mag. LEON GOSAR*; GA[PER RAK ;* prof. dr. FRANCI STEINMAN ;* dr. PRIMO@ BANOVEC *

UPOTREBA *LIDAR* PODATAKA ZA IZRAČUNE POPLAVNOG PODRUČJA

SA@ETAK

Za prostor uz vodotoke, a naro~ito za poplavna podru~ja, va`e znatna ograni~enja kori{tenja prostora, a posebno i za sve nekretnine, koje bi se mogle na}i u podru~ju poplavnih voda. Zbog toga je za urbaniste, vlasnike nekretnina, a i mnoge druge, va`na {to preciznija definicija poplavnih granica u prostoru, po mogu}nosti na to~nost parcelnih granica. Za preciznost hidrauli~kih ra~una, s kojima se odre|uju poplavne linije za visoke vode razli~ite vjerovatno}e pojave (10,20,100-godi{nje poplave), klju~ni su dobri ulazni podaci o topografiji terena, geometriji objekata, koji uti~u na tok vode, te naravno podaci o re`imu oticanja. Re`im oticanja se prati monitoringom vodostaja, izra~unom protoka, utvr|ivanjem (promjena) smjera tokova i sl. Geometrija objekata koji prelaze preko vodotoka ili se nalaze unutar granice visokih voda, se prikuplja u razli~itim evidencijama i katastrima nekretnina. U cilju dostizanja ve}e to~nosti pri opisu topografije priobalnog podru~ja, je u Sloveniji prvi put bila upotrijebljena *LIDAR* tehnologija (***LIght Detection And Ranging***), koja omogu}ava prikupljanje visinskih podataka terena velike gusto}e i to~nosti.

To je omogu}ilo precizniju hidrauli~ku analizu visokovodnih uvjeta u priobalnom podru~ju, koja je zami{ljena kao cjelovito oru|e koje povezuje GIS i hidrauli~ke modele stalnog i promjenjivog toka. Ra~uni se tako baziraju na digitalnom modelu terena (DMT) velike preciznosti kao {to ga omogu}ava LIDAR. Obradu geometrije vodotoka i priobalnog podru~ja u mnogome olak{ava pro{irenje programa HEC-GeoRAS za programsku opremu ArcGIS. Taj programski dodatak ujedno omogu}ava i to da se iz DMT i digitalnog ortofoto snimka dobiju i druge karakteristike poplavnih povr{ina (npr. hrapavost zbog vegetacije). Tako dobivene, u mnogome bolje informacije o topografiji, omogu}avaju to~niju hidrauli~ku analizu i ve}u rezoluciju kod odre|ivanja izra~unatih poplavnih linija. Precizniji prikazi granica vode razli~ite vjerovatno}e na poplavnim podru~jima su upotrebljivi pri planiranju odnosno zoniranju kori{tenja prostora, pri postavljanju infrastrukture (hidroelektrane, autoputovi itd.) i drugih objekata u priobalnom podru~ju. Prije svega, time se pobolj{ava kvalitet nacrta koji upozoravaju na opasnost od poplava na tim podru~jima. Ako se uzme u obzir osjetljivost objekata odnosno djelatnosti na poplavu, mo`e se izraditi ocjena njihove ugro`enosti od poplava. LIDAR snimci terena uzdu` vodotoka, koji su bili napravljeni za potrebe istra`iva~kog projekta za Ministarstvo odbrane, daju va`ne podatke i mnogim drugim struka-

* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeni{tvo in geodezijo, Katedra za mehaniko teko~in z laboratorijem

ma, op}inama, odnosno onima, kojima je topografija bitan ulazni podatak. Kako je iz sredstava Interreg projekta bio financiran razvoj metodologije za detaljniju hidrauli~ku analizu poplavnih prostora, povezivanjem tih sadr`aja dobiven je produkt, upotrebljiv za razli~ite korisnike priobalnog podru~ja vodotoka, od upravnih organa, op}ina, slu`be za za{titu i spa{avanje, pa sve do privatnog sektora.

