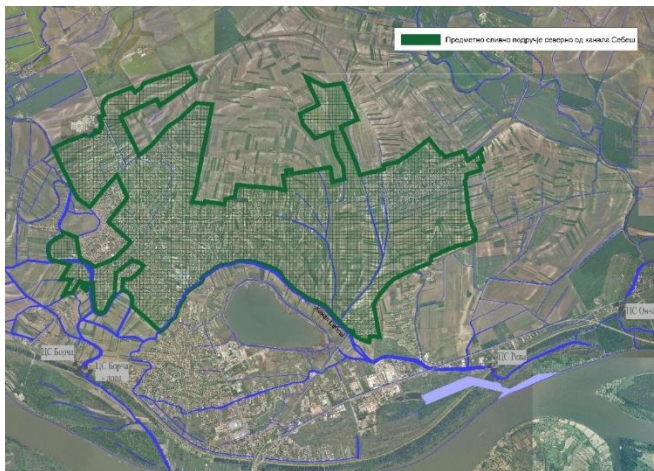
³ Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, marko.curcic@jcerni.rs

⁴ Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, miodrag.popovic@jcerni.rs

1. Увод

Банатски канализациони систем обухвата леву обалу Дунава и на њему је заснован сепарациони систем одвођења отпадних и атмосферских вода. Према постојећем Плану генералне регулације Града Београда, на простору који је предвиђен за урбанизацију и индивидуално становање, планирано је одвођење атмосферских вода зацвљеном мрежом колектора. На овај начин би се атмосферске воде гравитационо евакуисале ка локацијама на којима су црпне станице, а које би служиле за препумпање кишних вода у мелиоративне канале – реципијенте атмосферских вода предметног подручја. Главни одводни канали на предметној територији су мелиоративни канали: Себеш, Каловита, Визељ и Ботош. Сва вода из мелиорационих канала се доведи до мелиорационих црпних станица МЦС „Рева“, МЦС „Борча“ и МЦС „Овча“, одакле се препумпава у Дунав.

У оквиру радова на проширењу Банатског канализационог система, планирано је пројектовање и изградња атмосферске канализације насеља северно од канала Себеш. Дефинисано је подручје од око 2.000 ha (слика 1) у оквиру којег је потребно планирати изградњу атмосферске канализације. Изградња атмосферске канализације имаће значајан утицај на живот и сигурност грађана ове урбане целине. Системом кишне канализације омогућиће се брже и ефикасније одвођење вишка атмосферских вода са улице и других урбаних површина, чиме се смањује ризик појаве штете од поплава и осталих непријатности које могу настати као последица прекомерних падавина. Изградња атмосферске канализације допринеће побољшању квалитета живота у овим градским насељима, спречавањем стварања локација које су подложне задржавању воде, настанку непријатних мириса као и појаве инсеката. Очекивано је да наведени позитивни ефекти допринесу повећању вредност некретнина и земљишта у оквиру предметног подручја, и да ову област учине атрактивнијом за живот и инвестирање.



Слика 1. Предметно сливно подручје северно од канала Себеш

Figure 1. The catchment area north of the Sebeš Canal



2. Приступ у анализи и планирању атмосферске канализације

Полазну основу за конципирање решења представљали су урбанистички планови и подлоге којима је, између осталог, дефинисан будући развој и диспозиција канализационе мреже на подручју северно од канала Себеш. Коришћена је релевантна планска и студијска документација (актуелни ППР-ови и ПДР-ови, Студија уређења вода Панчевачког рита и План развоја канализационог система општине Палилула) што је омогућило сагледавање просторних и хидротехничких услова за одвођење атмосферских вода.

На основу урбанистичких података и геодетских истражних радова, извршена је анализа терена и идентификација карактеристичних подсливова. Формиране су независне сливне целине које представљају природне и технички условљене јединице за прикупљање и одвођење атмосферских вода. Свака целина је дефинисана у односу на границе непропусних површина, постојеће или планиране инфраструктурне капацитете и реципијент.

Након сагледавања праваца развоја атмосферске канализационе мреже из наведених подлога, формирана су варијантна решења канализања. У процесу дефинисања варијанти анализирана су и постојећа искуства са функционисањем канализационих система у другим деловима града, пре свега на примеру Новог Београда, са аспекта усвојених техничких решења, капацитета и експлоатационих карактеристика. Метода аналитичких хијерархијских процеса (АНР) је коришћена за постављање приоритета, вредновање варијантних решења и одабира техничког решења.

