

СПЕЦИФИЧНОСТИ И ИЗАЗОВИ У ИЗУЧАВАЊУ УРБАНИХ БУЈИЦА SPECIFICITIES AND CHALLENGES IN THE STUDY OF URBAN FLASH FLOODS

Ненад Шурјанац¹, Ненад Јаник², Соња Брауновић¹, Наталија Момировић¹,
Јована Цветковић¹

¹Институт за шумарство, Београд

²ЈП Београд Воде, Београд

Извод: Урбане бујице представљају један од најсложенијих облика поплавног ризика у савременим градовима, јер настају као последица интеракције интензивних падавина, непропусних површина и ограничених капацитета одводних система. Ефикасно управљање овим ризиком захтева интеграцију високорезолутивних просторних података, ажурних информација о канализационо-дренажној мрежи и примени спрегнутих 1D–2D хидрауличких модела који реалистично представљају површинско и подземно струјање воде. Показано је да детаљна топографија, укључујући микро-рељеф улица, ивичњака, прагова и уличних депресија, значајно утиче на путање отицаја и формирање локалних зона задржавања воде. Истовремено, тачност модела у великој мери зависи од квалитета и геореференцираности података о одводном систему, посебно о положају и капацитету сливника и шахтова, који одређују размену протока између површине и ценовода.

У савременом приступу, LiDAR подаци, UAV-фотограмметрија и даљинска детекција омогућавају брзо и поуздано генерисање DEM/DSM модела и LULC класификација, што је посебно важно у динамичним урбаним срединама. Фузија ових података са хидрауличким моделима омогућава прецизније симулације сценарија екстремних падавина, рано упозоравање и доношење информисаних одлука. Закључно, успешна анализа и управљање урбаним бујицама захтевају усаглашене просторне и инфраструктурне податке високе резолуције, стално ажурирање модела и примену интегрисаних 1D–2D приступа који обезбеђују реалистичан приказ хидродинамичког понашања у градском окружењу.

Кључне речи: урбане бујице, беспилотни системи, подаци високе резолуције, LiDAR, Object Based Image Analyses, даљинска детекција.

Abstract: Urban flash floods represent one of the most complex forms of flood risk in modern cities, arising from the interaction of intense rainfall, impervious surfaces, and the limited capacity of drainage infrastructure. Effective management of this risk requires the integration of high-resolution spatial data, up-to-date information on drainage networks, and the application of coupled 1D–2D hydraulic models capable of realistically representing both surface and subsurface water flows. Detailed topography—including micro-relief features such as street curbs, thresholds, and depressions—significantly influences flow paths and the formation of localized water accumulation zones. At the same time, model accuracy greatly depends on the quality and georeferencing of drainage system data, particularly the position and capacity of inlets and manholes, which govern the exchange of flow between the surface and pipe networks. In modern practice, LiDAR data, UAV photogrammetry, and remote sensing enable rapid

and reliable generation of DEM/DSM surfaces and LULC classifications, which is especially important in dynamic urban environments. The fusion of these datasets with hydraulic models allows for more accurate simulations of extreme rainfall scenarios, early warning, and informed decision-making. In conclusion, successful analysis and management of urban flash floods require harmonized, high-resolution spatial and infrastructural datasets, continuous model updates, and the use of integrated 1D–2D approaches that provide a realistic representation of hydrodynamic behavior in urban settings.

Keywords: urban flash floods, unmanned aerials systems, LiDAR, Object Based Image Analyses, remote sensing

1. УВОД

Урбане бујице (urban flash floods) представљају краткотрајне, али врло интензивне поплавне догађаје изазване високо-интензивним, често краткотрајним падавинама које се јављају над претежно изграђеним и непропусним површинама, при чему се вода задржава и/или тече по површини јер је капацитет инфилтрације и одводње ограничен (Guo, Guan, & Yu, 2021, Rosenzweig et al, 2021, Skougaard Kaspersen et al., 2017). За разлику од поплава које се јављају у природним сливовима, урбане бујице имају знатно краће време реакције слива. Време реакције слива (енг. Catchement response time, runoff response time), често повезано са „time of concentration“– T_c) представља интервал између почетка интензивних падавина и тренутка када вода са најудаљенијих тачака слива достигне излазну тачку (посматрани профил, улични канал, сливник или део реке). У урбаним срединама време реакције је обично изразито кратко, и креће се од неколико минута до неколико десетина минута, због великог удела непропусних површина и високе брзине површинског отицања, односно просторних карактеристика урбаних сливова и елемената урбане инфраструктуре. (Berne et al., 2005; Ogden et al., 2000).

У хидрологији бујичних поплава време реакције слива је кључни индикатор колико брзо слив одговара на падавински инпут, и директно одређује:

- време до појаве вршног протока,
- интензитет и динамику бујичног таласа,
- простор и време потребне интервенције,
- степен раног упозорења и припремљености.

Бројни аутори наводе да је за урбане бујичне поплаве карактеристично екстремно кратко време реакције, често краће од 15 минута, јер непропусне површине елиминису инфилтрацију, а микро-топографија улица убрзава конвергенцију отицаја (Smith et al., 2007; Ochoa-Rodriguez et al., 2015).

Berne et al. (2005) показују да код јаких конвективних олуја, време реакције може бити краће од доминантног трајања кишних ћелија, што доводи до врло наглог раста протока и отежане прогнозе. У урбаним сливовима, чак и мали пораст непропусних површина (нпр. 10–20%) може смањити време реакције за 30–50%, што драстично повећава ризик од бујичних поплава (Miller & Hutchins, 2017).

Ogden et al. (2000) наглашавају да време реакције у бујичним системима није само хидраулички параметар већ и динамичка функција кише, LULC-а, нагиба, инфилтрационог капацитета, канализационе мреже и микро-рељефа. У урбаним подручјима, интеракција између 2D површинског отицања и 1D канализационог система може додатно убрзати или успорити реакцију зависно од тога да ли се систем пуни или прелива (Leandro et al., 2009). Другим речима, краће време реакције → бржа

бујица → мањи простор за интервенцију и упозорење, што је кључни разлог због ког се урбане бујице сматрају најопаснијим обликом краткотрајних поплавних догађаја.

Познавање времена реакције слива након кишних епизода представља срж примењене хидрологије, при чему су време кашњења и време концентрације две повезане мере за одређивање колико брзо водотоци реагују на падавине које формирају површински отицај у сливу (Allnutt et al., 2020, McEnroe et al., 2016.).

Поред овога, урбане бујице се одликују и изразито просторно неуједначеним интензитетом и веома су осетљиве на локалну микро-топографију, тип земљишног покривача и стање канализационо-дренажне мреже (Leitão et al., 2010). Због тога се у литератури истиче потреба за улазним подацима високе резолуције, како о земљишном покривачу, тако и о дигиталном моделу терена (Digital terrain Model -DTM) и дигиталном моделу површина (Digital Surface Model - DSM) јер генерализовани подаци доводе до потцењивања дубина, брзина и праваца течења (Fewtrell et al., 2011).

2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Циљ рада је да прикаже: специфичности урбаних бујица у односу на поплаве у природним сливовима; да покаже зашто је детаљан LULC (land use/land cover – земљишни покривач и начин коришћења земљишта) пресудан за прорачун површинског отицаја у граду; да анализира захтеве у погледу резолуције и тачности DTM/DSM у урбаном окружењу; да прикаже како инфилтрација, формирање површинског отицаја и транспорт наноса утичу на ток бујица; и да објасни међудејство са канализационом мрежом и разлоге због којих је неопходно 1D–2D спрежање модела (Carr & Smith, 2006; Chen, Djordjević, Leandro, & Savić, 2007; Simões et al., 2011).

Овај рад представља студију чији циљ је да систематизује савремене изазове и приступе моделирању урбаних бујица са посебним нагласком на важност просторне резолуције улазних података (LULC, DTM/DSM) и интеграције површинског и подземног одводног система. Методологија је заснована на принципима систематских прегледних истраживања како их описују Tranfield, Denyer и Smart (2003) и Petticrew и Roberts (2006), уз прилагођавање специфичностима хидролошким анализама и моделирањима.

2.1. Извори података и библиографске базе

Претрага литературе спроведена је у следећим научним базама података:

- Web of Science Core Collection,
- Scopus,
- ScienceDirect (Elsevier),
- Taylor & Francis Online,
- SpringerLink,
- Google Scholar (допунски, за идентификацију цитата и најновијих радова).

Осим тога, додатно је извршено усаглашавање са доступним релевантним стандардима, смерницама и техничким документима у области урбаног управљања водама.

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

3.1. Специфичности урбаних бујица

У урбаним срединама однос између количине падавина и отицаја фундаментално је измењен у односу на природне (руралне) или мање изграђене сливове, пре свега због

високог учешћа непропусних површина (асфалт, бетон, кровови, паркинг простори) које имају занемарљив капацитет инфилтрације и одмах генеришу површински отицај (Berndtsson, 2010; Salvatore, Bronders, & Batelaan, 2015).

Истраживања у Европи и Азији показују да повећање непропусних површина са приближно 30% на 50–60% резултује нелинеарним повећањем максималног протицаја током интензивних падавина (Skougaard Kaspersen et al., 2017; Yin et al., 2016; Yang et al., 2017). У таквим окружењима време концентрације је веома кратко, па се у њима чак и релативно кратке и локализоване олује директно пресликавају у површинско отицање (Ochoa-Rodriguez et al., 2015). Урбане бујице настају и развијају се унутар самог градског подручја, најчешће у року од неколико минута до сати након почетка падавине (Ochoa-Rodriguez et al., 2015).



