

Modeliranje rizika od poplava korištenjem HEC-RAS-a i geoprostornih analiza

Suraj Kumar Singh

Sveučilište Suresh Gyan Vihar, dr. sc., suraj.kumar@mygyanvihar.com

Shruti Kanga

Sveučilište Suresh Gyan Vihar, dr. sc., shruti.kanga@mygyanvihar.com

Bojan Đurin

Sveučilište Sjever, dr. sc., bojan.durin@unin.hr

Nikola Kranjčić

Sveučilište u Zagrebu, dr. sc., nikola.kranjic@gfv.unizg.hr

Ratan Chaurasia

Sveučilište Suresh Gyan Vihar, M.Teh, rattan.66334@mygyanvihar.com

Danko Markovinović

Sveučilište Sjever, dr. sc., danko.markovinovic@unin.hr

Sažetak: Poplave su prirodne katastrofe, koje mogu uništiti prirodne resurse, uzrokovati žrtve i naštetiti okolišu. Poznate su po svojim smrtonosnim i razornim utjecajima. Za predviđanje važnih informacija o poplavama, kao što su opseg poplave i nadmorske visine vode na određenim lokacijama, potrebno je primijeniti hidrauličko modeliranje i mapiranje poplavnih područja (FIM). Sustav za modeliranje vodotoka (HEC-RAS) i tehnologije daljinskog istraživanja (RS), u kombinaciji s geografskim informacijskim sustavima (GIS), ključni su za praćenje poplava. Primarni naglasak u ovom radu je na definiranju poplavnih zona i izradi karata opasnosti od poplava za rizična područja. Ovaj model može dodijeliti prioritete razvoja prostora i pripremiti službe za buduću hitnu pomoć i intervencije na rizičnim mjestima.

Ključne riječi: opasnost od poplava, HEC-RAS, hidrološki modeli, geoprostorni podaci, GIS

Flood risk modeling using HEC-RAS and geospatial techniques

Abstract: Flooding is a natural disaster that can ruin natural resources, cause casualties, and harm the environment. Floods are known for their deadly and destructive impacts. To predict important information about flooding, such as the extent of inundation and water surface elevations at specific locations, hydraulic modeling and Flood Inundation Mapping (FIM) must be used. A crucial tool for flood monitoring is the HEC-RAS software and remote sensing (RS) technology, in combination with geographic information systems (GIS). The primary emphasis in this discipline revolves around the definition of flood zones and the preparation of flood hazard maps for at-risk regions. This map could allocate land development priorities, and prepare services for future emergency aid and relief interventions in at-risk locations.

Key words: flood hazard, HEC-RAS, hydrological models, geospatial data, GIS

1. UVOD

Poplave su prirodne opasnosti koje postaju katastrofe kada ugroze ljude i njihovu imovinu. Poplave su jedna od najraširenijih prirodnih katastrofa koje se često ponavljaju. Prema rječniku, poplava se može definirati kao „prelijevanje velike količine vode izvan njezinih normalnih granica, posebno preko onoga što je obično suho zemljište“. Poplave su posljedica obilnih ili neprekidnih oborina koje premašuju upojnu moć tla i zemljišta. Zbog toga dolazi do prelijevanja vode preko obala na okolne površine. Česta pojava poplava može se pripisati ekstremnim hidrometeorološkim djelovanjima i geomorfološkim čimbenicima kao što su vodopropusnost i stabilnost tla, vegetacijski pokrivač i geomorfološke karakteristike riječnog sliva, kao i nedovoljan kapacitet rijeka, zbog kojih dolazi do poplava. Intenzitetu i učestalosti poplava također su doprinijele i ljudske aktivnosti. Od pamtivijeka su ljudi uvijek nastojali razvijati se uz plodne riječne obale. Mnoge zajednice su napredovale duž poplavnih područja zbog njihovog svojstva prenošenja plodnog zemljišta. No, sve veći broj stanovnika i naseljavanje ljudi, skupa s rastom ruralne i urbane zone na rubu rijeka i u poplavnim ravninama, bez objašnjavanja i osvještavanja o dinamičkim i hidrološkim uvjetima uzvodnog područja rijeka, uvelike su povećale rizik od poplava i izložile stanovništvo opasnosti od poplava uz stalnu prijetnju od poplava koje dovode u opasnost živote i imovinu. Pritisak povećanja broja stanovnika i nedostatak zemljišta potiče razvoj naselja u poplavnoj ravnici, krčenje šuma i uklanjanje korijenskog sustava povećava otjecanje što doprinosi poplavama tijekom kišne sezone, neodržavanje i neupravljanje sustavima odvodnje i zaštitom brana u osjetljivim područjima također doprinose poplavama.

Poplave se zemljopisno mogu grupirati u tri glavne vrste poplava. Riječne poplave nastaju kada obilne oborine zahvate vodotok. Urbano plavljenje nastaje kada površinsko otjecanje premaši veličinu sustava odvodnje, što se javlja kada dođe do neprekidnog kretanja oborina po odvodima s nedovoljnim kapacitetom otjecanja vode i do plavljenja obalnih voda kad se obilne oborine u unutrašnjosti susretnu s olujnim tokovima s mora. Utjecaj događanja prirodnih katastrofa na globalnoj razini postaje sve izraženiji. Posljednjih godina bilježi se porast broja navedenih katastrofa, što ima poguban utjecaj na svjetsko gospodarstvo i broj pogođenih osoba. Među prirodnim nesrećama, katastrofe poplave smatraju se jednom od najskupljih, najrazornijih i najčešćih s ogromnom sposobnošću da civilizaciji prouzrokuju smrtnu slučajevu, štete, oštećenje imovine i financijske gubitke. Prema intenzitetu i razmjerima, poplave se dijele na manje i značajne. Kod manjih poplava vodostaji su obično ograničeni na poplavne ravnice uz riječno korito. Poplavna voda je uglavnom niska i možda neće biti zamjetljivog toka. Kada dođe do ozbiljnog puknuća brane, nasipa, ispuštanje vode u akumulacijama, jezerima ili rijekama također je odgovorno za izazivanje značajnih poplava.

Prema procjeni Ujedinjenih naroda (UN), približno 40% svjetskog stanovništva nalazi se u slivovima rijeka i jezera koji obuhvaćaju dvije ili više zemalja jako ovisnih o dostupnoj slatkoj vodi. Nedavno izvješće UN-a otkrilo je kako je tijekom posljednjih 20 godina oko 157.000 osoba umrlo zbog poplava. U izvješću se također navodi da su između 1995. i 2015. godine poplave pogodile gotovo 2,3 milijarde ljudi, što čini 56% svih pogođenih katastrofama povezanim s vremenskim prilikama. Modeliranje rizika od poplava je područje koje se brzo razvija i vrlo dinamično područje. Brzi razvoj računalne snage i raznih tehnoloških primjena pružili su novi smjer ovome području. Modeliranje opasnosti od poplava je vrlo važno za upravljanje poplavnim područjima. Postoji mnogo računalnih programa poput ArcMap, Erdas Imagine, HEC-RAS, HEC-HMS itd., koji se koriste za modeliranje rizika od poplava. Općenito su poplavne ravnice one koje su najugroženije poplavama i stoga su „izložene poplavama“ ili rizične za razvojne aktivnosti. Za prepoznavanje poplavno opasnih područja i organizaciju u smjeru smanjenja štete od poplava, organizirane su karte poplavnih zona koje se intenzivno koriste u studijama za upravljanje poplavnim područjima. Za modeliranje rizika od poplava

Singh, S. K., Kanga, S., Đurin, B., Kranjčić, N., Chaurasia, R., Markovinović, D.
Modeliranje rizika od poplava korištenjem HEC-RAS-a i geoprostornih analiza