Хидролошке подлоге засноване су на важећим подацима о падавинама за подручје града Београда. Коришћене су ИТП (интензитет–трајање–повратни период) криве, на основу којих су формиран синтетички хидрограми типа Chicago Design Storm (CDS) за различите повратне периоде. Подаци су добијени применом Гумбелове методе на серију од 25 година мерења, што је омогућило прорачун висина и интензитета киша кратког трајања. На основу ових кривих дефинисани су сценарији хидролошког оптерећења за потребе димензионисања и провере функционисања система кишне канализације.

За симулацију рада канализационе мреже примењен је софтвер MIKE+, интегрисана платформа за хидродинамичко моделирање урбаних система, која омогућава хидродинамичку симулацију протока и нивоа воде при неустаљеном течењу у цевима, у системима атмосферске и фекалне канализације.

3. Анализа варијантних решења

3.1. Разматрана варијантна решења

Варијанта 1 представља 12 независних система, иницијално подељених сливних подручја који формирају независне целине величине од око 200 ha. Пројектовано је гравитационо одвођење кишних вода, а пошто је терен претежно равничарски неизбежно је и дубоко укопавање канализације. Услед тога, овим решењем дефинисана је и изградња 12 канализационих црпних станица. За локације црпних станица биране су



парцеле које су у државном власништву или које су пољопривредно земљиште на којем нема изграђених објеката. Као реципијенти за кишне воде предвиђени су најближи мелиорациони канал у односу на локације црпних станица.

Варијанта 2 садржи 10 независних система. Решење је базирано на идеји да се максимално искористи једна од главних саобраћајница овог подручја – Зрењанински пут. Планом детаљне регулације дела Зрењанинског пута са контактним подручјем, од канала Себеш до саобраћајнице Северна тангента, планирана је његова реконструкција и проширење. Реконструисан Зрењанински пут служио би као траса главног правца сакупљања и одвођења кишних вода из најгушће насељеног и највише урбанизованог дела предметног подручја. Ово решење предвиђа два велика кишна колектора, у левој и десној траси пута, који се простиру све до канала Себеш, где се помоћу централне црпне станице сакупљена вода препумпава у канал. Остале сливне целине су предефинисане, услед груписања сливних подручја око Зрењанинског пута.

3.2. Критеријуми приликом избора оптималног решења

Приликом избора оптималног решења, разматрани критеријуми и ограничења су:

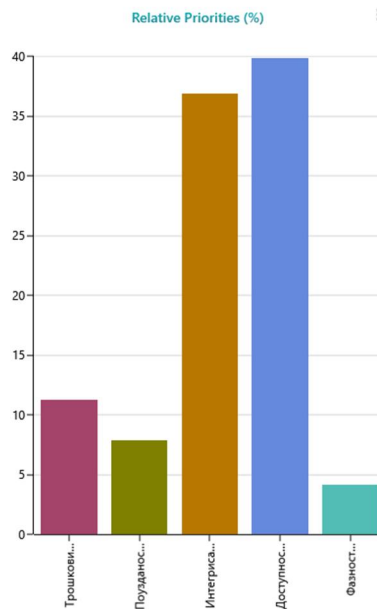
- Трошкови изградње, управљања и одржавања,
- Поузданост система,
- Интегрисаност са постојећом инфраструктуром и урбанистичким плановима,
- Доступност земљишта и парцела,
- Фазност изградње и брзина реализације.

Критеријум трошкови изградње, управљања и одржавања анализира трошкове изградње објеката канализације, уградње опреме, њеног одржавања, управљања, као и остале погонске трошкове.

Поузданост система представља вероватноћу да ће систем исправно функционисати током одређеног временског периода. Код оваквог система са већим бројем црпних станица у функционисању, поузданост се посматра кроз анализу површина плавних зона у случају испада из рада црпних станица. Критеријум интегрисаности са постојећом инфраструктуром и урбанистичким плановима процењује компатибилност решења са постојећим објектима као и хармонизацију са важећим урбанистичким подлогама. Доступност земљишта и заузеће парцела оцењује могућност да се обезбеди потребни простор за изградњу објеката канализације са аспекта доступности земљишта за продају или откуп. Фазност изградње и брзина реализације анализира колико је пројектовано решење флексибилно у смислу парцијалне изградње и брзине канализације одређених делова насеља, независно од реализације целокупног пројекта.

3.3. Резултати АНР анализе варијантних решења

Варијантна решења вреднована су на основу дефинисаних критеријума, споменутих у претходном поглављу. Одређени су приоритети за критеријуме, према мерама релативне важности. Након тога, приступило се вредновању варијантних решења и процени корисности решења.