Слика 1. и 2. Урбана бујица Београд, Ваљевска улица (извор: YouTube)
Figure 1. and 2. Urban Flash Flood in Belgrade, Valjevska Street (source: YouTube)

До поплава изазваних кишним епизодама најчешће долази као последица локалних олуја, које се услед ограниченог сливног подручја појављују нагло и веома брзо се интензивирају. Резултат овога је непропорционално угрожавање живота и инфраструктуре у односу на количину падавина услед специфичности окружења односно урбане средине (Falconer et al., 2009). Сlike 1. и 2. приказују урбану бујицу у Београду, у градској општини Чукарица.

Урбанизација мења природни земљишни покривач непропусним материјалима попут асфалта и бетона, који се поред непропусности одликују и формирањем урбаних топлотних острва. Ова појава доводи до повећања температуре у односу на окружење која уз повећану рапавост структура у урбаним срединама мења правце ветрова унутар и околу урбаних средина. Последица овога су појачано формирање олуја и дуже задржавање облака изнад великих градова које у комбинацији са непропусним површинама резултују у појачавању директног отицаја, повећању врха и волумена поплавног таласа уз смањење времена кашњења (Liu & Niyogi, 2019).

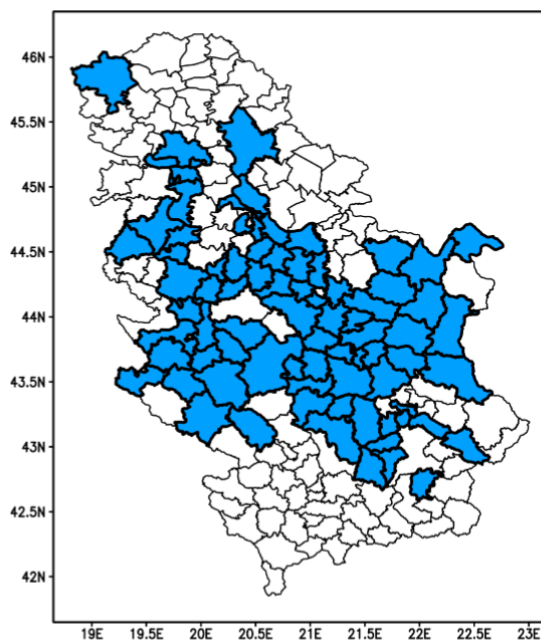
Процес урбанизације значајно мења локалне климатске услове у градовима и њихову интеракцију са атмосферским процесима. Изградња великих површина под бетоном, асфалтом и другим материјалима који имају ниску рефлектанцу и високу акумулацију топлоте ствара тзв. урбана топлотна острва (Урбан Хеат Исланд – УХИ), при чему температура ваздуха у градским зонама често износи око 1–5 °Ц више него у околним руралним подручјима (Oke, 1982). Тај температурни градијент мења

локалну циркулацију ваздуха, влажност и микроклиматске процесе, што може довести до појачаног конвективног развоја облака и учесталијих краткотрајних, али врло интензивних пљускова (Bornstein & Lin, 2000; Shepherd, 2005).

Бројне емпиријске студије показале су да урбана подручја могу утицати на редистрибуцију падавина. На пример, студија за више великих градова показује да падавине над или низ-ветар урбаних зона могу бити приближно 5% или више веће него у околним руралним подручјима (Shepherd et al., 2002). Шири преглед студија показује да повећања од ~10-20 % нису неуобичајена (Liu et al., 2019).

Механизам утицаја на падавине укључује комбинацију термалног уздицања ваздуха узрокованог УНІ ефектом, повећану концентрацију аеросола и честица прашине које делују као тачке кондензације, као и промене у брзини и правцу ветрова које настају због зграда и урбаног рељефа (Rosenfeld et al., 2008; Han et al., 2014).

Повећање интензитета и учесталости пљускова додатно је појачано глобалним климатским променама, које мењају расподелу енергије у тропосфери. Модели пројекција показују да градови постају жаришта екстремних падавина јер се локални микроклиматски ефекти (УНІ, аеросоли, турбуленција) преклапају са глобалним порастом водене паре у атмосфери (Trenberth et al., 2015; Allan & Soden, 2008). Због тога се у последњој деценији све више користи термин „урбани пљускови високе учесталости“ (High-Frequency Urban Rainstorms – HFURs) као нова категорија метеоролошких појава (Yang et al., 2019, Yang et al., 2014, Westra et al., 2014, Zhang et al., 2014).

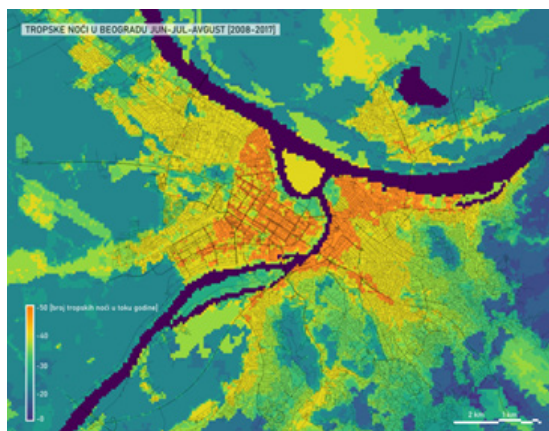


Слика 3. Општине у Републици Србији које су погођене поплавама, бујицама и плављењем улица од 17. маја до 17. јуна 2023. године (<https://klima101.rs/srbija-poplave-maj-jun-2023/>)

Figure 3. Municipalities in the Republic of Serbia Affected by Floods, Flash Floods, and Urban Street Inundation from May 17 to June 17, 2023 (<https://klima101.rs/srbija-poplave-maj-jun-2023/>)

У хидролошком смислу, ова појачана учесталост краткотрајних, али интензивних падавина директно повећава ризик од урбаних бујица. Будући да већина канализационих система у старим градовима није пројектована за такве екстреме, вода се брзо акумулира на површини и ствара локалне поплаве. Овај проблем додатно погоршавају смањена инфилтрација и топлотно зрачење површина које убрзава исушивање тла између падавина, повећавајући иницијалну непропусност (Fletcher et al., 2013; Alves et al., 2018). Слика 3. приказује општине погођене поплавама у периоду од месец дана у Републици Србији.

У урбаним срединама капацитет за складиштење воде је смањен до занемарљивих количина (од 1–2 mm) на крововима, путевима и трговима, што доприноси генерално недовољним капацитетима за складиштење атмосферских вода у систему канализације (Todini, 2025). Уопштено, урбанизација не утиче само на хидрологију, већ активно мења локалне климатске процесе који генеришу падавине. Тиме се затвара повратна спрега између климатологије града, површинске модификације тла и интензитета атмосферских догађаја, чинећи урбане средине све подложнијим екстремним хидроклиматским појавама. Слика 4. приказује просторни распоред броја тропских ноћи у урбаој средини на примеру Београда.

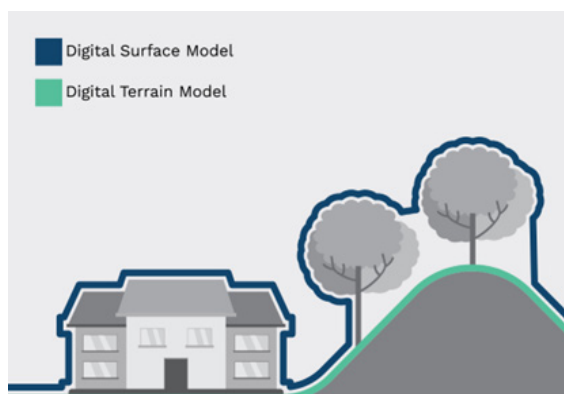


Слика 4. Мапа тропских ноћи Београда. (Извор: Filipović & Djurdjević, 2023)

Figure 4. Map of tropical nights in Belgrade. (Source: Filipović & Djurdjević, 2023)

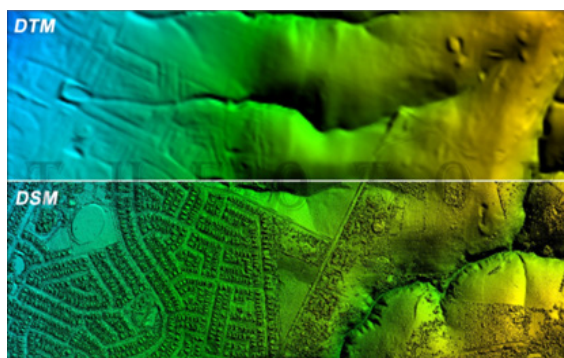
3.2. Земљишни покривач и начин коришћења земљишта (LULC), Дигитални модел терена (DTM) и Дигитални модел површине (DSM)

Дигитални модел терена (Digital Terrain Model) - DTM приказује „голи“ терен, односно површину без објеката и вегетације, док дигитални модел површина (Digital Surface Model) односно DSM приказује терен заједно са свим надземним структурама, као што су зграде, дрвеће, ограде, мостови и урбани елементи микротопографије, што је приказано на сликама 5. и 6. У контексту урбаних бујица DSM је често једнако важан, а у многим случајевима и хидраулички доминантнији у односу на DTM, јер управо објекти и микро-рељеф улица усмеравају и задржавају ток површинске воде (Fewtrell et al., 2011; Schubert & Sanders, 2012). Ако се користи само DTM, без приказа зграда и ивица коловоза, 2D модел „види“ урбану површину као више или мање равну топографију, и вода се шири нереално дифузно, уместо да се води улицама, каналима и удубљењима (Chen et al., 2010; Jamali, Löwe, Bach & Arnbjerg-Nielsen, 2018).