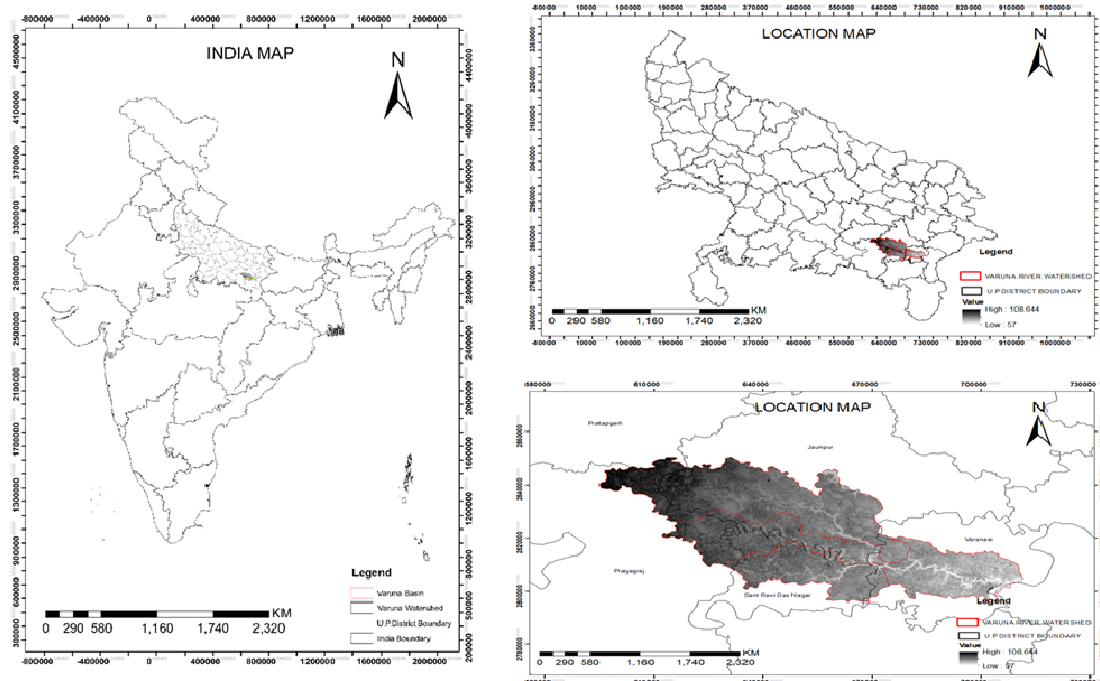
bitni su podaci visoke razlučivosti kako bi se klasificirale topografije zemljišta područja proučavanja. Uz pomoć podataka visoke razlučivosti, moguće je kategorizirati slike i izraditi karte načina uporabe i pokrova zemljišta za modeliranje rizika od poplava. Podaci visoke razlučivosti opisuju stanje rijeke, te koliko je urbano područja u blizini rijeke. Stoga je korisno razumjeti može li se u slučaju da dođe do poplave odrediti koliko će gradskog područja biti zahvaćeno i mogu se poduzeti bitne metode za smanjenje posljedica poplave. DEM visoke razlučivosti je neophodan za modeliranje opasnosti od poplava kako bi se dobile visinske vrijednosti istraživanog područja koje su važne za modeliranje opasnosti od poplava.

Karte podjele po zonama opasnosti od poplava pružaju pokazatelje o području izloženom poplavama. Karte podjele po zonama opasnosti od poplava mogu biti učinkovito sredstvo za smanjenje šteta uspostavljanjem odgovarajućih planova zaštite od poplava; podaci o područjima izloženim poplavama će se kartirati uz pomoć daljinskog istraživanja i GIS-a (Geografskog informacijskog Sustava). Satelitske slike će se koristiti za izradu karata načina upotrebe i pokrova zemljišta (eng. LULC). Ova promjena načina upotrebe i pokrova zemljišta se koristi za generiranje hidrografije poplava u HEC-HMS-u. Utjecaj promjene načina uporabe i pokrova zemljišta na vršni protok i volumen otjecanja poplava procjenjuje se za različite uvjete toka. Karte poplavnih područja i opasnosti od poplava za različite scenarije načina korištenja zemljišta izrađuju se integriranjem hidroloških i hidrauličkih modela s GIS-om i daljinskim ispitivanjem. Karte poplavnih područja izvedene iz istraživanja mogu se koristiti kao ulazni podaci za odgovarajuće planiranje zona opasnosti od poplava i predviđanje poplava.

2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Rijeka Varuna je rijeka koja presušuje, s uvjetima slabog toka koji prevladavaju tijekom sezone izvan monsuna. Izvire na 25°23'36,24"S i 82°37'36,98"E u blizini okruga Bhadohi (UP) i teče u smjeru istoka-jugoistoka približno 100 km, te se na 25°19'47,02"S i 83°2'37,10"E kod Adikeshwar Ghat-a u Varanasiju ulijeva u rijeku Ganges nizvodno od Varanasija (slika 1). Klima ovoga područja, smještenog u sjevernom dijelu Indije, je blaga i općenito topla. Ljeta su vruća s temperaturama koje dostižu i 45°C i vlažna. Prosječna godišnja količina padalina na tom području iznosi oko 998 mm, od čega najveći dio pada tijekom monsunskog razdoblja. Prvenstveni način korištenja zemljišta je u poljoprivredi, a na području nema značajnijeg šumskog pokrivača. Tlo područja je pjeskovita ilovača do ilovasto tlo. Rijeka Varuna ima ukupnu duljinu od približno 100 km.

Singh, S. K., Kanga, S., Đurin, B., Kranjčić, N., Chaurasia, R., Markovinović, D.
Modeliranje rizika od poplava korištenjem HEC-RAS-a i geoprostornih analiza



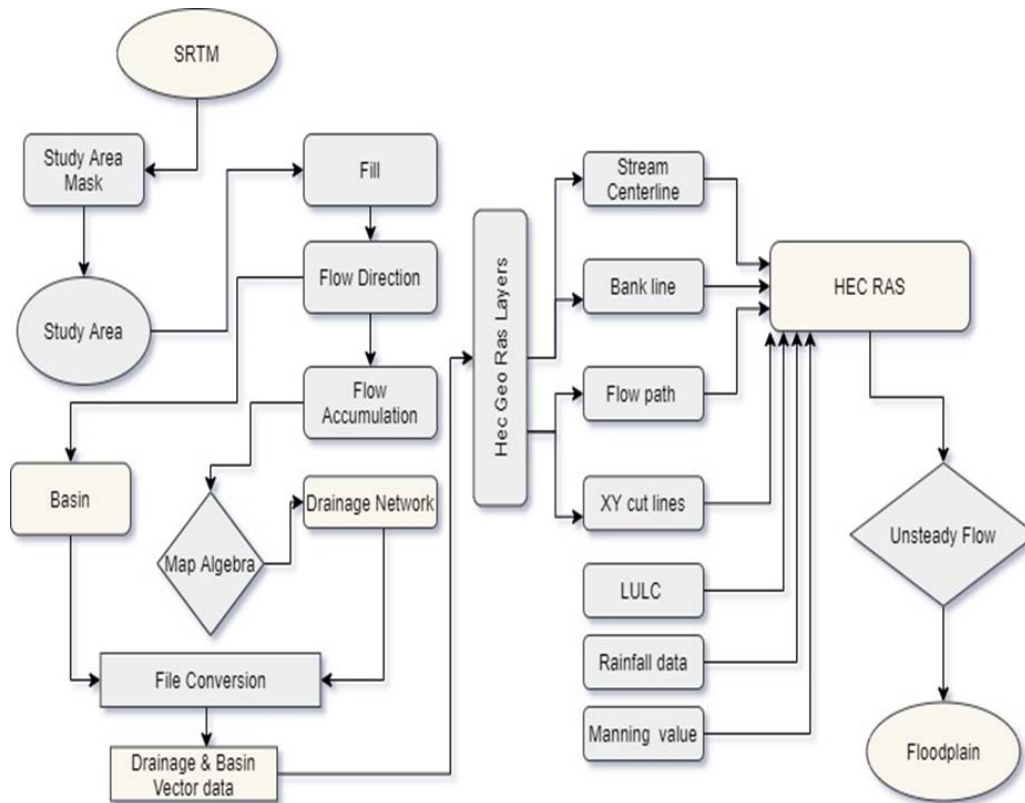
Slika 1. Karta područja istraživanja

3. MATERIJALI I METODE

Prvenstveni pristup procjeni opasnosti od poplava je temeljno nestrukturano modeliranje. To je način modeliranja poplava koji ima za cilj predvidjeti ozbiljnost poplave prije nego što se dogodi. Ono donositeljima odluka pruža alat koji je potreban za razvoj strategije ublažavanja poplava čak i prije nego što se poplava dogodi. Prije nego što se simulacije poplava mogu točno provesti, u računalnom sustavu mora se izraditi detaljna geometrija. Digitalni visinski model (DEM) je mogućnost za stvaranje GIS prikaza terena. Točno modeliranje poplava ovisi o preciznim visinskim modelima koje pružaju digitalni modeli terena. Očitavanja visinskih točki koriste se za digitalni prikaz zemljine površine pomoću digitalnog visinskog modela (DEM) - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM-a). Za istraživanje su korišteni podaci SRTM-a s internet stranice Earth Explorer, koja je za DEM pružila razlučivost od 30 m. Podaci Središnje komisije za vodu (CWC) o protocima za istraživanje su dobiveni iz New Delhija. Parametar hrapavosti, Manningov koeficijent (n), važan je u jednodimenzionalnom modelu za rješavanje procijenjenog profila površine vode. Manningov koeficijent (n) uvelike varira ovisno o parametrima kao što su hrapavost površine, vegetacija, nepravilnosti kanala, poravnanje kanala, ispiranje i taloženje, prepreke, veličina i oblik kanala, faza protoka, sezonska kolebanja, temperatura i lebdeći materijal i vučeni nanos. Postoji nekoliko dostupnih izvora gdje se mogu potražiti vrijednosti Manningovog koeficijenta hrapavosti za kanale. ArcGIS Instituta za istraživanje okolišnih sustava (ESRI) je moćna i jednostavna aplikacija za kartiranje, vizualizaciju podataka i prostornu analizu. Nekoliko prostornih analitičkih zadataka, kao što su obrada, modeliranje, vizualizacija i interpretacija rasterskih podataka temeljenih na mreži, mogu se izvesti pomoću ekstenzije Spatial Analyst. GIS se pokazao izvrsnim alatom za upravljanje poplavnim područjima, uključujući operacije kao što su bazno kartiranje, topografsko kartiranje i provjera kartiranih opsega i dubina poplavnog područja nakon katastrofe. U ovom istraživanju korišten je HEC-RAS, jednodimenzionalni hidraulički model toka, koji je kreirao Inženjerski zbor američke vojske (USACE). HEC-RAS

Singh, S. K., Kanga, S., Đurin, B., Kranjčić, N., Chaurasia, R., Markovinović, D.
Modeliranje rizika od poplava korištenjem HEC-RAS-a i geoprostornih analiza

koristi mnoge faktore za hidrauličku analizu kanala vodotoka i protok vode. Na slici 2. prikazan je dijagram toka koji pokazuje metodologiju istraživanja.