Слика 2. Тежина дефинисаних критеријума за вредновање
Figure 2. Weighting of Defined Evaluation Crite

Табела 1. Вредновање варијантних решења према појединачним критеријумима
Table 1. Evaluation of Alternative Solutions According to Individual Criteria

Критеријум	Варијанта 1	Варијанта 2
Трошкови	0.33	0.67
Поузданост система	0.67	0.33
Интегрисаност система	0.25	0.75
Заузеће парцела	0.25	0.75
Фазност изградње	0.67	0.33

На основу спроведене анализе, закључено је да је Варијанта 2 – оптимална варијанта решења. Она је детаљно разрађена и анализирана кроз математички модел.

3.4. Опис усвојеног техничког решења

Будући систем атмосферске канализације насеља северно од канала Себеш заснован је на 10 независних сливних целина, од којих највећу представља слив КЦС „Зрењанински пут“ (437 ha), а најмању слив „Железничка станица“ (38,62 ha). Сваки слив завршава се кишном црпном станицом, одакле се, након пречишћавања у сепараторима уља и масти, вода испушта у мелиорационе канале (Мокри Себеш, Борчански Преток, Визељ, Стојкова бара и Сибница). Укупно је планирано 10 црпних станица,



разврстаних у три типа према капацитету: тип 1 – велики капацитет (8.000 l/s), тип 2 – средњи капацитет (2.200–4.000 l/s), 3 – мали капацитет (400–1.000 l/s). Црпне станице су шахтног типа, са уливним грађевинама, утопним пумпама, дистрибутивним шахтовима и сепараторима уља и масти. За транспорт већих количина атмосферске воде предвиђена је комбинација аутоматских и ручних решетки, преливних грађевина и потисних цевовода.

4. Формирање математичког модела

4.1. Софтвер за хидрауличко моделирање MIKE+

У оквиру интегрисане платформе за моделирање MIKE+, развијене од стране Данског хидрауличког института (DHI), симулације је могуће спроводити као појединачне догађаје или као континуиране појаве одређеног трајања. Процес моделирања обухватио је следеће кораке: дефинисање физичких података о мрежи, постављање граничних услова, подешавање параметара, покретање симулације и, на крају, анализу резултата.

Математички модел је обухватио примарну и секундарну мрежу, укључујући црпне станице, колекторе и изливе. Проток и ниво воде симулирани су решавањем Saint-Venant једначина методом коначних разлика, што је омогућило реалистичан приказ понашања система при различитим хидролошким оптерећењима.

4.2. Моделирање површинског отицаја

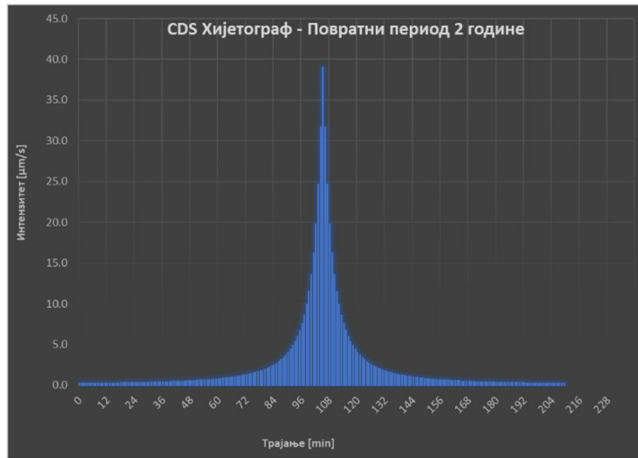
За симулацију површинског отицаја атмосферске воде примењен је Time–Area модел, заснован на методи време–површина. Модел одређује хидрограм отицаја на основу процента непропусних површина, фактора хидролошке редукције, почетног губитка влажења, као и времена концентрације које се аутоматски израчунава за сваки подслив уз помоћ GIS алата.

4.3. Гранични и почетни услови модела

Да би модел могао функционисати, осим физичких елемената модела, морају се дефинисати и гранични услови у моделу. Највећи део граничних услова представљају различита хидрауличка оптерећења (падавине, инфилтрација, отпадне воде, итд.). Главна карактеристика ових граничних услова је да садрже транспортно средство – воду.