Слика 5. Дигитални модел површине (DSM) и Дигитални модел терена (DTM)
(Извор: www.Geoimage.com.au)

Figure 5. Digital Surface Model (DSM) and Digital Terrain Model (DTM)
(source: www.Geoimage.com.au)



Слика 6. Растерски приказ Дигитални модел терена (DTM)
Дигитални модел површине (DSM) (извор: www.theotop.ro)

Figure 6. Raster Representation of the Digital Terrain Model (DTM)
and the Digital Surface Model (DSM)
(source: www.theotop.ro)

У односу на бујичне поплаве у природним сликовима, урбане бујице су под већим утицајем топографије малих размера и инфраструктуре (улице, ивичњаци, прагови, подвожњаци, решетке сливника), што значи да је моделирање могуће само ако је та топографија експлицитно присутна у DTM/DSM (Fewtrell et al., 2011; Schubert & Sanders, 2012). У случају примене грубог Digitalnog модела висина – DEM (нпр. 10–30 m), улице и одводни канали „нестају“, вода се шири по погрешним правцима и модел приказује лажне плављене површине (Jamali, Löwe, Bach, & Arnbjerg-Nielsen, 2018). Емпиријске студије у урбаним срединама показале су да без прецизног приказивања објеката као што су локалне депресије, ивичњаци, прагови и уски улично кањонски пролази може значајно нарушити тачност симулација дубина воде и путања течења. На пример, у неким студијама и моделима грешке предвиђене максималне дубине и

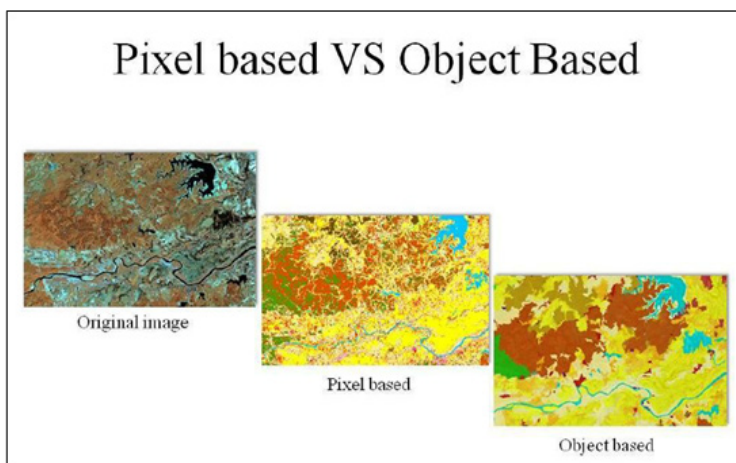
размака поплавних зона су уочене као знатне (нпр. разлике између мрежа високе и ниске резолуције (Neal et al. 2013, Ozdemir et al., 2013, Shen et al., 2018).

Реалистично представљање зграда, ивичњака и других локалних препрека у 2D моделима урбаног плавлeња пресудно утиче на предвиђене путање и дубине: занемаривање ових елемената систематски искривљује токове и дубине, док „building-blockage“ и специјализовани „building treatments“ значајно побољшавају предиктивну тачност. Поред тога, осетљивост на просторну резолуцију мреже је велика - финије резолуције боље детектују и дефинишу микрорељеф и каналисање токова. (Chen et al., 2012; Schubert & Sanders, 2012; Yu & Lane, 2006a, 2006b).

Schubert & Sanders (2012) додатно су утврдили да тачност предвиђања урбаног плавлeња зависи не само од хоризонталне резолуције растера, већ да је критично и присуство реалистичних препрека и канала у DSM-у, при чему се, без њих, губи могућност репродуковања стварних путања и задржавања бујичне воде у микро-депресијама.

Дакле, DTM је нужен за пад терена, али DSM је пресудан за путању и концентрацију тока. У пракси, модели урбаних бујица најбоље резултате дају када се користи фино обрађен и дефинисан LiDAR DSM (≤ 1 m) или UAV-фотограметријски DSM, који садрже праве геометрије зграда, вегетације и саобраћајне инфраструктуре (Gallien, Schubert & Sanders, 2011; Neal et al., 2011).

Прелазак са растера резолуције 5–10 m на 1–2 m значајно побољшава могућност модела да ухвати микротопографију улица, уске канале, депресије и ивице саобраћајница, што директно утиче на формирање проточних путева и зона задржавања воде у урбаним срединама (Neal et al., 2011). У студијама тестирања урбаних 2D модела над LiDAR подацима високе резолуције, показано је да модели са резолуцијом 1–2 m боље одражавају локалне варијације дубина, ширину проточних фронтва и положај „депресија“ уз зграде и ивичњаке, док резолуције 5–10 m „губе“ ове детаље, што доводи до вештачког ширења плавних површина (Fewtrell et al., 2011; Jamali et al., 2018).



Слика 7. Object Based Image Analyses (Извор: Pandiwijaya et al, 2013)

Figure 7. Object Based Image Analyses (Source: Pandiwijaya et al, 2013)

За практичну примену при моделирању бујица у урбаним подручјима треба имати податке о земљишном покривачу и начину коришћења земљишта који разликују типове

површина као што су: кровови, асфалтне коловозе, тротоаре, парковне површине, неизграђена земљишта, зелене кровне површине и површинске воде. Односно, потребна је финија класификација типова земљишног покривача. Без таквог раздвајања модел ће системски потценити или преценити отицај (Walsh et al., 2012; Miller & Hutchins, 2017). У урбаним срединама хидраулично понашање пљуска одређују веома ситне просторне карактеристике: ширине коловоза и тротоара, висине ивичњака, улази у сливнике, преливи, као и фино „спајање“ мозаика површина (кровови, асфалт, поплочања, травњаци). Ако LULC слој нема довољно фину резолуцију да разликује ове објекте и њихове рубове, хидродинамички модели погрешно распоређују коефицијенте отицаја/инфилтрације и добијају нетачне путање и дубине течења. Прегледна студија о урбаном плављењу експлицитно истиче да квалитет и резолуција улазних података о површини (укључујући LULC) пресудно утичу на перформансе 2D модела у градовима (Gou et al., 2021).

Груба просторна резолуција (нпр. 10–30 m) и генерална LULC класификација у урбаним подручјима спајају више различитих категорија земљишног покривача у један пиксел, што узрокује систематске грешке у моделима отицања, посебно због губитка информација о малим објектима као што су уски травнати појасеви, ивичњаци и асфалтне површине. Истраживања показују да употреба података високе резолуције (1–2 m и мање) може значајно изменити расподелу симулираних дубина и локације задржавања воде у урбаним срединама, али само уз довољно детаљну и тачну LULC класификацију (Su et al., 2022; Andualet et al., 2023; Ozdemir et al., 2013).

За поуздано разликовање „хидраулички релевантних“ класа (кровови по материјалу, асфалт vs. поплочање, ниски/високи травњаци, земљиште у радовима, вегетација) најбоље резултате дају снимци врло високе резолуције (VHR – very high resolution) и/или LiDAR скенови у комбинацији са OBIA (Object-Based Image Analysis). Више радова потврђује да OBIA над VHR снимцима уз помоћ LiDAR-а повећава укупну тачност урбаних LULC мапа и омогућава увођење финеса (нпр. класификацију објеката по висини/nDEM), што је пресудно за хидрауличке прорачуне (Williams et al., 2018; Li & Shao, 2014; Zou et al., 2016). Примена OBIA приступа смањује могућност грешке при класификацији појединачних пиксела и шум који долази од обраде појединачних пиксела при снимцима високе резолуције (Šurjanac et al., 2022). Слика 7. приказује резултате класификације на основу објеката и пиксела.

Као што је поменуто многа истраживања истичу утицај резолуције и дигиталног елевационог модела (DEM) на хидролошка моделирања (Vaze et al., 2010; Li and Wong, 2010; Saksena and Marwade, 2015). Неки аутори наводе да дигитални елевациони модел (DEM) високе резолуције има значајнији утицај на процену штете од поплава него на процену ризика од поплава, услед бољег представљања инфраструктуре. На пример, Jang et al. (2021) су утврдили да повећање резолуције DEM знатно повећава прецизност мапа ризика од поплава и смањује грешку у анализама ризика по становништво за приближно 53% (Su et al., 2022), Jang et al., 2021).

У урбаним студијама је показано да повећање просторне резолуције DSM/DTM (нпр. са 10 m ка 2 m и финије) може значајно утицати на резултате 2D моделовања поплава — промену расподеле симулисаних дубина, подручја инундације и детекцију локалних депресија/уличних „цепова“; ефекат је посебно изражен у зонама малих нагиба и у „street-canyon“ морфологији. Ово је документовано у више радова који експлицитно проучавају резолуцију DEM-а, за разлику од Ochoa-Rodriguez et al. (2015) који се бави резолуцијом падавина.

У студији Muthusamy et al., (2021) показано је да употреба квалитетнијег DEM-а смањује грешку у просечној дубини поплаве са ~90 % на ~4 % и RMSE са 2.6 м на 0.9 м. Још једна студија (Jiang et al., 2022) потврђује да побољшање резолуције DEM-а значајно утиче на расподелу дубина и грешке симулација поплава.