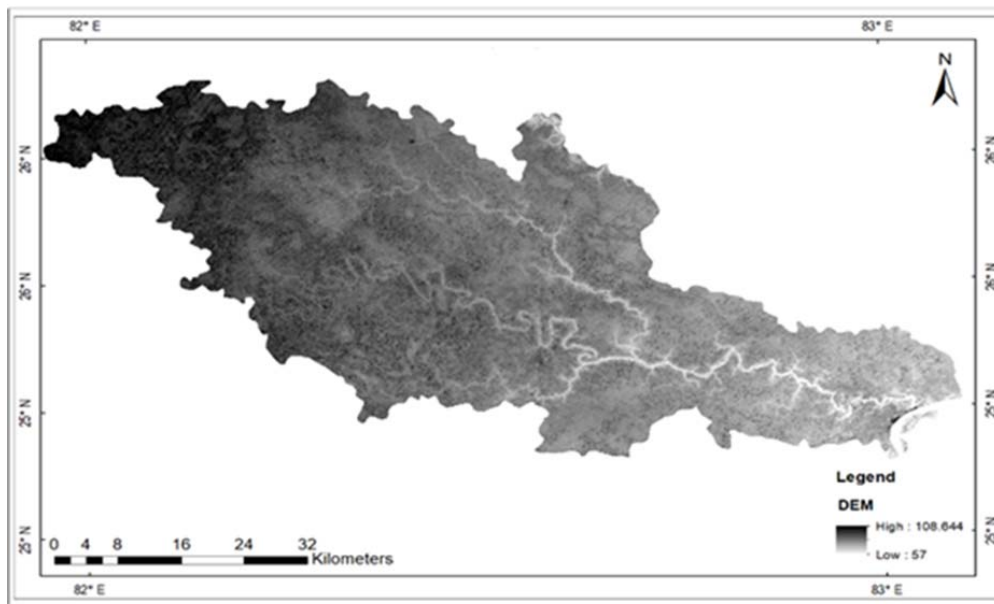


Slika 2. Dijagram toka koji ilustrira metodologiju istraživanja

4. REZULTATI I RASPRAVA

4. 1 Modeliranje razvođa

SRTM DEM (Shuttle Radar Topography Mission) je skup podataka koji su kreirali NASA i Nacionalna geoprostorno-obavještajna agencija (NGA) u suradnji s njemačkim i talijanskim svemirskim agencijama. Misija Endeavour započela je u veljači 2000. godine. Cilj ovog projekta bio je prikupiti globalne podatke o nadmorskim visinama. Na Endeavoru je postavljen prilagođeni radarski sustav za provođenje interferometrije tijekom misije koja je trajala 11 dana. Zahvaljujući interferometriji i korištenim frekvencijama, podaci su se mogli prikupiti bez obzira na doba dana i vremenske prilike (više od 90 % područja je snimljeno dva puta i gotovo 50 % tri puta). Procesom prikupljanja podataka dobivena je najcjelovitija gotovo globalna baza podataka o Zemlji visoke razlučivosti i visinske točnosti. Američki geološki zavod (USGS) počeo je distribuirati globalne podatke o visini Shuttle Radar Topography Mission (SRTM-a) u razlučivosti od 1 lučne sekunde (30 metara) (slika 3).

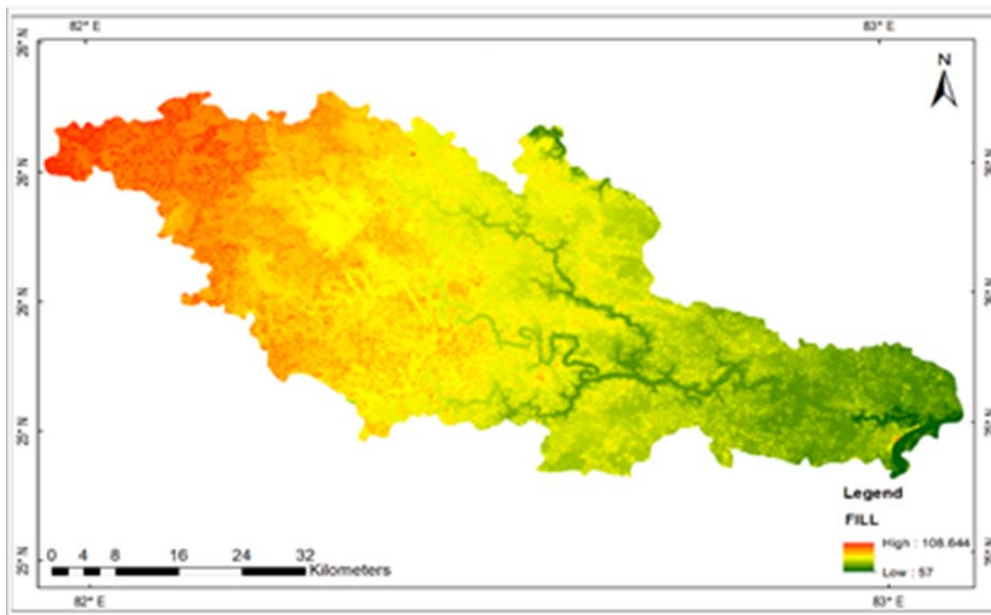


Slika 3. DEM karta

U okviru analize, slivovi su utvrđeni određivanjem vododjelnica između slivova. Radi određivanja svih slivova koji sadrže povezane ćelije istražen je raster ulaznih smjerova toka. Sliv se formira određivanjem mjesta gdje bi voda istjecala iz rastera, skupa sa *sinkovima* (depresijama). Kako bi se utvrdilo područje koje doprinosi svakoj točki istjecanja (eng. pour point), potrebno je poznavati i područje iznad točke istjecanja, čime se definira raster slivova. Najznačajniji rezultati će se dobiti pokretanjem algoritma s aktiviranom opcijom Force all edge cells to flow outward (FORCE u Pythonu). Svaka ćelija u rasteru pripada nekom slivu, bez obzira na veličinu sliva.

Granična ćelija najmanje visine na doprinosnoj površini *sinka* je točka izlivanja (eng. pour point). Kad bi *sink* bio napunjen vodom, tu bi voda otjecala. Z-limit kontrolira koji *sinkovi* će biti ispunjeni, a koji će ostati netaknuti na temelju najveće razlike između dubine *sinka* i točke izlivanja (slika 4). Z-limit nije najveća dubina do koje se *sink* može napuniti. Na primjer, ako se razmotri lokaciju s točkom izlivanja na visini od 210 stopa i najdubljom točkom na 204 stope (razlika od 6 stopa). Postavljanjem z-limita na 8, ovaj osobiti *sink* će se ispuniti. Z-limit od 4 sprječava da se ovaj *sink* ispuni pošto je predubok i stoga se smatra pravilnim sinkom. Točke izlivanja koje dosežu donje granice z-limita će ispuniti *sinkove* ispod z-limita i ispod svog najnižeg susjeda. Koliko dugo traje obrada ovisit će o broju *sinkova* otkrivenih pomoću z-limita. Kako se broj *sinkova* povećava, vrijeme obrade će se produžavati. Alat Sink se može koristiti prije alata Fill (Ispunjavanje) kako bi se utvrdio broj *sinkova* i mjesta na kojima se oni nalaze. Kako bi se ustanovio odgovarajući z-limit korisno je znati dubine *sinkova*. Dodatno, Fill se može koristiti za uklanjanje visokih točaka.