UVOD

Vodni i priobalni prostor za neke predstavlja zna~ajan prirodni resurs, a za druge velik razvojni potencijal. Zbog toga, integralno gospodarenje vodama obuhvata niz aktivnosti i zabrana, kojima je mogu}e na podru~ju voda dugoro~no uravnote`iti ~uvanje prirodnih bogatstava i razvojne ciljeve, odnosno druge javne interese na vodama. Pri tom se uzimaju u obzir i privredni tr`i{ni interesi, prihva}eni u razvojnim (dr`avnim, regionalnim, op}inskim) programima i nacrtima koji ve} uzimaju u obzir `elje za ure|enjem ~ovjeku povoljnog (sigurnog) okru`enja, o~uvanju prirode, za{titi i planskom kori{tenju vodnih potencijala. Vode naravno predstavljaju i razvojni potencijal i izvor opasnosti (visoke vode, klizi{ta i dr.). Dodatne probleme stvara i nepravilno kori{tenje voda, odnosno posezanje u priobalni prostor, {to ugro`ava kako vode, tako i ~ovjeka i njegovu imovinu.

Procesi koji su povezani sa izlijevanjem vodotoka iz korita, uzrokuju poplave ~ija magnituda i u~estalost rastu i zbog promjena klime. Da bi izbjegli negativne posljedice, u hidrauli~kom in`enjerstvu se analiziraju opseg i magnituda poplavnih pojava koji imaju razli~itu vjerovatno}u pojave (10,20,100- ili vi{egodi{nje vode). Za zadat protok se poplavnim linijama mogu odrediti granice prostora kojeg dosti`u pojedine poplavne vode, pa se time odredi i, koliko poplavne vode optere}uju nekretnine: sile impulsa na objekte, erozivni tangencijalni naponi na zemlji{te itd. (Steinman, 1996) Za objekte, osjetljive na djelovanje vode na konstrukciju i opremu, treba je izvesti istra`ivanja i poduzeti protiv mjere, ako se `eli posti}i opstanak na postoje}oj lokaciji. Protiv mjerama mo`e se osposobiti objekt, da je otporan na poplavu - mogu}e je spre~avanje prodiranja vode u objekt (vodotijesna gradnja) ili smanjenje osjetljivosti (obima {tete) ako se dozvoljava, da voda povremeno (iznad projektnog protoka izgra|enih protiv poplavnih mjera) poplavi objekt. Te mjere su u obi~noj gra|evinskoj praksi jo{ uvijek premalo kori{tene, pa se ostavlja diskusija te problematike, koja je veoma {iroka, za neku drugu priliku. U nastavku je na slici 1 prikazana vrlo bitna shema koja prikazuje vezu izme|u pojedine (ili vi{e) opasnosti, ranjivosti, ugro`enosti i rizika.



Bjela{nica, maj 2003.



Slika 1: *Osnovne relacije izme|u opasnosti, ranjivosti, ugro`enosti i rizika*

Iz izra~unanog stepena opasnosti i utvr|ene neotpornosti (osjetljivosti) objekta ili djelatnosti na prirodnu ili antropogenu nesre}u, mogu}e je odrediti relevantan stepen ugro`enosti. Ako neki subjekt sa objektom ili djelatno{}u (npr. turizam) ulazi na podru~je sa evidentiranim obimom opasnosti, na sebe preuzima rizik (npr. da bude poplavljen). Taj rizik se do odre|enog stepena (zbog javne koristi) zabranjuje, npr. u procesu izdavanja gra|evinske dozvole. Zato se u projektu za gra|evinsku dozvolu mora dokazati, da su do visine „projektnog protoka“ (npr. 50-godi{nje poplave) poduzete sigurnosne mjere, te njihovo funkcioniranje adekvatno dimenzionirati. U tom slu~aju govori se o „preuzetom riziku“. Kako uvijek postoji vjerovatno}a, da se pojave i vi{i protoci (npr. 100-godi{nje poplave), tada nastupi tzv. „slu~aj vi{e sile“, pa se za situacije tzv. „preostalog rizika“, mora predvidjeti dodatne, obi~no intervencijske mjere.