Утицај просторне резолуције DEM-а на симулације урбаних поплава добро је документован у више студија. Истраживања показују да груби DEM (10–30 m) може довести до великих грешака у симулираним дубинама и ширини поплављене зоне јер не репродукује урбане микротопографске структуре као што су ивичњаци, рампе, локалне депресије и канали. Насупрот томе, DEM високе резолуције (1–2 m или финији) значајно унапређује репрезентацију површинских токова, укључујући токове дуж ивица коловоза и зграда. Уз то, висока резолуција омогућава тачније позиционирање улазних тачака канализације (сливници, шахтови), што побољшава 1D/2D спрезу и смањује хидрауличку грешку (Leandro et al., 2009; Chen et al., 2010; Jiang et al., 2022; Muthusamy et al., 2021).

Студије у урбаним подручјима у Европи показују да детаљнија просторна резолуција дигиталних модела терена (или података топографије) доприноси прецизнијем моделовању урбаних поплава. На пример, Jamali et al. (2018) развијају брзи модел урбане инундације и указују на значај резолуције података, а Skougaard Kaspersen et al. (2017) указују на улогу урбане морфологије у излагању плувијалним поплавама. Ово су подаци који указују да већа резолуција (нпр. испод ~5 m) може бити критична за уочавање морфолошких детаља и побољшање резултата модела.

Висока резолуција DEM-а је од нарочитог значаја за израду топографских индекса. Топографски индекс представља хидролошко квантификовање које описује природну тенденцију земљишта на одређеним тачкама пејзажа за засићење водом као резултат топографске позиције (Marthens et al., 2015). Најчешће коришћени топографски индекси су TPI – Topographic Position Index, и TWI – Topographic Water Index.

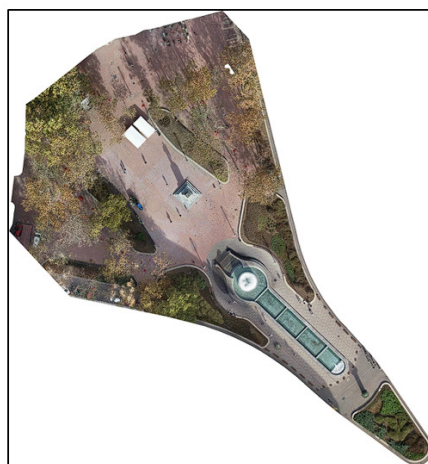
Метод Topographic Position Index (TPI) класификује положај сваког пиксела у односу на околину на основу висине. Индекс Topographic Wetness Index (TWI) процењује потенцијал акумулације воде на основу дефинисаног површинског подручја и нагиба. При томе, за урбаном моделирање поплава, неке студије указују да је коришћење модела са просторном резолуцијом бољом од ~5 m по пикселу значајно побољшава резултате (Yang et al., 2014; Su et al., 2022).

Студија у граду Guangzhou-у (Huang et al., 2019) користила је LiDAR DEM резолуције 0.5 m да би се испитала улога топографије у урбаним плувијалним поплавама. Уводи индекс TCI (Topographic Control Index) који показује где се вода може задржати у урбаном рељефу. Резултати показују да DEM високе резолуције и TCI анализа могу побољшати идентификацију зона акумулације воде и подршку моделовању, мада бројчане вредности (нпр. густина тачака, праг TCI, подударане %) нису специфично наведене у том раду.

У најновијим студијама, UAV (дрон) фотограметрија и UAV-LiDAR постају кључни извори за LULC и DSM/DTM високе густине у градовима. Примене са резолуцијом око 1 m (или финије) показују да управо такви подаци дају стабилније и реалистичније симулације плавања на равним и комплексним урбаним теренима, јер комбинују тачне рубове објеката са поузданим висинама (Trekli et al., 2022; Emrah, 2018). Сlike 8. и 9. приказују разлику у резолуцији између сателитског снимка резолуције 10 m/pix, и снимка беспилотним системом – дроном (UAV) резолуције 1.5 cm/pix.



Слика 8. Трг Николе Пашића у Београду,
резолюција 10m/pix (извор: Sentinel 2)
Figure 8. Nikola Pašić Square in Belgrade,
resolution 10 m/pixel (source: Sentinel-2)



Слика 9. Трг Николе Пашића у Београду,
резолюција 1,5cm/pix (извор: приватна архива)
Figure 9. Nikola Pašić Square in Belgrade,
resolution 1.5 cm/pixel (source: private archive)

За урбане бујице „критична“ је хидраулички ефикасна непропусна површина (EIA) која представља део изграђених површина који је заиста хидраулички повезан са сливницима/ канализацијом. Ако LULC нема довољну резолуцију и/или методу да разликује ефективне од неефективних „impervious“ површина (површине са којих се површински отицаји не сливају у сливник), модели значајно греше у вршним протицајима и времену концентрације. Методологије које полазе од фино класификованог VHR LULC-а дају боље процене EIA и смањују несигурности у урбаном отицању (William & Jack, 1983; Gulliver, 2015).

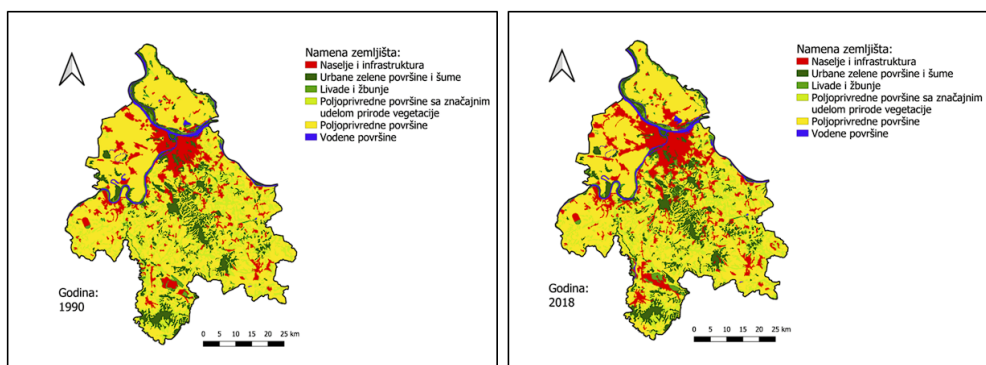
Подаци високе просторне резолуције, као што су LiDAR модели или други извори са великим детаљем, значајно побољшавају урбане modele поплава јер омогућавају бољу репрезентацију микроинфраструктуре и микротопографије (Meesuk et al., 2015). Међутим, студије истичу да у брзо мењајућим урбаним срединама важност има и ажурност и обнављање података, јер нове површине, градилишта и реконструкције могу убрзо учинити старом модели неадекватним.

У литератури се истиче да модели терена високе резолуције (npr. LiDAR) дају значајну предност у репрезентацији микро-инфраструктуре и топографских детаља у урбаним моделима поплава. При томе, неке студије истичу да брзи темпо урбаних промена (грађевински радови, нови путеви/паркинзи) захтева често обновљиве податке како би модели остали релевантни. (Meesuk et al., 2015; Leandro et al., 2009)

Један од важних аспеката анализе урбаних бујица представља и динамика промена карактеристика терена који се посматра. Промене у начину коришћења земљишта у урбаним срединама – на пример претварање зелених површина у интензивно изграђене зоне – имају директан утицај на хидрологију отицања. Студије у Пекингу и Шангају показују да пораст удела непропусних површина значајно повећава максимални површински отицај и скраћује време настанка бујице (Yang et al., 2019; Yin et al., 2016). На примеру Београда, видимо да је за период од 1990. до 2018. године дошло до смањења

зелених урбаних површина за 13%, док су се насеља и инфраструктура повећали за 33% (www.klima101.rs) што је приказано на слици 10.

Новији прегледи о урбаним поплавама изазваним кишним падавинама истичу да су управо нетачни или застарели LULC подаци један од највећих извора грешака у моделима урбаних бујица (Islam et al, 2025;).



Слика 10. Промена земљишног покривача/начина коришћења земљишта на територији Београда (извор: www.klima101.rs)

Figure 10. Land cover/land use change in the territory of Belgrade (source: www.klima101.rs)

Промене у начину коришћења земљишта у урбаним срединама, као што су претварање зелених и полупропусних површина у зоне високе изграђености, замена травнатих или земљишних површина бетоном, асфалтом и крововима, имају директан и квантитативно мерљив утицај на хидрологију отицања. Такве промене утичу на смањење инфилтрације, повећање брзине површинског отицања и скраћење времена концентрације, чиме се појачава интензитет и убрзава формирање урбаних бујица (Fletcher et al., 2013; Miller & Hutchins, 2017).

Промене у начину коришћења земљишта у урбаним подручјима утичу на хидролошки одзив читавог слива, не само кроз повећање непропусних површина, већ и кроз промену просторне конфигурације урбаних блокова, дренажних канала и зелених зона. Урбанизација доводи до фрагментације природних површина, уклањања вегетације и стварања повезаних површина са ниским инфилтрационим капацитетом, што повећава површинско отицање и доводи до наглашенијег вршног протицаја и већег ризика од настанка урбаних бујица (Fletcher et al., 2013). Ови процеси су посебно изражени у градским зонама које пролазе кроз интензивне реконструкције и ширење транспортне инфраструктуре, што доводи до брзих микро-топографских промена и измена путева отицања (Zölch et al., 2017).