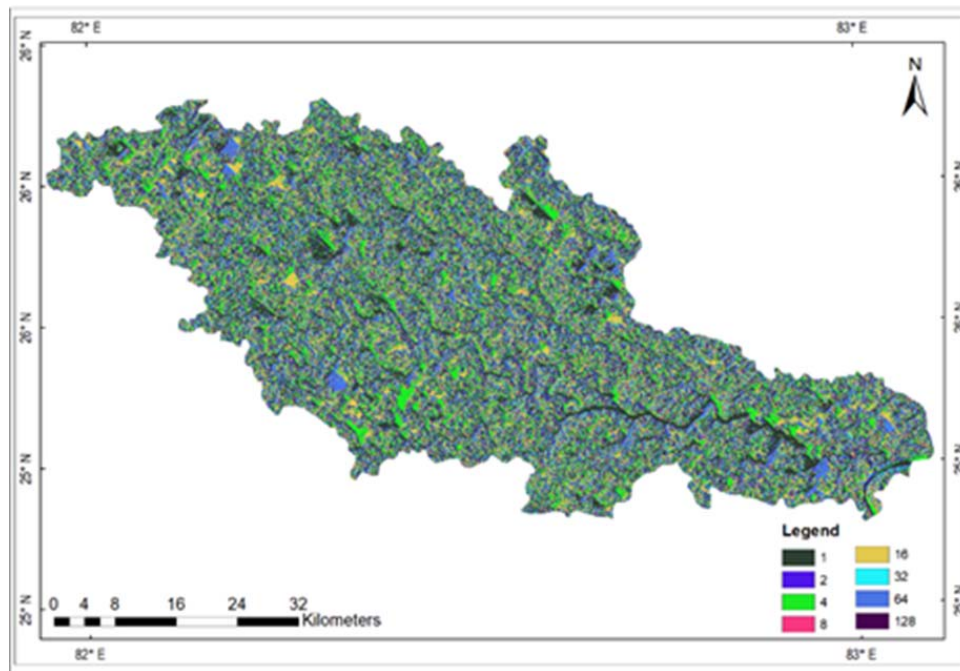
Singh, S. K., Kanga, S., Đurin, B., Kranjčić, N., Chaurasia, R., Markovinović, D.
Modeliranje rizika od poplava korištenjem HEC-RAS-a i geoprostornih analiza



Slika 4. Karta ispunjavanja

Za ovaj postupak može se koristiti i z-limit (slika 5). Svi vrhovi će biti uklonjeni ako nije definiran nijedan z-limit. Ako se zadaju, svi vrhovi s razlikom vrijednosti z između vrha i njegovog najbližeg susjeda većom od z-limita neće biti izbrisani. Ishod algoritma akumulacije toka (eng. Flow Accumulation) je mreža u kojoj se tok akumuliran u svaku ćeliju dobije zbrajanjem doprinosa tokova svih površina koje teku u tu ćeliju nizbrdo. Ćelije s nepoznatim smjerom toka primaju tok; one neće opskrbljivati druge ćelije nikakvim tokom. Ako neka ćelija u rasteru smjera toka ima vrijednost različitu od 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 ili 128, smatra se da ima nepoznat smjer toka. Svaka ćelija u izlaznom rasteru ima akumulacijski tok temeljen na broju ćelija koje utječu u nju. Ovi podaci isključuju trenutnu ćeliju koja se obrađuje. Područja koncentriranog toka mogu se odrediti pomoću izlaznih ćelija s velikom akumulacijom toka. Ćelije nultog toka su visoke točke na lokalnoj topografiji i mogu se koristiti za otkrivanje grebena. Ako se za izradu rastera ulaznog toka ne koristi alatku Flow Direction (smjer toka), mogu se javiti problemi s petljama toka. Ako dođe do petlje toka, akumulacija toka nikada neće biti potpuna jer će tok preći u beskonačnu petlju. Alatka akumulacije toka (Flow Accumulation) ne poštuje opciju okružja Compression (kompresija) (slika 6). Konačni izlazni raster će biti u obliku nekomprimiranih podataka. Izlaz alatke Flow Direction (smjer toka) je rasterski cijeli broj (vrijednosti od 1 do 255), koji se dobiva kombinacijom ulaznih rastera.

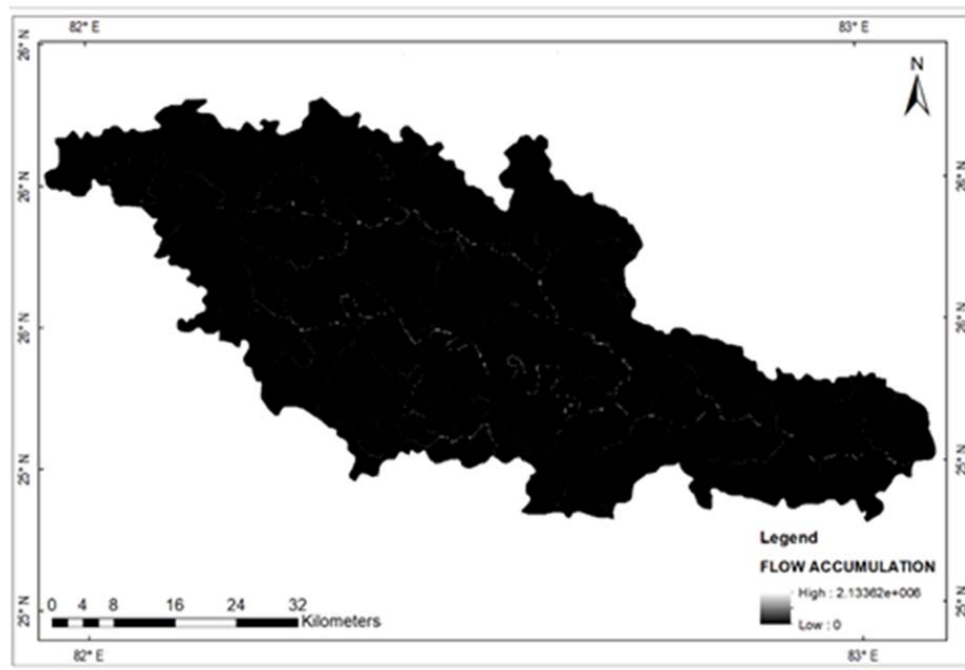
Singh, S. K., Kanga, S., Đurin, B., Kranjčić, N., Chaurasia, R., Markovinović, D.
Modeliranje rizika od poplava korištenjem HEC-RAS-a i geoprostornih analiza



Slika 5. Karta smjera toka

Ova značajka uklanja neželjene, jednoćelijske *sinkove* koji se smatraju šumom. Kod *sinka* nalazi se ćelija u kojoj vrijednost z varira u nekoliko smjerova, a ćelija je dio *sinka* ako ispunjava ovaj uvjet. Vrijednosti te ćelije u rasteru izlaznog toka će se izračunati zbrajanjem izlaznih smjerova. Ako je promjena vrijednosti z ista na desno i dolje (1 i 4), tada je smjer toka za tu ćeliju $1 + 4 = 5$. *Sinkovi* se mogu istaknuti alatom Sink u ćelijama koje imaju nepoznat smjer toka. Ćelija s istom promjenom vrijednosti z u mnogim smjerovima i koja nije dio *sinka* dobiva svoj dodijeljeni smjer toka pomoću referentne tablice koja definira najvjerojatniji smjer. Raster pada vrijednosti z dobiva se dijeljenjem razlike vrijednosti z između središta ćelija s duljinom putanje između njih, dan kao postotak. Ovome je ekvivalentan nagib između susjednih ćelija. Razmak između ćelija će biti kraći pri prelasku preko ravne površine. Time se dobiva grafikon koji pokazuje putanju najstrmijeg spuštanja iz svake ćelije, tj. koji pokazuje postotno povećanje. Kako bi se povećala učinkovitost, aproksimacija glatke površine za vrijednosti rastera pada ($1,41421 \cdot$ veličina ćelije) je $1,5 \cdot$ veličina ćelije. U standardnoj postavci (NORMAL u Pythonu), ćelija na granici rastera površine će teći prema unutra u unutarnju ćeliju, čija vrijednost z najbrže pada. Ako je pad manji od nule ili jednak nuli, ćelija će istjecati iz rastera površine. Alatka Flow Length (duljina toka) se obično koristi za određivanje duljine najduljeg kanala toka u slivu (slika 6). Ovim postupkom se često izračunava vrijeme koncentracije sliva. Za to se koristi UPSTREAM. Također se može koristiti i za izradu karata udaljenost-površina za događaje kiše i otjecanja koristeći rasterske težine kao otpor toku nizbrdo. Za izlazni raster duljine toka, tip vrijednosti je pomični zarez. Smjeru toka *sinka* ne može se pridružiti jedna od osam valjanih vrijednosti rastera smjerova toka. To se može dogoditi ako je ćelija koja se obrađuje okružena ćelijama veće visine, ili ako se dvije ćelije ulijevaju jedna u drugu, formirajući dvoćelijsku petlju.