Za precizniju ocjenu opasnosti od poplava i za preciznije izra~une hidrauli~kog in`enjerstva, koje se bavi analiziranjem i rje{avanjem problema pri plavljenju vodotoka, od klju~nog su zna~aja ulazni podaci. To~nije i pouzdanije podatke o re`imu oticanja, kao {to su koli~ina, smjer, vodostaji i sl., mo`e se osigurati primjerenim monitoringom i analizom podataka du`eg vremenskog perioda. No, pri pripremi podataka o topografiji je klju~no oru|e postala kombinacija tehnologija daljinskog prikupljanja podataka i geografskih informacijskih sistema (GIS). Evidentiranje (najve}ih) do sada zabilje`enih {irina poplavljenih podru~ja nije dovoljno za izradu upozoravaju}ih karata od poplava ugro`enih podru~ja. Potrebno je uzeti u obzir i doga|aje koji imaju malu statisti~ku vjerovatno}u da se mogu pojaviti, pa se vjerojatno to do sada jo{ nije dogodilo ili zabilje`ilo. Za najzna~ajnije objekte i djelatnosti, koje bi bile previ{e ranjive (tj. premalo otporne) na poplavne pojave, poznati je pristup sa analizom najve}e mogu}e oborine odn. poplave (MPP odn. MPF), da bi se sprije~ila njihova ugro`enost i kod vrlo rijetkih doga|aja.

Ocjena ugro`enosti pojedinca, objekta ili neke djelatnosti, tijesno je povezana s hidrauli~kim parametrima toka, npr. dubinom i brzinom vode na poplavljenom podru~ju. Zato je tako zna~ajno, da se {to bolje obuhvati stvarne visine terena, kako bi se mogla prikazati podru~ja s dubinama vode opasnim za nepliva~e, podru~ja pove}ane brzine toka ili izlijevanja vode na predjele gdje se to mo`da i nije o~ekivalo.

Takve dodatne informacije, ako su povezane s odgovaraju}om interpretacijom hidrauli~kog modela, omogu}ava formiranje digitalnog modela terena (DMT), ako {to detaljnije prikazuje konfiguraciju terena. Preciznost odre|ivanja {irine plavljenja vodotoka u mnogome je ovisna o rezoluciji DMT i to posebno na ravni~arskim predjelima. Po{to su procesi plavljenja vi{edimenzionalni, GIS oru|a imaju sve va`niju ulogu. Prednost upotrebe GIS na podru~ju pra}enja i djelovanja u slu~aju prirodnih nesre}a nije samo u boljem predstavljanju doga|aja, nego i u preventivnom pona{anju pa i naknadnom analiziranju mogu}ih scenarija doga|anja i ocjeni (potencijalne) {tete nastale zbog poplava.

U nastavku }e biti predstavljena upotreba topografskih podataka, kao djela grafi~ke baze GIS, za pripremu geometrijskog opisa rije~nog korita i poplavnih podru~ja, potrebnog za hidrauli~ku analizu. Ta analiza je izvedena matemati~kim modelom ~ija se kompleksnost prilago|ava kompleksnosti problematike. Obi~ni jednodimenzionalni hidrodinami~ki modeli su u~inkoviti jedino kod topografsko jednostavnih podru~ja. Za preciznije hidrauli~ke simulacije poplava, potrebni su i modeli visoke rezolucije. U prilogu je prikazana upotreba topografskih podataka, dobivenih LIDAR tehnologijom, u cilju izrade digitalnog modela terena (DMT) vodnog prostora i priobalnih, potencijalno ugro`enih poplavnih povr{ina. Upotrijebljen je software ESRI ArcGIS sa pro{irenjem HEC-GeoRAS, koji omogu}ava pripremu geometrijskih podataka za hidrauli~ko modeliranje, te za prikaz rezultata na kartama. Obi~ni prikaz sa ucrtanim poplavnim linijama je ve} premalo. Za napredne analize poplavnih podru~ja za potrebe vodoprivrede, a i za analize prostornih planera ili drugih korisnika

prostornih podataka treba prikazati {to vi{e procesa, njihovih mehanizama i posljedica.