Урбанизација у Пекингу добар је пример овог тренда. Анализе на основу Landsat сцена и просторног моделирања показале су да је постепени раст непропусних површина у централним деловима града током последњих деценија довео до приметног повећања површинског отицања током интензивних падавина и промене динамике одвода воде у локалним сливовима (Hu et al., 2020). Аутори истичу да је при моделирању урбаних сливова потребно узети у обзир временске серије промена начина коришћења земљишта, јер чак и умерена урбанизација може значајно утицати на укупни хидролошки биланс. SWMM (Storm Water Management Model), развијен од стране EPA-е (Environmental Protection Agency), представља један од најфлексбилнијих и најчешће коришћених

модела за анализу урбаног отицања. Модел може да интегрише различите врсте података: топографске моделе, LULC класификације, падавине, структуру канализационе мреже, инфилтрационе параметре и хидрауличке карактеристике материјала (Rossman, 2015). Симулациони оквир SWMM-а омогућава кориснику да анализира како промене у површинама (нпр. замена пропусних површина непропусним), реконфигурација мреже канала или имплементација LID/SuDS мера утичу на динамику отицања током различитих падавинских догађаја.

SWMM се у литератури описује као модел који даје поуздане резултате у анализама урбаних бујица, посебно зато што подржава динамичко моделирање 1D протока у цевоводима, преливању у шахтовима и појави локалних површинских плављења у условима преоптерећења система. У комбинацији са ажурним просторним подацима, овај модел омогућава процену ефеката урбанизације, климатских сценарија, измена у начину коришћења земљишта и примене зелене инфраструктуре (Hamel et al., 2020).

Урбанизација – нарочито раст непропусних површина (асфалт, бетон, кровови) и фрагментација зелених зона – доводи до смањења инфилтрације, повећања запремине и брзине површинског отицаја, бржег формирања вршних протока и скраћивања времена одзива урбаних сливова. Ово је конзистентно показано у синтетичким прегледима урбане хидрологије и моделисања (нпр. систематизован преглед стања области) (Fletcher et al., 2013).

Студија за Пекинг показује да се промена начина коришћења земљишта (LULC) током деценија може поуздано пратити Landsat сценама (1984–2019) и да је раст непропусних површина у централним деловима града повезан са повећањем површинског отицаја (рачунато SCS-CN методом), што потврђује везу урбанизације и интензивнијег одзива слива на падавине (Hu et al., 2020).

SWMM омогућава спајање хидролошких процеса (падавина, инфилтрација, евапотранспирација, акумулација на површини) са 1D хидрауличким током у канализационој мрежи (цевоводи, шахтови, преливи, пумпе, резервоари) и подржава анализу LID/SuDS мера, сценарија урбанизације и климе (EPA, 2025).

Тачност урбаних симулација поплава осетљива је на просторну резолуцију и квалитет топографских и LULC улаза. Показано је да прелазак са грубљих DEM-ова на финије (нпр. од 10–30 m ка 1–2 m) мења расподелу симулираних дубина и простор поплаве; истраживања такође наглашавају да третман зграда и друге урбане инфраструктуре (мрежа улица/ивичњаци/преливи) знатно утичу на резултате. Додатно, поређења fine (0,5 m) и грубље (5–20 m) топографије у урбаним условима показују погоршања метрика поплаве при деградацији резолуције (Muthusamy et al, 2021).

У контексту микротопографије, за град Гуангџоу је предложен TCI (Topographic Control Index) који, заснован на LiDAR DEM-у резолуције 0,5 m, квантитује топографску контролу над плувијалним поплавама и боље кореспондира са историјским записима поплављивања него класични TWI у густо изграђеним зонама. Ово наглашава значај врло високих резолуција за препознавање локалних депресија и „цепова“ задржавања воде у урбаном ткиву (Huang et al., 2019).

Паралелно, недавне синтезе урбаног поплавног моделирања истичу потребу усклађивања просторних резолуција улазних слојева (DEM/DTM, LULC, инфраструктура) јер неслагања у резолуцији и квалитету уносе структурне грешке у расподелу дубина/брзина и у идентификацију критичних локација (нпр. улазне тачке, преливи, уске уличне депресије).

LiDAR високе густине (≥ 8 тачака/ m^2) тренутно се сматра најпоузданијим извором

за изградњу DTM и DSM високог квалитета у урбаним подручјима, јер омогућава прецизно раздвајање висина објеката, кровишта, вегетације и коловозних површина, и тиме додаје хидраулички релевантне баријере и канале у 2D моделе (Gallien, Schubert & Sanders, 2011). Међутим, висока цена и ограничена доступност чине овакве податке често недоступним, нарочито у срединама које немају редовне LiDAR кампање.

Због тога се у најновијим радовима развијају хибридни приступи, где се грубљи DEM (нпр. Copernicus 5 m, ALOS, SRTM) комбинује са машинским учењем, LULC класификацијом и морфометријским параметрима како би се кориговале грешке висине у урбаним зонама, посебно дуж рубова зграда, падних линија улица и насипа (Okolie, Mills, Adeleke & Smit, 2023). Овакве технике демонстрирале су смањење RMS грешке висине за 30–40%, што значајно побољшава усмеравање тока у хидрауличким моделима.

Ови наводи показују да није пресудна само количина (TIA), већ хидрауличка повезаност тј. EIA, јер управо она контролише колико падавина заиста моментално улази у мрежу и формира отицај/вршне протицаје. Зато висока просторна резолуција и фино класификован LULC (VHR + LiDAR/UAV) омогућавају да боље разликујемо површине које заиста теже сливницима од оних које не теже (нпр. дворишта, перивоји, пропусни платои), као и да уведемо „тежинско повезивање“ (нпр. удаљеност до најближе цеви/сливника) уместо грубог третмана „све је исто“. Резултат овога су реалнији коефицијенти отицаја и мање грешке у вршним протоцима и времену концентрације (Wiliam & Jack, 1983; Gulliver, 2015).

3.3. Инфилтрација површинско отицање и нанос

Урбанизација током последњих деценија у великој мери је изменила хидролошко функционисање урбаних сливова. Повећање непропусних површина доводи до значајног смањења инфилтрације, раста површинског отицаја и бржег достизања вршних протицаја, што је у потпуности потврђено у прегледним радовима урбане хидрологије (Fletcher, Andrieu & Hamel, 2013). Непропусни материјали као што су асфалт, бетон и збијене пешачке површине стварају услове у којима је инфилтрација минимална, а површински водени филм формира се готово одмах након почетка падавине, чиме се генерише тренутни површински отицај (Fletcher et al., 2013).

Иако се често претпоставља да су „зелене“ урбане површине способне за ефикасну инфилтрацију, бројне студије показују да су травњаци и паркови у градским условима често подвргнути јаком збијању земљишта услед пешачког саобраћаја, одржавања, или недостатка дебљег вегетационог слоја, што може значајно умањити њихову инфилтрациону способност (Gregory, Dukes, Jones & Miller, 2006). Наведено значи да картографски зелена зона не мора хидраулички да функционише као пропусна површина, што је чест узрок грешака у моделима који користе један или неколико „просечних“ инфилтрационих параметара за цело урбано подручје (Elliott & Trowsdale, 2007).

Поред тога, у урбаним условима током интензивних пљускова долази до мобилизације финог и средње крупног наноса са улица, градилишта и површина без вегетације. Овај материјал може да се акумулира у сливницима и улазним решеткама, смањујући њихов проточни капацитет. Експерименталне студије показују да делимично зачепљење решетки може смањити њихов хидраулички капацитет и до 55%, што изазива локална задржавања воде и појаву површинских плавења чак и када је капацитет цевовода формално довољан (Hao, Mu & Shi, 2021). Ово се често јавља у старијим урбаним зонама са густом инфраструктуром, где моделисање поплава захтева увођење параметара

везаних за стање сливника и наноса (Löwe & Arnbjerg-Nielsen, 2020).

Због наведених ограничења, савремени приступи управљању урбаним отицајем све више укључују комбиновање традиционалне „сиве“ инфраструктуре са системима зелене и плаве инфраструктуре (LID/SuDS мере), као што су пропусни коловози, инфилтрационе јаме, кишне баште и биосвејл-системи (Bioswale). Систематски прегледи показују да овакве мере могу значајно умањити вршни проток и укупни обим отицаја, при чему ефекти зависе од типа мере и удела третиране непропусне површине (Ahiablame, Engel & Chaubey, 2012). Мета-анализа моделских истраживања на нивоу сливова показује да сваки додатни процентни поен третиране непропусне површине LID/SuDS мерама у просеку доводи до око 0,60% смањења вршног протока и око 0,43% смањења укупног отицаја (Bell et al., 2020).

3.4. Интеракција урбаних бујица и канализационих/дренажних система

Урбани сливови представљају комплексно хидролошко-хидраулично окружење у коме се спрезају процеси површинског отицаја (2D) и подземне дренажно-канализационе мреже (1D). Како наводи Guo и сарадници (2021), „дренажна мрежа игра кључну улогу у одвођењу површинског отицаја у урбаним срединама; занемаривање или лоша процена може довести до погрешних симулација дубина површинског протицаја, зоне плавлeња, и трајања“. То значи да модели који посматрају само 2D ток без укључивања 1D мреже често прецењују обим површинског плавлeња, јер нема реалног одвода воде кроз цеви (Guo et al., 2021).

Супротно томе, студије попут Leandro, Chen, Djordjević и Savić (2009) пореде моделе 1D/1D и 1D/2D и показују да спрезање површинског и подземног тока доводи до значајно реалистичнијих резултата: „спрегнути 1D/2D модел показао је да поплавни талас може стићи до центра града четири сата раније у односу на модел који не садржи 1D компоненту.“ (Leandro et al., 2009). Ово указује да искључивање подземне мреже може довести до значајног закашњења у предвиђању поплава или чак потцењивања ризика.