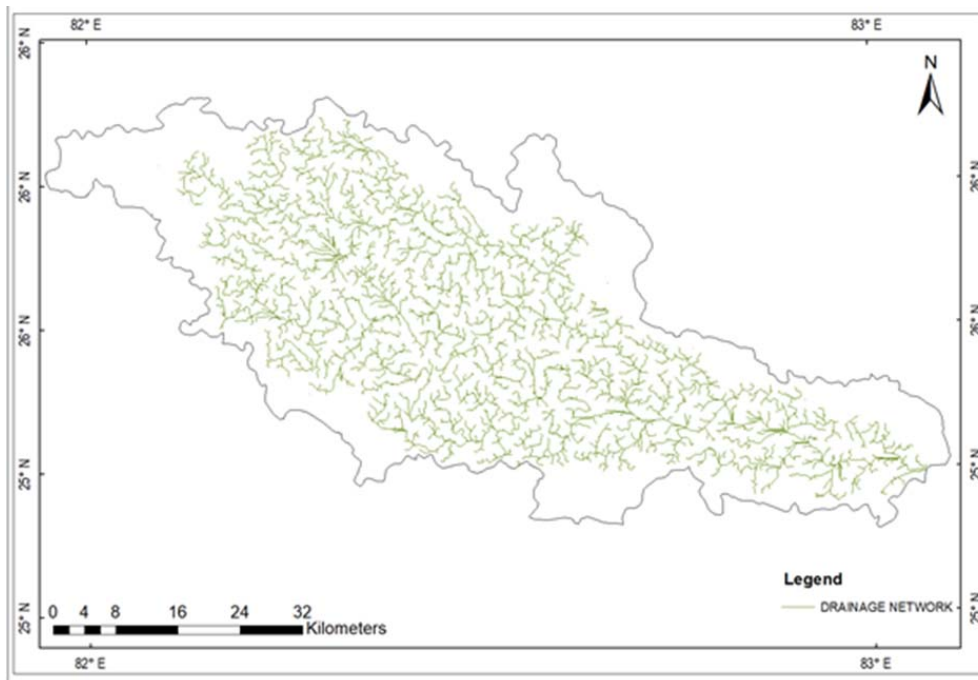
Singh, S. K., Kanga, S., Đurin, B., Kranjčić, N., Chaurasia, R., Markovinović, D.
Modeliranje rizika od poplava korištenjem HEC-RAS-a i geoprostornih analiza



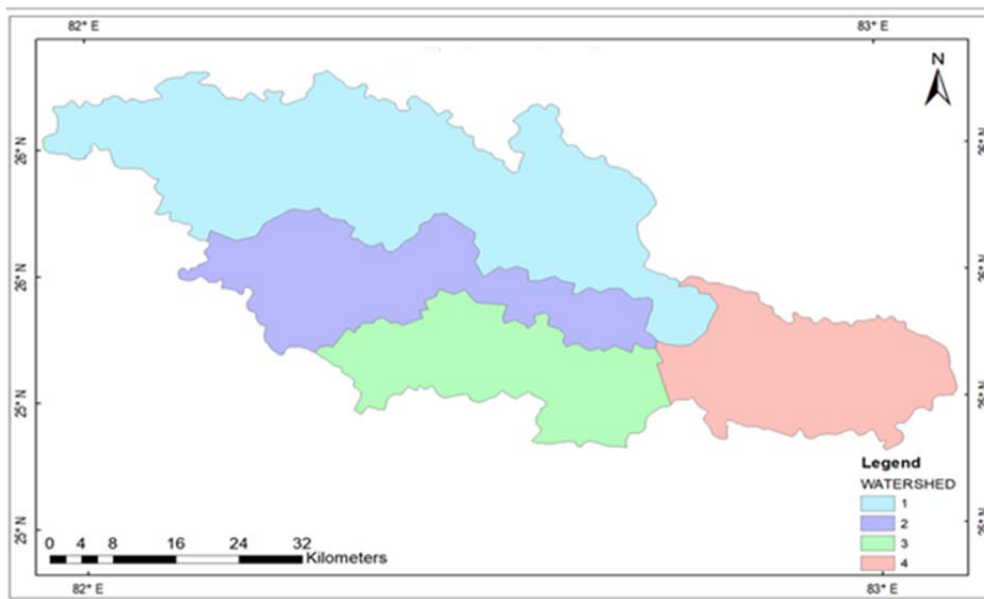
Slika 6. Karta akumulacije toka

Rezultat alatke Sink (depresija) je mreža cijelih brojeva, u kojoj svaki *sink* dobiva jedinstvenu vrijednost. *Sinkovi* se označavaju brojem između jedan i ukupnog broja *sinkova*. Ako počnete sa zajedničkom površinom, rezultat Stream Ordera će biti kvalitetniji. Budući da se rezultati rasterskog toka temelje na skupu podataka rasteriziranog toka, smjer od ćelije do ćelije možda neće odgovarati položaju ćelija toka. Mreža tokova se može kreirati pomoću nalaza alatke Flow Accumulation (akumulacija toka) postavljanjem granične vrijednosti i odabirom ćelija koje premašuju tu vrijednost. K tome, za utvrđivanje mreže tokova može se koristiti tok od više od 100 ćelija (slika 7). Za izgradnju rastera akumulacije toka s vrijednošću od 100 ili više u mreži tokova, koristite alatku Con ili Set Null (NoData). Koristeći generiranu mrežu tokova, mogu se koristiti Stream Link i Stream to Feature. Vrijednost svakog razvođa odredit će se iz ulaznog rastera ili podataka elementa točke izlivanja. U slučaju rasterskog skupa podataka, vrijednosti ćelije će se koristiti za točku izlivanja. Vrijednosti će se dobiti iz naznačenog polja ako je točka izlivanja definirana kao skup podataka značajki točke. Ranija upotreba alatke Snap Pour Point može pomoći za dobivanje točnijeg očitavanja ćelija s najvećim akumuliranim tokom.

Singh, S. K., Kanga, S., Đurin, B., Kranjčić, N., Chaurasia, R., Markovinović, D.
Modeliranje rizika od poplava korištenjem HEC-RAS-a i geoprostornih analiza



Slika 7. Karta mreže otjecanja



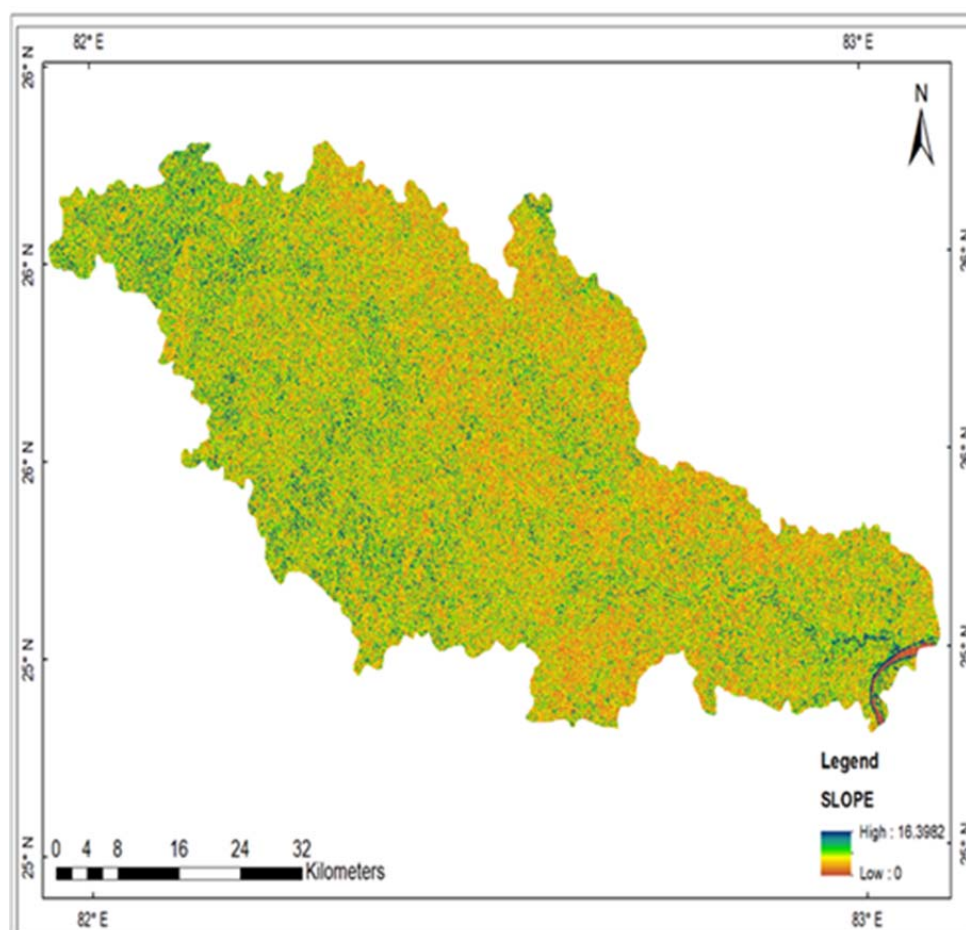
Slika 8. Karta razvođa

Pri unošenju podataka značajki za ulazne lokacije točki izlivanja, zadano polje će biti prvo dostupno valjano polje. Ako nema prihvatljivih polja, zadano polje je Object ID (npr. OID ili FID). Koristeći alat za obradu HEC-GEO-HMS, generira se Build Walls DEM-a, ispunjavaju *sinkovi* DEM-a, kreira smjer toka (Flow Direction), generira akumulaciju toka (Flow Accumulation), definiraju se tokovi, kreira segmentaciju tokova, ocrtava slivna mreža područja, obrađuju poligoni sliva, generiraju linije odvodnje područja, kao i kreira susjedni sliv područja (slika 8).