4.4. Рачунска киша – Chicago Design Storm

За анализу и димензионисање система кишне канализације насеља северно од канала Себеш примењују се синтетички хијетोगрами типа Chicago Design Storm, развијени на основу ИТП кривих за Београд. Ови хијетोगрами обухватају трајања киша од 5 до 210 минута, при чему се максимално трајање од 210 минута сматра довољним за обухват критичних услова појаве максималних протока. Хијетोगрами су развијени у минутним интервалима (нпр. 211 тачака за кишу трајања 210 минута), са симетричном расподелом интензитета око централне тачке. Израчунавање интензитета изведено је оптимизационим моделом који минимизује одступања у односу на ИТП криву.

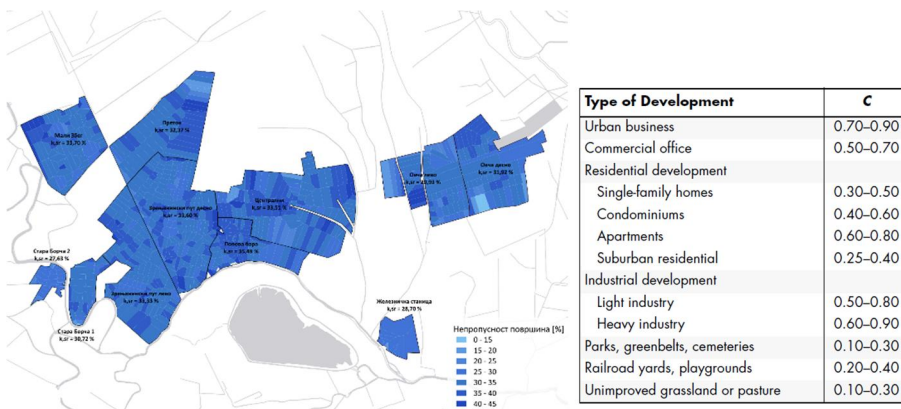


Слика 3. CDS за подручје Београда, трајања 210 минута и повратног периода 2 године

Figure 3. CDS for the Belgrade area, duration 210 minutes and return period of 2 years

4.5. Карактеристике сливова и подсливова хидролошког модела

Делинеација на основне сливне јединице урађена је уз помоћ GIS – ових алата у MIKE + софтверу по правилу поделе на Тиесенове полигоне. На основу прорачуна падавине отицај (rainfall-runoff) јединичних сливова, урађен је хидраулички прорачун и димензионисање атмосферске канализационе мреже.



Слика 4. Непропусност сливних површина (лево) и коефицијенти отицаја према подручју одводњавања (десно)

Figure 4. Imperviousness of subcatchments (left) and runoff coefficients by drainage area (right)

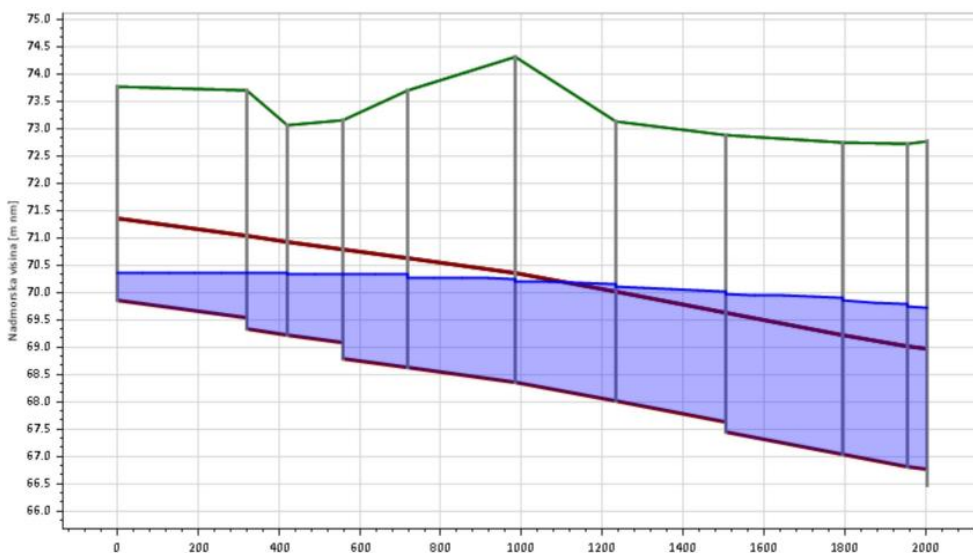
Након дигитализације Плана намена површина из Урбанистичких подлога, свакој дефинисаној намени површина придодељен је одређени степен учешћа непропусних површина. На основу софтверског алата, а користећи GIS платформу, подсливовима је

додељен одређени степен (проценат) непропусности у функцији учешћа свих намена површина на конкретном подсливу. Овим поступком добијене су сумарне вредности непропусности површина за целокупно предметно подручје. Приликом процене степена непропусности површина, који је неопходан податак за потребе хидрауличног моделирања у софтверу MIKE+ и примену хидролошког модела Time – Area, као базни ослонац коришћени су подаци у литератури везани за коефицијенте отицаја и примену рационалне методе. Коефицијенти отицаја посматрани су према опису подручја као и према врсти површине са које се врши одводњавање.