Моделирање слива у пракси захтева адекватне податке о површинској топографији, мрежи улица и канала, као и дубинским и геометријским карактеристикама дренажне/канализационе мреже. Истраживање Bertsch, Glenis и Kilsby (2017) указује да „недостатак података о улазним тачкама (сливницима) спречава кориснике да у потпуности искористе могућности ових алата за моделирање“. То је посебно важно у густо изграђеним урбаним срединама где „уличне депресије, шахтови и преливи представљају кључне тачке размене између 2D и 1D домена“.

У том контексту, новији модели интегрисаног карактера представљају фазирану архитектуру: 2D модул за површински ток, модул за размену протока између површине и шахтова, и 1D модул за транспортовање воде кроз мрежу. На пример, Dong и сарадници (2022) наводе: „Комплетан хидродинамички модел за урбане поплаве састоји се од 2D модула површинског отицаја, модула за размену протока, и модула канализационе мреже“.

Овакав интегрисани приступ омогућава реалистичан приказ динамике урбаних бујица: од формирања брзих токова улицама и подвожњацима, преко улаза у шахтове и канализацију, до евентуалног преливања цеви и повратног пуњења улица. Међутим, без тачних и ажурних података о улазима у мрежу, пречницима цеви, kotaма дна и круна, стању филтрирања и зачепљења, чак и сложени модели 2D/1D не могу дати поуздане резултате (Bertsch et al., 2017).

У пракси, због изазова у добијању детаљних података мреже, препоручује се фазни приступ: прво 1D/2D модел са „добром“ топографијом и површинским подацима, а затим поступно ажурирање мреже када су подаци доступни. Студија Весеиро-а (2016) наглашава да „традиционални 1D модели урбане канализационе мреже треба користити када је капацитет цевовода адекватан или ради спровођења почетне анализе за идентификацију зона потенцијалног плављења”.

3.5. Приступи решавању и смањењу ризика

Савремени приступи ублажавању ризика од урбаних бујица ослањају се на скуп комплементарних мера које делују од „извора“ отицаја до дренажно-канализационе мреже и оперативног управљања. У домену „изворишног управљања“ (LID/SuDS), зелена инфраструктура као што су зелени кровови, пермеабилни коловози, кишне баште и биосвејл-системи показано смањује вршне протицаје и укупни отицај, при чему је величина ефекта контекстуално зависна (клима, димензионисање, распоред мера). Мета-анализа моделских истраживања на нивоу сливова показује да сваки додатни процентни поен третиране непропусне површине у просеку доводи до $\approx 0,60\%$ смањења вршног протока и $\approx 0,43\%$ смањења укупног отицаја (Bell et al., 2020), док прегледни радови систематски документују функционалне механизме (задржавање, инфилтрација, евопотранспирација) и широку примену LID мера у пракси (Ahiablame, Engel & Chaubey, 2012).

Паралелно са „зеленим“ мерама, кључно је унапређење и одржавање канализационо-дренажних система: повећање капацитета, увођење ретенционих/балансних базена и редовно одржавање улаза (сливника, решетки). Експериментална студија показује да делимично зачепљење улазних решетки мерљиво повећава нивое воде уз улаз и смањује проточни капацитет, што директно повећава локалне дубине и трајање плављења (Hao, Mu & Shi, 2021). Када недостају или су непоуздани подаци о улазима/сливницима, могуће је прибегнути методама синтетичког картирања улазних тачака ради спровођења у потпуности спрегнутих 1D/2D симулација; показано је да добро калибрисане синтетичке мреже могу приближити поље струјања (површина + захват улаза) резултатима добијеним са стварном, снимљеном мрежом (Bertsch, Glenis & Kilsby, 2017).

Све већу улогу има интегрисано 1D–2D моделирање, у коме су површински ток (2D) и подземна мрежа цеви/шахтова (1D) хидраулички повезани. Преглед најсавременијих модела наглашава да изостављање или поједностављивање дренажне мреже води ка погрешној симулацији дубина, обима и трајања инундације, нарочито на локалном нивоу (Guo, Guan & Yu, 2021). Упоредне студије показују да 1D/2D спрезање у односу на неспрегнуте приступе даје реалистичније временско-просторне обрасце плављења и може значајно променити процену времена доласка поплавног таласа у кључне делове града (Leandro, Chen, Djordjević & Savić, 2009).

За поуздано моделирање и оперативно управљање потребни су ажурни и довољно детаљни просторни и инфраструктурни подаци. У урбаном окружењу где се површине и објекти брзо мењају, све чешће се комбинују подаци високе резолуције (DEM/DSM, LULC) са радарским/пловиографским падавинама и мониторингом у реалном времену (real-time). Даљинска детекција уз помоћ UAV (дронов) користи се за израду ортофото-снимака, детаљних DSM-ова и LULC класификација, али и за валидацију резултата модела упоређивањем са стварним записима догађаја; нови рад показује управо валидацију моделских резултата UAV производима и записима о стварним поплавама (Clasing,

Muñoz & Arumí, 2023). На стратешком нивоу, приступ „sponge city“ у Кини експлицитно ставља приоритет на контролу отицаја на извору, као меру која смањује укупан отицај и оптерећење ценовода, уз додатне ко-бенефите (Yin et al., 2022; Yin et al., 2021).

4. ЗАКЉУЧАК

Управљање ризиком од урбаних бујица захтева много више од класичног димензионисања одводне инфраструктуре. Савремена истраживања показују да кључ успеха лежи у интеграцији просторних података високе резолуције, детаљних података о канализационо-дренажној мрежи, као и у употреби спрегнутих 1D–2D хидрауличких модела. Истраживање Fewtrell и сарадника (2008) указује да модел урбаних поплава мора да садржи микротопографске елементе, јер груба резолуција доводи до значајних грешака у процени дубина и динамике плављења. Слично томе, Dottori, Di Baldassarre & Todini (2013) наглашавају да подаци високе резолуције јесу неопходни, али да морају бити коришћени „са опрезом“, јер висока прецизност без валидних улазних података може довести до „лажне сигурности“ у резултатима модела.

Поред површинских података, квалитет и ажурност података о канализационој мрежи имају пресудан значај. Интеграција 2D површинског тока и 1D подземне мреже показано унапређује реалистичност модела, док занемаривање канализационе мреже доводи до систематских грешака у процени инундације (Leandro et al., 2009). Овај закључак додатно потврђује свеобухватни преглед Guo, Guan & Yu (2021), који истиче да комбинација 1D–2D приступа најбоље репродукује механизме преливања, интеракцију површинског и подземног тока и локалне хидрауличке појаве.

У домену прикупљања података, значајан напредак постигнут је употребом LiDAR технологије, посебно у урбаним срединама. LiDAR обезбеђује детаљне DEM/DSM моделе са јасним приказом зграда, улица и микрорељефа, који су од суштинске важности за симулације површинског тока (Zhang et al., 2019). У комбинацији са UAV-фотограметријом, која омогућава брзо и флексибилно ажурирање података у зонама где се инфраструктура динамично мења, могуће је добити висококвалитетне ортопроизводе и DSM-ове који служе као поуздана основа за моделирање (Clasing, Muñoz & Arumí, 2023). Даљинска детекција (Remote Sensing - RS), укључујући сателитске сензоре високе резолуције, игра све значајнију улогу у аутоматизованој LULC класификацији, праћењу промена и детекцији узрока и последица урбаних бујица (Tian et al., 2022). Када се подаци из LiDAR-а, UAV-а и сателитских платформи унакрсно комбинују, добија се фузија која значајно подиже поузданост улазних слојева, што је неопходно за сложене хидрауличке моделе.

Узимајући у обзир наведено, будући развој урбане хидрологије треба да се креће ка:

1. стандардизацији минималних резолуција за DEM/DSM и LULC у урбаним зонама,
2. операционализацији аутоматизоване LiDAR/UAV/RS фузије,
3. увођењу реално-временских 1D–2D модела за рано упозоравање,
4. континуираном развоју инфраструктурних база података.

Такви модели не само да повећавају научну тачност симулација, већ и омогућавају поуздано доношење одлука, правовремену интервенцију и ефикасно управљање урбаним ризицима.