Singh, S. K., Kanga, S., Đurin, B., Kranjčić, N., Chaurasia, R., Markovinović, D.
Modeliranje rizika od poplava korištenjem HEC-RAS-a i geoprostornih analiza

4.2 Modeliranje tla i načina upotrebe i pokrova zemljišta

Nakon postavljanja projektnog područja i projektnog sliva, ocrtavanja najduže putanje toka rijeke uz pomoć alatki za karakteristike HEC-GEO-HMS-a, tj. nakon ocrtavanja najduže putanje toka, izvršeno je izračunavanje vrijednosti mreže brojeva krivulja otjecanja (CN Grid). Parametri za izračunavanje vrijednosti CN Grid su karta tla i karta načina korištenja i pokrova zemljišta projektnog područja. ERDAS, softver za slike korišten je za klasifikaciju Landsat 8 slika pomoću nadzirane alatke za klasifikaciju, i ocrtane su četiri klase, tj. izgrađena, šumska, poljoprivredna zemljišta i vodna tijela. Nakon toga je izvršena konverzija karte načina korištenja i pokrova zemljišta u poligon uz pomoć ArcGIS alatke za konverziju. Preklasificirana karta tla u obliku HSG (Hydrological Soil Group - hidrološka grupa tla) određuje HSG za svaki piksel s karte tla koja je dobivena na temelju svojstva tla. Nakon toga, izrađuje se karta tla istraživanog područja i klasificira se tlo prema HSG-u (Hydrological Soil Group).



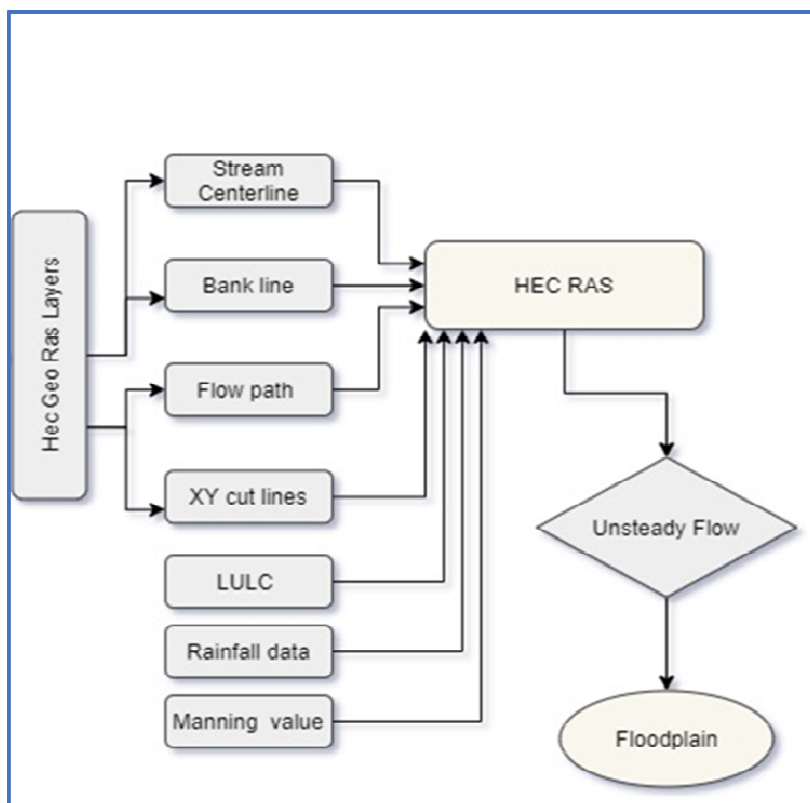
Slika 9. Karta nagiba

Ova karta predstavlja nagib područja istraživanja (slika 9). Okrug Varanasi ima ravan teren. U nekim područjima nagib postoji, ali većina područja je pod ravnim terenom. Ova karta predstavlja potencijalno otjecanje okruga Varanasi. Ona definira količinu istjecanja vode u površinskim tokovima. Time se omogućava stjecanje predodžbe o toku vode na površini, tj., na koje će područje više utjecati obilna kiša.

Singh, S. K., Kanga, S., Đurin, B., Kranjčić, N., Chaurasia, R., Markovinović, D.
Modeliranje rizika od poplava korištenjem HEC-RAS-a i geoprostornih analiza

4.3 HEC-RAS modeliranje

Za HEC-RAS modeliranje, potrebno je kreirati geometriju rijeke kroz HEC-GEO-RAS. HEC-GEO-RAS je softver koji se koristi za geometriju rijeke. Ovaj softver je nužno koristiti jer je izlaz ovog softvera ulaz HEC-RAS softvera. HEC-GEO-RAS softver je jednostavan za rukovanje. Sučelje ovog softvera je ArcGIS. U ovom softveru postoji alatka za geometriju RAS koja se koristi za kreiranje geometrije rijeke (slika 10).

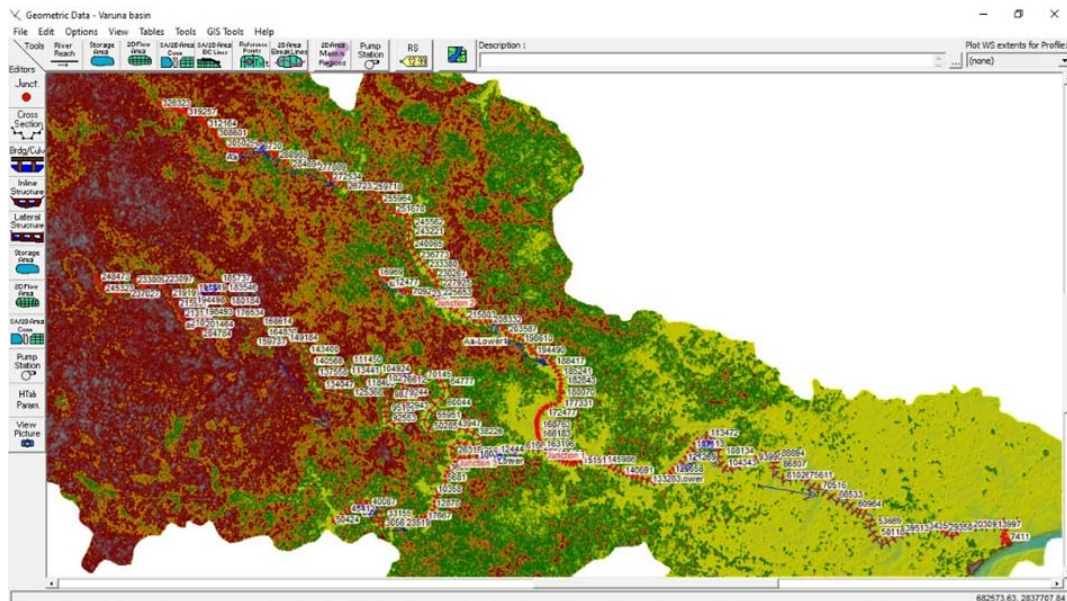


Slika 10. Metodologija usvojena za HEC-RAS modeliranje

U softveru HEC-GEO-RAS, potrebno je generirati geometriju ili poprečni presjek rijeke pomoću aplikacije RAS Geometry. Nakon toga, kreira se središnja linija rijeke, koja bi na odgovarajući način trebala biti digitalizirana. Ona se nanese kao sloj na podatke visoke rezolucije ili Google Earth. Kada je središnja linija digitalizirana, kao i obalne linije rijeke, sve obalne linije su paralelne sa središnjom linijom. Obalne linije bi trebale biti pored rijeke kada se obalne linije digitaliziraju. Kada je putanja toka (Flow Path) digitalizirana, boja rijeke i boja putanje toka su iste. Nakon toga, kreira se putanja toka, paralelnu s linijama obala. Sljedeći korak je konstrukcija XS Cutlines (linija presjeka) na rijeci. XS Cutlines kreiraju se pomoću softvera. XS Cutlines se ne bi smjele međusobno sjeći. U protivnom, pri izvođenju modela generira se pogreška. Nakon cijelog tog procesa, generira se poprečni presjek rijeke koji je potreban za hidrauličko modeliranje. U sljedećem koraku, izvozi se poprečni presjek rijeke u GIS formatu i uveze u HEC-RAS softver, koji prikazuje geometriju rijeke. Izrada poprečnog presjeka riječnog kanala je bitna vještina terenskog rada na rijeci. Prva faza je mjerenje širine i dubine rijeke. Prikupljeni podaci mogu se zatim iscrtati kako bi se kreirao razmjerni dijagram poprečnog presjeka ili pronašla površina poprečnog presjeka i omočeni obod rijeke. Poprečni presjek predstavlja promjenu nagiba, oblik, hrapavost, strukturu glavnog kanala i susjedno poplavno područje; ove površine poprečnog presjeka se crtaju na temelju DEM-a.