HIDRAULI^KO MODELIRANJE VODOTOKA I PRIOBALNOG PROSTORA

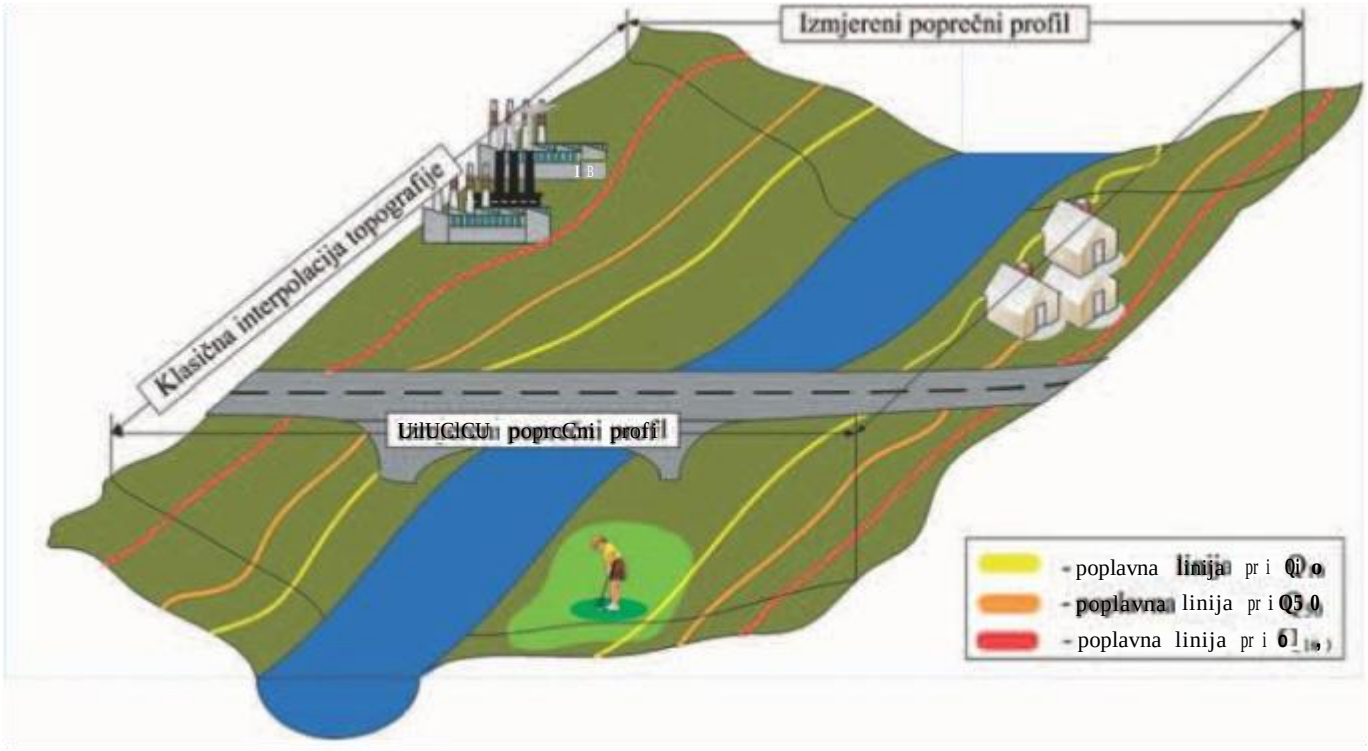
Hidrauli~kim modeliranjem utvr|uje se pona{anje vodotoka i veli~ina (jakost, smjer, dinamika) razli~itih optere}enja koja se pojavljuju kod visokovodnih ili drugih doga|aja. S obzirom na izmjerenu ili izra~unatu dinamiku procesa, analiziraju se posljedice prirodnih pojava ili antropogenih utjecaja na vodni tok ili na razli~ite zgrade. Tako se modeliranjem odredi i geometrija i dinamika poplavnih podru~ja, karakteristike vodnog tijela za vrijeme su{e, pa i antropogeni utjecaji na vodna tijela kao {to su posljedice ispusta vode za hla|enje, otpadne vode, promjena re`ima oticanja zbog protiv poplavnih mjera i sl.