Захвалница: Истраживање је подржало Министарство за науку, технолошки развој и иновације Републике Србије (бр. уговора 451-03-136/2025-03/ 200027, датум 04.02.2025. године).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2012). Effectiveness of low impact development practices: Literature review and suggestions for future research. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223, 4253–4273.
2. Afifi, Z., Chu, H.-J., Kuo, Y.-L., Hsu, Y.-C., Wong, H.-K., & Ali, M. Z. (2019). Residential flood loss assessment and risk mapping from high-resolution simulation. *Water*, 11(4), 751.
3. Agonafir, C., Farhadi, H., & He, J. (2023). A review of recent advances in urban flood research. *Urban Climate*, 47, 101–215.
4. Allan, R. P., & Soden, B. J. (2008). Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 321(5895), 1481–1484. <https://doi.org/10.1126/science.1160787>
5. Allnutt, C., Gericke, O., & Pietersen, J. (2020). Estimation of time parameter proportionality ratios in large catchments: Case study of the Modder–Riet river catchment, South Africa. *Journal of Flood Risk Management*, 13(3), e12627.
6. Alves, A., Gersonius, B., Kapelan, Z., Vojinovic, Z., & Sanchez, A. (2018). Assessing the co-benefits of green–blue–grey infrastructure for sustainable urban flood risk management. *Journal of Environmental Management*, 239, 244–254.
7. Bacchi, B., Balistocchi, M., and Grossi, G. (2008). “Proposal of a semi-probabilistic approach for storage facility design.” *Urban Water J.*, 5(3), 195–208.
8. Bakhtiari, V., Piadeh, F., Behzadian, K., & Kapelan, Z. (2023). A critical review for the application of cutting-edge digital visualisation technologies for effective urban flood risk management. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104958.
9. Beceiro, P. M. G. (2016). 1D/2D integrated modelling and performance. (Unpublished doctoral thesis). Universidade Técnica de Lisboa
10. Bell, C. D., Panos, C. L., Bhaskar, A. S., Gilliom, R. L., Hogue, T. S., Hopkins, K. G., Jefferson, A. J., & Wolfand, J. (2020). Stormwater control impacts on runoff volume and peak flow: A meta-analysis of watershed modeling studies. *Hydrological Processes*, 34(11), e13784.
11. Bertsch, R., Glenis, V., & Kilsby, C. (2017). Urban flood simulation using synthetic storm drain networks. *Water*, 9(12), 925.
12. Berne, A., Delrieu, G., Creutin, J. D., & Obled, C. (2004). Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*, 299(3-4), 166-179.
13. Berndtsson, R. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 70, 351–360.
14. Bornstein, R., & Lin, Q. (2000). Urban heat island and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. *Atmospheric Environment*, 34(3), 507–516. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00374-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00374-X)
15. Carr, R. S. & Smith, G. P. (2006) Linking of 2D and pipe hydraulic models at fine spatial scales. 7th International Conference on Urban Drainage Modelling and 4th International Conference on Water Sensitive Urban Design, 2-7 April 2006, Melbourne, Australia, 2, 361-368.
16. Cea, L., Cerqueira, M., & Pinho, J. (2025). Recent advances and future challenges in urban pluvial flood modelling. *Urban Water Journal*.
17. Chen, A. S., Djordjević, S., Leandro, J., & Savić, D. A. (2007). The urban inundation model with bidirectional flow interaction between 2D overland surface and 1D sewer

- networks. In 11th International Conference on Urban Drainage (pp. 1–10).
18. Chen, A. S., Evans, B., Djordjević, S., & Savić, D. (2010). A coarse-grid approach to representing building blockage effects in 2D urban flood modelling. *Journal of Hydrology*, 381(1–2), 18–28.
 19. Clasing, R., Muñoz, E., & Arumí, J. L. (2023). Remote sensing with UAVs for flood modeling: A validation with actual flood records. *Water*, 15(21), 3813.
 20. Dong, B., et al. (2022). Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles. *Science of The Total Environment*.
 21. Dottori, F., Di Baldassarre, G., & Todini, E. (2013). Detailed data is welcome, but with a grain of salt: Accuracy, precision, and uncertainty in flood inundation modelling. *Water Resources Research*, 49(9), 6079–6085.
 22. Elliott, A. H., & Trowsdale, S. A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, 22(3), 394–405.
 23. Emrah, Y. (2018). Generation of high-resolution digital surface models for urban flood modelling using UAV imagery. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 215, 357–366.
 24. EPA – United States Environmental Protection Agency (2025) Storm Water Management Model Software and Documentation <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> (приступљено 7. новембар 2025)
 25. Falconer, R. H., Cobby, D., Smyth, P., Astle, G., Dent, J., & Golding, B. (2009). Pluvial flooding: New approaches in flood warning, mapping and risk management. *Journal of Flood Risk Management*, 2(3), 198–208.
 26. Fewtrell, T., Duncan, A., Sampson, C., Neal, J., & Bates, P. (2011). Benchmarking urban flood models of varying complexity and scale using high-resolution terrestrial LiDAR data. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(7–8), 281–291.
 27. Fletcher, T. D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51, 261–279. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>
 28. Gallien, T. W., Schubert, J. E., & Sanders, B. F. (2011). Predicting tidal flooding of urbanized embayments: A modeling framework and data requirements. *Coastal Engineering*, 58(6), 567–577.
 29. Gregory, J. H., Dukes, M. D., Jones, P. H., & Miller, G. L. (2006). Effect of urban soil compaction on infiltration rate. *Journal of Soil and Water Conservation*, 61(3), 117–124.
 30. Gulliver, J. (2015). Determination of Effective Impervious Area in Urban Watersheds (Research Project). University of Minnesota.
 31. Guo, K., Guan, M., & Yu, D. (2021). Urban surface water flood modelling—A comprehensive review of current models and future challenges. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 2843–2860.
 32. Hamel, P., Daly, E., & Fletcher, T. D. (2020). Which green infrastructure types have the greatest hydrological benefit? A systematic review. *Ecological Engineering*, 143, 105–106.
 33. Han, J.-Y., Baik, J.-J., & Lee, H. (2014). Urban impacts on precipitation. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(1), 17–30.
 34. Hao, X., Mu, J., & Shi, H. (2021). Experimental study on the inlet discharge capacity under different clogging conditions. *Water*, 13(6), 826.
 35. Huang, H., Chen, X., Wang, X., Liu, L., & (остали) (2019). A depression-based index to represent topographic control in urban pluvial flooding: Case study in Guangzhou, China.

36. Hu, S., Fan, Y., & Zhang, T. (2020). Assessing the effect of land use change on surface runoff in a rapidly urbanized city: A case study of the central area of Beijing. *Land*, 9(10), 343.
37. Islam, T., Zeleke, E. B., Afroz, M., & Melesse, A. M. (2025). A systematic review of urban flood susceptibility mapping. *Remote Sensing*, 17(3), 524.
38. Jamali, B., Löwe, R., Bach, P. M., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2018). A comprehensive approach to urban flood modeling. *Urban Water Journal*, 15(4), 298–312.
39. Jamali, B., Löwe, R., Bach, P. M., Urich, C., Arnbjerg-Nielsen, K., & Deletic, A. (2018). A rapid urban flood inundation and damage assessment model. *Journal of Hydrology*, 564, 1085–1098.
40. Jiang, W., Li, X., & Zhang, Q. (2022). Understanding the effects of digital elevation model resolution and building treatment for urban flood modelling. *Geoscience Frontiers*, 13(6), 101424.
41. Kim, Y. D., Tak, Y. H., Park, M. H., & Kang, B. (2020). Improvement of urban flood damage estimation using a high-resolution digital terrain. *Journal of Flood Risk Management*, 13(S1), e12575.
42. Klimat101. <https://klimat101.rs/srbija-poplave-maj-jun-2023/> (accessed 07.11.2025.год.)
43. Komolafe, A. A., Herath, S., & Avtar, R. (2018). Sensitivity of flood damage estimation to spatial resolution. *Journal of Flood Risk Management*, 11(S2), S370–S381.
44. Leandro, J., Chen, A. S., Djordjević, S., & Savić, D. A. (2009). Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (sewer/surface) hydraulic models for urban flood simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(6), 495–504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000037](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000037)
45. Leitao, J. P., Simões, N. E., Maksimović, Č., Ferreira, F., Prodanović, D., Matos, J. S., & Marques, A. S. (2010). Real-time forecasting urban drainage models: full or simplified networks? *Water Science and Technology*, 62(9), 2106–2114. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.382>
46. Li, J., & Wong, D. W. S. (2010). Effects of DEM sources on hydrologic applications. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(3), 251–261.
47. Li, X., & Shao, G. (2014). Object-based land-cover mapping with high-resolution aerial photography at a county scale in Midwestern USA. *Remote Sensing*, 6(11), 11372–11390. <https://doi.org/10.3390/rs6111372>
48. Liu, J., Niyogi, D., Berardi, A., Halder, S., & Mishra, V. (2019). Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification. *Earth's Future*, 7(11), 1317–1335.
49. Liu, J., & Niyogi, D. (2019). Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification. *Scientific Reports*, 9(1), 7301. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43162-4>
50. Löwe, R., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2020). Urban pluvial flood risk assessment – Data resolution and spatial scale when developing screening approaches on the microscale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(4), 981–997.
51. Ma, Y., Cui, Y., Tan, H., & Wang, H. (2022). Case study: Diagnosing China's prevailing urban flooding—Causes, challenges, and solutions. *Journal of Flood Risk Management*, 15(3), e12822. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12822>
52. Marthews, T. R., Dadson, S. J., Lehner, B., Abele, S., & Gedney, N. (2015). High-resolution global topographic index values. NERC Environmental Information Data Centre. <https://doi.org/10.5285/f8f98678-43dd-4ca0-8ec1-5fde3e964b0e>
53. Mason, D. C., Horritt, M. S., Dall'Amico, J. T., Scott, T. R., & Bates, P. D. (2009).