Singh, S. K., Kanga, S., Đurin, B., Kranjčić, N., Chaurasia, R., Markovinović, D.
Modeliranje rizika od poplava korištenjem HEC-RAS-a i geoprostornih analiza

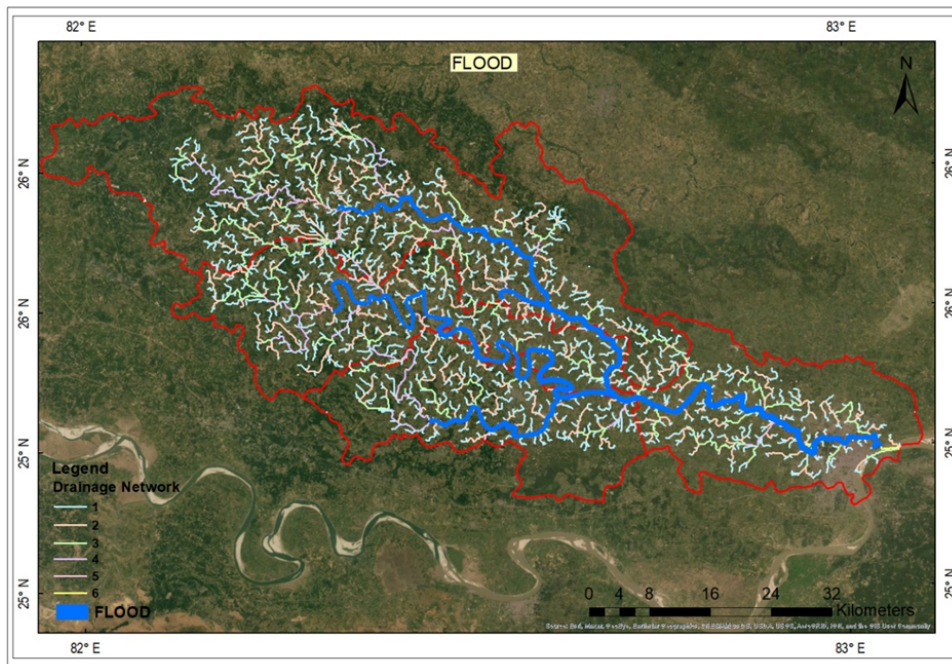
Poprečni presjek se ocrta s lijeva na desno gledajući nizvodno. Ovi podaci se mogu koristiti za kreiranje vizualnog prikaza izgleda rijeke. Za mjerenje poprečnog presjeka rijeke mogu se koristiti ručne alatke kao što je mjerna traka ili geodetska letva. Međutim, organizacije kao što je Geološki zavod Sjedinjenih Država koriste suvremene metode. To uključuje GPS podatke, laserske daljinomjere i eho sonare. Podaci prikupljeni iz više poprečnih presjeka mogu se koristiti za istraživačke projekte za određivanje hidrauličkog protoka (slika 11).



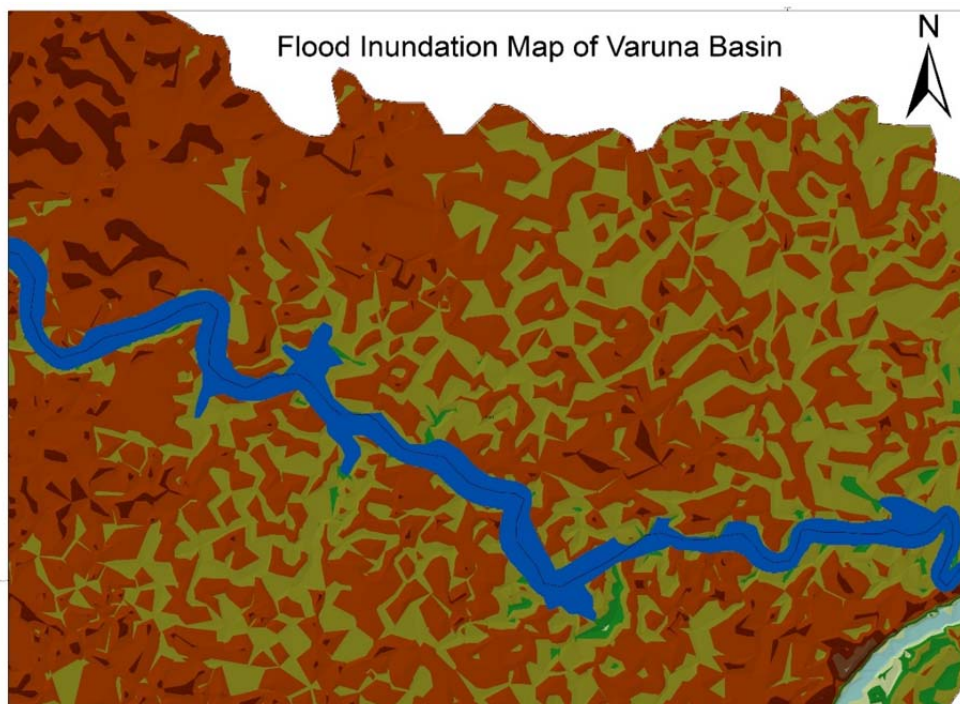
Slika 11. Profil rijeke Varune

Rezultat modeliranja poplava HEC-RAS-a otkrio je da bi područje ugroženo poplavama bilo 932, 1511, 2031 i 3147 ha, što odgovara poplavi povratnog razdoblja od 2, 5, 10, odnosno 20 godina, a u odnosu na dvogodišnju poplavu, povećanje poplavljene površine iznosi 62% (petogodišnja), 118 % (desetogodišnja), odnosno 238 % (dvadesetogodišnja poplava). Kako bi se izvršila analiza utjecaja na području, modelirani sloj granice poplave svakog povratnog razdoblja presječen je s granicom područja. Ako u ovom području dođe do poplave, urbano područje je značajno pogođeno jer je rijeka Varuna blizu urbanog područja grada Varanasija. Područje sirotinjskih naselja je u velikoj mjeri pogođeno ovom poplavom, jer su sirotinjske četvrti u ljetnoj sezoni prisutne na koritu rijeke Varune. Vodostaj rijeke nije visok, korito rijeke Varuna je suho, ali u sezoni monsuna padavine su velike, a odvodnja grada Varanasija je blokirana pa to ima za posljedicu poplave. Kroz ove modele generirajte kartu područja izloženog poplavama koja pokazuje koliko područje će biti zahvaćeno. Uz pomoć koeficijenta otjecanja, hidrolog može izračunati koliko vode u sekundi prođe preko određenog područja. Mreža brojeva krivulja i karta nagiba daje predodžbu o tome u kojem području tijekom vremena prođe više vode. Ako je nagib područja velik, povećava se i otjecanje vode, a ako je nagib područja blag, otjecanje vode je manje. Ove karte predstavljaju područje grada Varanasija podložno poplavama (slike 12-13). Uz pomoć ove karte, stječe se predodžba o tome koliko će područja biti zahvaćeno, čime se omogućuje da se štete koje nastanu u vrijeme poplave svedu na najmanju mjeru.

Singh, S. K., Kanga, S., Đurin, B., Kranjčić, N., Chaurasia, R., Markovinović, D.
Modeliranje rizika od poplava korištenjem HEC-RAS-a i geoprostornih analiza



Slika 12. Karta koja predstavlja prostornu raspodjelu vodotoka u vrijeme poplave.



Slika 13. Karta područja izloženog poplavama na odabranoj lokaciji

5. ZAKLJUČAK

U ovoj analizi korištena je kombinacija hidrološkog modela (HEC-RAS) i analitičkog okvira temeljenog na GIS-u za mjerenje opasnosti od poplava i vjerojatnog utjecaja s određenom mogućnošću ponavljanja, dobivenom analizom učestalosti. Najugroženije uže područje izloženo poplavama (Varanasi Sadar) u gradskom općinskom području Varanasi predloženo je kao studija slučaja. Opažajući postojeće stanje, izvršeno je modeliranje poplava, i ono pokazuje da značajan utjecaj plavljenja počinje pri mogućnosti ekstremnog protoka od 1000 m³/s uz 5-godišnje povratno razdoblje. Predvidljivi učinak polako raste s poplavama 10-o i 20-o godišnjeg povratnog razdoblja. Što se tiče moguće štete i osjetljivosti načina korištenja zemljišta, najvjerojatnije ugrožene površine pripadaju naseljenom području, a zatim industrijskom, komunalnom i polu-javnom području. Obično se rizik od poplava razlikuje po mjestu i uvjetima, pa je u slučaju grada Varanasija, prema objašnjenju njegove lokacije i hidrometeoroloških značajki, u određenoj mjeri rizik od poplava neizbježan. Unatoč tim prirodnim faktorima, uz pogodnost modeliranja rizika od poplava korištenjem geoprostornog pristupa, ova analiza je pokazala da se modeliranje akumulacije poplava i dobiveno kartiranje mogu koristiti kao osnova za upravljanje rizikom od poplava na razini grada ili općine.