5. Резултати хидрауличног модела

Хидраулично моделирање омогућило је оптимизацију траса и профила цевовода, као и детаљну анализу ретензионих способности примарне и секундарне атмосферске канализационе мреже. На тај начин, запремина цевовода је искоришћена као додатни ретенциони простор који задржава дозвољену количину атмосферске воде пре њеног препумпавања у реципијенте.

Оваквим приступном постигнуте су значајне уштеде у погледу капацитета црпних станица, што је резултирало индиректно и смањеним просторним захтевима као и нижом енергетском потрошњом токо експлоатације. Истовремено, моделирање је потврдило успешан избор предложене концепције решења и обезбедило поуздану основу за даље фазе пројектовања и реализације.



Слика 5. Попречни профил атмосферског колектора у Зрењанинском путу приликом киша повратног периода $T=2$ год

Figure 5. Longitudinal profile of the stormwater collector along Zrenjaninski put during rainfall with return period of $T = 2$ years



6. Закључна разматрања

Примена математичког моделирања неизбежна је у савременом планирању система атмосферске канализације, јер омогућава реалистично сагледавање понашања система у различитим сценаријима оптерећења. Развијени хидролошко–хидраулички модел у софтверу MIKE+, уз примену синтетичких киша CDS и Time–Area модела површинског отицаја, показао је да се запремина цевовода може искористити као додатни ретенциони простор. На тај начин, значајно се смањује оптерећење црпних станица, постижу се уштеде у броју и капацитету пумпних агрегата, смањују просторни захтеви и обезбеђује енергетска ефикасност система.

Ипак, математичко моделирање представља тек једну фазу ка успешној реализацији техничког решења. Пре пуштања у рад будућег система атмосферске канализације, неопходно је реконструисати и измуљити канале који ће бити реципијенти, као и прилагодити партерно уређење јавних површина (улице, тргове, тротоаре) ради ефикасног гравитационог одвођења кишних вода ка сливницима. Ови задаци су нарочито изазовни у неплански изграђеним насељима, каква су насеља северно од канала Себеш.

Посебан акценат је и на неопходности паралелне изградње фекалне канализације, у супротном постоји реалан од нелегалних прикључака и испуштања фекалних вода у атмосферску канализацију.

Узимајући у обзир ефекат климатских промена, све чешћих појава екстремних киша већег интензитета и краћег трајања, као и убрзану урбанизацију предметног подручја, јасно је да будућа стратегија мора бити усмерена на смањење кишног отицаја на месту његовог настанка.

Интеграција зелене инфраструктуре (кишне баште, зелени кровови, пропусне подлоге, биоретензије) и локалних решења (сакупљање кишнице, преусмеравање олука на пропусне површине) доноси директне и тренутне користи – смањење оптерећења система, унапређење квалитета животне средине и повећање отпорности урбаних средина на поплавне ризике.

Да би се то постигло, потребно је у урбанистичким планским документима развити јасне смернице, прописати мере и резервисати простор за примену зелене инфраструктуре. Тиме се обезбеђује интеграција традиционалних и одрживих решења, што представља основ за дугорочну, отпорну и еколошки прихватљиву урбану инфраструктуру.

7. Литература

- [1] Schaake J. C, Geyer J. C, and Knapp J. W, *Experimental examination of the rational method*, ASCE, 1967.
- [2] DHI: *MIKE+Release 2024 Update 1*, Danish Hydraulic Institute (DHI). Hørsholm, Denmark, 2024.
- [3] Урбанистички завод Београда: План генералне регулације грађевинског подручја седишта јединице локалне самоуправе - Град Београд (целине I - XIX), *Сл. лист града Београда* бр. 91/23, 2016.



- [4] Урбанистички завод Београда: План детаљне регулације дела Зрењанинског пута са контактним подручјем, од канала Себеш до саобраћајнице Северна тангента, *Сл. лист града Београда* бр. 59/24, 2022.
- [5] Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, *Студија уређења вода на подручју Панчевачког рита*, Београд, 2020.