- Improving river flood extent delineation from synthetic aperture radar using airborne laser altimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8), 248–252. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2019269>
54. McEnroe, B. M., Young, C. B., & Gamarra Zapata, R. A. (2016). Estimation of watershed lag times and times of concentration for the Kansas City Area (Report No. KS-16-01). Kansas Department of Transportation.
 55. Meesuk, V., Vojinovic, Z., Mynett, A., & Abdullah, A. F. (2015). Urban flood modelling combining top-view LiDAR data with ground-view SfM observations. *Advances in Water Resources*, 75, 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.11.008>
 56. Miao, S., Chen, F., LeMone, M. A., Tewari, M., Li, Q., & Wang, Y. (2011). An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(4), 806–825. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2518.1>
 57. Miller, J. D., & Hutchins, M. (2017). The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 345–362. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.06.006>
 58. Muthusamy, M., Casado, M. R., Butler, D., & Leinster, P. (2021). Understanding the effects of Digital Elevation Model resolution in urban fluvial flood modelling. *Journal of Hydrology*, 596, 126088
 59. Neal, J. C., Bates, P. D., & Fewtrell, T. J. (2013). Urban flood modelling. In G. Di Baldassarre (Ed.), *Floods in a Changing Climate: Inundation Modelling* (pp. 69–77). Cambridge University Press.
 60. Ochoa-Rodriguez, S., Wang, L.-P., Gires, A., Pina, R., Reinoso, R., Bruni, G., Cristiano, E., van Assel, J., Kroll, S., Muthusamy, M., Simões, N., Marques, A., Onof, C., Maksimović, Č., Willems, P., & ten Veldhuis, M.-C. (2015). Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling. *Journal of Hydrology*, 531, 389–407. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.035>
 61. Ogden, F. L., Sharif, H. O., Senarath, S. U. S., Smith, J. A., Baeck, M. L., & Richardson, J. R. (2000). Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997. *Journal of Hydrology*, 228(1–2), 82–100. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00146-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00146-3)
 62. Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
 63. Okolie, C., Mills, J., Adeleke, A., & Smit, J. (2023). Digital elevation model correction in urban areas using extreme gradient boosting, land cover and terrain parameters. *arXiv:2308.06545*. <https://arxiv.org/abs/2308.06545>
 64. Ozdemir, H., Sampson, C. C., de Almeida, G. A. M., and Bates, P. D. (2013) Evaluating scale and roughness effects in urban flood modelling using terrestrial LIDAR data, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 4015–4030,
 65. Pandiwijaya, A., Anjani, V., Ekadinata, A., Dewi, S., Prasetyo, A. (2013). Hierarchical Object-Based Classification System For Land Use/Cover Mapping Of Vietnam, *Asian Conference of Remote Sensing 2013*
 66. Petticrew, M., & Roberts, H. (2006). *Systematic reviews in the social sciences: A practical guide*. Blackwell Publishing.
 67. Rangari, V., Prashanth, Sriramoju, Umamahesh, N., Patel, A. (2108) Simulation of urban drainage system using a Storm Water Management Model (SWMM), *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*, Vol 7, no. S1, p. 7-10.

68. Rosenfeld, D., Lohmann, U., Raga, G. B., O'Dowd, C. D., Kulmala, M., Fuzzi, S., Reissell, A., & Andreae, M. O. (2008). Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? *Science*, 321(5894), 1309–1313. <https://doi.org/10.1126/science.1160606>
69. Rosenzweig, B. R., Herreros Cantis, P. L., Kim, Y., Cohn, A., Grove, K., Brock, J., Palmer, M., McPhearson, T., ... Solecki, W. (2021). The value of urban flood modeling. *Earth's Future*, 9, e2020EF001739. <https://doi.org/10.1029/2020EF001739>
70. Rossman, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual – Version 5.1*. U.S. Environmental Protection Agency.
71. Saksena, S., & Merwade, V. (2015). Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 530, 180–194.
72. Salvatore, E., Bronders, J., & Batelaan, O. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology*, 529, 62–81.
73. Schubert, J. E., & Sanders, B. F. (2012). Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency. *Advances in Water Resources*, 41, 49–64.
74. Seyoum, S.D., Vojinovic, Z., Price, R.K., & Weesakul, S. (2012). Coupled 1D and Noninertia 2D Flood Inundation Model for Simulation of Urban Flooding. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138, 23-34.
75. Shepherd, J. M., Burian, S. J., Hartmann, D. L., Hjelmfelt, M. R., Chow, F. K., & Hong, S.-Y. (2002). Rainfall modification by major urban areas: Observations from TRMM. *Journal of Applied Meteorology*, 41(7), 689-701.
76. Shepherd, J. M. (2005). A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. *Earth Interactions*, 9(12), 1–27. <https://doi.org/10.1175/EI156.1>
77. Shen, J., Tan, F., & Zhang, Y. (2018). Improved Building Treatment Approach for Urban Inundation Modeling: A Case Study in Wuhan, China. *Water*, 10(12), 1760.
78. Simões, N. E., Leitão, J. P., Pina, R. D., & de Sousa, L. M. (2011). Integrated modelling of urban drainage networks and surface flooding. *NOVATECH Proceedings*, 1–8.
79. Skougaard Kaspersen, P., Sonne, M. K., Høegh Ravn, N., Arnbjerg-Nielsen, K., Thorsen, M., Hesselbjerg Christensen, J., & Jensen, M. B. (2017). Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8), 4131–4147. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4131-2017>
80. Smith, J. A., Baeck, M. L., Meierdiercks, K. L., Miller, A. J., & Krajewski, W. F. (2007). Radar rainfall estimation for flash flood forecasting in small urban watersheds. *Advances in Water Resources*, 30(10), 2087–2097. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.09.007>
81. Su, Y.-F., Lin, Y.-T., Jang, J.-H., & Han, J.-Y. (2022). High-resolution flood simulation in urban areas through the application of remote sensing and crowdsourcing technologies. *Frontiers in Earth Science*, 9, 756198
82. Šurjanac, N., Milčanović, V., Polovina, S., Cvetković, J., Živanović, I. (2022), Application of Multispectral Sensor in Quantification of Soil Protection Coefficient (Xa) in Erosion Potential Method, *Sustainable Forestry*
83. Tian, Y., Li, X., & Gong, P. (2022). Urban land-cover classification and change analysis using high-resolution satellite imagery: A review. *Remote Sensing*, 14(3), 547.
84. Todini, E. (2025). Understanding and mitigating urban flood risk. *Hydrology*, 12(6), 146.
85. Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British*

- Journal of Management, 14(3), 207–222.
86. Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), 123–138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
 87. Trepekli, K., Balstrøm, T., Friborg, T., Fog, B., Allotey, A., Kofie, R., & Møller-Jensen, L. (2022). UAV-borne, LiDAR-based elevation modelling: A method for improving local-scale urban flood risk assessment. *Remote Sensing of Environment*, 113, 423–451.
 88. Vaze, J., Teng, J., & Spencer, G. (2010). Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software*, 25(9), 1086–1098.
 89. Walsh, C. J., Fletcher, T. D., & Burns, M. J. (2012). Urban stormwater runoff: A new class of environmental flow problem. *PLOS ONE*, 7(9), e45814.
 90. Westra, S., Fowler, H. J., Evans, J. P., Alexander, L. V., Berg, P., Johnson, F., ... & Kharin, V. (2014). Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics*, 52(3), 522–555. <https://doi.org/10.1002/2014RG000464>
 91. William, A., & Jack, A. (1983). Effective impervious area in urban runoff modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(2), 134–152.
 92. Williams, D. J., Matasci, G., Coops, N. C., & Gergel, S. E. (2018). Object-based urban landcover mapping methodology using high spatial resolution imagery and airborne laser scanning. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(4), 046020.
 93. Wilson, J. P. (2018). *Environmental applications of digital terrain modeling*. John Wiley & Sons.
 94. Winzeler, H. E., Owens, P. R., Read, Q. D., Libohova, Z., Ashworth, A., & Sauer, T. (2022). Topographic Wetness Index as a proxy for soil moisture in a hillslope catena: Flow algorithms and map generalization. *Land*, 11(11), 2018.
 95. Xu, Z., & Zhao, G. (2016). Impact of urbanization on rainfall–runoff processes: Case study in the Liangshui River Basin in Beijing, China. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 373, 7–12. <https://doi.org/10.5194/piahs-373-7-2016>
 96. Yang, P., Ren, G., & Yan, P. (2017). Evidence for a strong association of short-duration intense rainfall with urbanization in the Beijing urban area. *Journal of Climate*, 30(15), 5851–5870.
 97. Yang, L., Li, Z., Chen, J., & Zhang, Q. (2019). Long-term variations in short-duration rainfall extremes associated with urbanization in Beijing. *International Journal of Climatology*, 39(1), 342–356. <https://doi.org/10.1002/joc.5790>
 98. Yang, L., Deng, X., Li, Z., & He, S. (2014). Response of high-frequency rainy season storms to urbanization in Beijing. *Hydrology Research*, 45(4–5), 636–653. <https://doi.org/10.2166/nh.2014.111>
 99. Yang, P., Ren, G., & Yan, P. (2017). Evidence for a strong association of short-duration intense rainfall with urbanization in the Beijing urban area. *Journal of Climate*, 30(15), 5851–5870.
 100. Yin, J., Yu, D., Yin, Z., Liu, M., & He, Q. (2016). Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road networks: A case study in Shanghai, China. *Journal of Hydrology*, 537, 138–145.
 101. Yu, D., & Lane, S. N. (2006a). Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment—Part 1: Mesh resolution effects. *Hydrological Processes*, 20(7), 1541–1565.
 102. Yu, D., & Lane, S. N. (2006b). Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment—Part 2: Development of a sub-grid model. *Hydrological Processes*, 20(7), 1567–1583.

103. Zhang, W., Villarini, G., Scoccimarro, E., & Napolitano, F. (2019). Urbanization exacerbated the rainfall–runoff response of extreme precipitation events. *Geophysical Research Letters*, 46(11), 6463–6471. <https://doi.org/10.1029/2019GL082120>.
104. Zölch, T., Wamsler, C., & Pauleit, S. (2017). Regulating urban surface runoff through nature-based solutions – An assessment at the micro-scale. *Environmental Pollution*, 224, 585–597.
105. Zou, X., Zhao, G., Li, J., Yang, Y., & Fang, Y. (2016). Object-based image analysis combining high spatial resolution imagery and laser point clouds for urban land cover. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B3, 733–739.