LITERATURA

1. Abdessamed, D., Abderrazak, B. Coupling HEC-RAS and HEC-HMS in rainfall–runoff modeling and evaluating floodplain inundation maps in arid environments: case study of Ain Sefra city, Ksour Mountain. SW of Algeria. *Environ Earth Sci* 78, 586. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8604-6>, 2019.
2. Ahmed, E., Salwa, S., Taoufik, H., Ichrak, K., Fadila, D., Hamadi, R., Flood mapping using hydraulic modeling and Sentinel-1 image: Case study of Medjerda Basin, northern Tunisia. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23 (3), 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.03.001>, 2020.
3. Arturo, S. L., Christopher, G., Controlling HEC-RAS using MATLAB. *Environmental Modelling & Software*, 84, 339-348. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.026>, 2016.
4. Costabile, P., Costanzo, C., Ferraro, D., Macchione, F., Petaccia, G. Performances of the New HEC-RAS Version 5 for 2-D Hydrodynamic-Based Rainfall-Runoff Simulations at Basin Scale: Comparison with a State-of-the Art Model. *Water*. 12(9), 2326. <https://doi.org/10.3390/w12092326>, 2020.
5. Dasallas, L., Kim, Y., An, H., Case Study of HEC-RAS 1D–2D Coupling Simulation: 2002 Baeksan Flood Event in Korea. *Water*, 11(10), 2048. <https://doi.org/10.3390/w11102048>, 2019.
6. Deshays, R., Segovia, P., Duviella, E., Design of a MATLAB HEC-RAS Interface to Test Advanced Control Strategies on Water Systems. *Water*, 13(6), 763. <https://doi.org/10.3390/w13060763>, 2021.
7. Dysarz, T., Application of Python Scripting Techniques for Control and Automation of HEC-RAS Simulations. *Water*, 10(10), 1382. <https://doi.org/10.3390/w10101382>, 2018.
8. Garcia, M., Juan, A., Bedient, P., Integrating Reservoir Operations and Flood Modeling with HEC-RAS 2D. *Water*, 12(8), 2259. <https://doi.org/10.3390/w12082259>, 2020.
9. Gilja, G., Harasti, A., Fliszar, R. D., CAN—A MATLAB Function for Generation of a HEC-RAS-Compatible Drainage Canal Network Model. *Computation*, 9(5), 51. <https://doi.org/10.3390/computation9050051>, 2021.
10. Huțanu, E., Mișu-Pintilie, A., Urzica, A., Paveluc, L.E., Stoleriu, C.C., Grozavu, A., Using 1D HEC-RAS Modeling and LiDAR Data to Improve Flood Hazard Maps Accuracy: A Case

- Study from Jijia Floodplain (NE Romania). *Water*, 12(6), 1624. <https://doi.org/10.3390/w12061624>, 2020.
11. Khattak, M.S., Anwar, F., Saeed, T.U., Mohammed Sharif, Khurram Sheraz & Anwaar Ahmed. Floodplain Mapping Using HEC-RAS and ArcGIS: A Case Study of Kabul River. *Arab J Sci Eng* 41, 1375–1390. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1915-3>, 2016.
 12. Kovacs, S., Kiss, A., Szekeres J., Experiences in application of HEC-RAS model under circumstances of flood waves. In: Schanze, J., Zeman, E., Marsalek, J. (eds) *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*. NATO Science Series, 67. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4598-1_4, 2006.
 13. Kumar, N., Kumar, M., Sherring, A., Shakti, S., Ajaz, A., Deepak, Lal., Applicability of HEC-RAS 2D and GFMS for flood extent mapping: a case study of Sangam area, Prayagraj, India. *Model. Earth Syst. Environ.* 6, 397–405. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00687-8>, 2020.
 14. Mohsin, J. B., Muhammad, U., Raheel, Q., Landslide dam and subsequent dam-break flood estimation using HEC-RAS model in Northern Pakistan. *Natural Hazards*, 65, 241-254, 2013.
 15. Namara, W.G., Damisse, T.A., Tufa, F.G., Application of HEC-RAS and HEC-GeoRAS model for Flood Inundation Mapping, the case of Awash Bello Flood Plain, Upper Awash River Basin, Oromiya Regional State, Ethiopia. *Model. Earth Syst. Environ.* <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01166-9>, 2021.
 16. Natarajan, S., Radhakrishnan, N., An Integrated Hydrologic and Hydraulic Flood Modeling Study for a Medium-Sized Ungauged Urban Catchment Area: A Case Study of Tiruchirappalli City Using HEC-HMS and HEC-RAS. *J. Inst. Eng. India Ser. A* 101, 381–398. <https://doi.org/10.1007/s40030-019-00427-2>, 2020.
 17. Ongdas, N., Akiyanova, F., Karakulov, Y., Muratbayeva, A., Zinabdin, N., Application of HEC-RAS (2D) for Flood Hazard Maps Generation for Yesil (Ishim) River in Kazakhstan. *Water*, 12(10), 2672. <https://doi.org/10.3390/w12102672>, 2020.
 18. Parhi, P.K., Flood Management in Mahanadi Basin using HEC-RAS and Gumbel's Extreme Value Distribution. *J. Inst. Eng. India Ser. A* 99, 751–755. <https://doi.org/10.1007/s40030-018-0317-4>.
 19. Pathan, A.I., Agnihotri, P.G., Application of new HEC-RAS version 5 for 1D hydrodynamic flood modeling with special reference through geospatial techniques: a case of River Purna at Navsari, Gujarat, India. *Model. Earth Syst. Environ.* 7, 1133–1144. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00961-0>, 2018, 2021.
 20. Rangari, V.A., Umamahesh, N.V., Bhatt, C.M., Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D. *Model. Earth Syst. Environ.* 5, 1839–1851. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00641-8>, 2019a.
 21. Rangari, V.A., Sridhar, V., Umamahesh, N.V., Ajey, K. P., Floodplain Mapping and Management of Urban Catchment Using HEC-RAS: A Case Study of Hyderabad City. *J. Inst. Eng. India Ser. A* 100, 49–63. <https://doi.org/10.1007/s40030-018-0345-0>, 2019b.
 22. Salman, A., Hassan, S.S., Khan, G.D., Muhammad, A.G., Aftab, A. K., Khurram, S., HEC-RAS and GIS-based flood plain mapping: A case study of Narai Drain Peshawar. *Acta Geophys.* 69, 1383–1393. <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00615-4>, 2021.
 23. Sathya A., Thampi S.G., Flood Inundation Mapping of Cauvery River Using HEC-RAS and GIS. In: Singh, R.M., Sudheer, K.P., Kurian, B. (eds) *Advances in Civil Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*, 83. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5644-9_2, 2021.
 24. Tamiru, H., Wagari, M., Machine-learning and HEC-RAS integrated models for flood inundation mapping in Baro River Basin, Ethiopia. *Model. Earth Syst. Environ.* <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01175-8>, 2021.
 25. Urzică, A., Mișu-Pintilie, A., Stoleriu, C.C., Cîmpianu, C.I., Huțanu, E., Pricop, C.I., Grozavu A., Using 2D HEC-RAS Modeling and Embankment Dam Break Scenario for

Singh, S. K., Kanga, S., Đurin, B., Kranjčić, N., Chaurasia, R., Markovinović, D.
Modeliranje rizika od poplava korištenjem HEC-RAS-a i geoprostornih analiza

Assessing the Flood Control Capacity of a Multi-Reservoir System (NE Romania). *Water*, 13(1), 57. <https://doi.org/10.3390/w13010057>, 2021.

26. Yalcin, E., Assessing the impact of topography and land cover data resolutions on two-dimensional HEC-RAS hydrodynamic model simulations for urban flood hazard analysis. *Nat Hazards* 101, 995–1017. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03906-z>, 2020.

27. Zainalfikry, M.K., Ab, G. A., Zakaria, N.A., Chan, N.W., HEC-RAS One-Dimensional Hydrodynamic Modelling for Recent Major Flood Events in Pahang River. In: Mohamed, Nazri F. (eds) *Proceedings of AICCE'19. AICCE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering*, 53. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32816-0_83, 2020.