Barem za tri stanja vodoprivrednih sustava, tj. za uobi~ajeno, iznimno i ekstremno stanje, moraju se analizirati optere}enja na prirodno ili gra|eno korito, te na objekte na vodama odnosno objektima pod utjecajem vodnog toka. Analiza doga|aja prilikom poplave mora utvrditi nivo vodne povr{ine u rije~nom koritu pri protocima razli~ite vjerovatno}e, njihove poplavne linije do kojih voda dolazi u slu~aju izlijevanja iz korita, te dubine, pravce i brzine vodnih tokova na poplavljenom podru~ju. Analiza tih parametara je podloga za zoniranje podru~ja, kada se za odre|en stepen poplavne opasnosti za ~ovjeka, objekte i djelatnosti (npr. promet), prikazuje obim takvog poplavnog podru~ja. Kod akumulacija na primjer, trebalo bi postaviti bar tri zone – podru~je koje poplavi voda prilikom normalnog pogona, onda pojas oko akumulacije, koji poplavi voda kod iznimno velikih protoka, na koje za dimenzionirani preljevni organi, i maksimalni pojas kod ekstremnih poplava (probable maximum flood - PMF). Za pojedine zone opasnosti treba analizirati i osjetljivost ~ovjeka, objekata ili djelatnosti, odnosno ranjivost na poplavu. Spajanjem stepena opasnosti i osjetljivosti mo`e se odrediti stepen ugro`enosti, pa se onda ustanovi, dali je pojedini objekt mogu}e locirati u pojedinu zonu ili ne. Za postoje}e stanje (objekte) se provjerava, dali je potrebno pove}ati njihovu protiv poplavnu sigurnost, a za budu}e aktivnosti/objekte analizira se primjerenost (tj. poplavna otpornost) pojedinih objekata/djelatnosti za stepen intenziteta opasnosti na pojedinim podru~jima. Kad bi se ustanovilo, da intenzitet pojava prelazi granicu, za koji su objekti, odnosno mjere za{tite dimenzionirane, treba napraviti analizu rizika. Na toj osnovi se prihva}a odluka, ili pove}ati protiv poplavne mjere ili neka subjekt snosi posljedice tzv. “slu~aja vi{e sile”. No, za taj slu~aj je pripremljeno izvo|enje vrlo restriktivnih intervencijskih mjera, u Sloveniji predvi|enih npr. u Nacrtu protiv poplavnih mjera.

Da bi {to vi{e korisnika prostora poznavalo stepen opasnosti, izra|uju se tzv. „karte upozorenja“, koje prikazuju razli~ite stepene opasnosti od poplava, erozije, lavina (snijega, zemlje) isl. Te karte predstavljaju podlogu za dozvoljavanje izvo|enja radova ili pojedinih djelatnosti unutar takvih podru~ja, odnosno daju osnovu za ocjenjivanje primjerenosti predlo`ene gradnje objekata ili aktivnosti. Za prostor unutar poplavnih linija, definiran za doga|aje definirane vjerovatno}e pojave, potrebno je izraditi i ocjenu rizika i definirati stepen preuzetog rizika. Tako se mogu npr. rekreacijski putovi planirati i na podru~ju u~estalih poplava, a va`ne javne zgrade naravno ne. Na osnovi odluke o preuzetom riziku, koji je obi~no opisan projektnim protokom, treba je primjereno prilago|avati koncept i dimenzije objekata, odnosno urediti potrebne sigurnosne mjere i opremu. Po{to preuzimanje (pre)velikog rizika nije po`eljno, propisima ili pravilima struke se odrede prihvatljive granice odnosno prihvatljive djelatnosti unutar pojedinih zona. Takve granice su postavile npr. Vodnogospodarske osnove Slovenije (ZVSS, 1978).

Na slici 2 je prikazano, kako se na dionici vodotoka na podru~ju razli~itih poplavnih vjerovatno}a mogu zonirati razli~ite djelatnosti. Osjetljivost na poplave se mo`e za pojedine objekte ili djelatnosti opisati i krivuljama {tete, koja raste sa visinom (poplavnog) protoka. Zato se danas, kao dodatni kriterij za odre|ivanje projektne protoke projektiranih protiv poplavnih mjera, izra~una i utvr|ena o~ekivana poplavna {teta (Banovec, 2002), koja ulazi u ra~un ekonomske opravdanosti varijantnih protiv poplavnih mjera.

Za izra~un poplavnih linija u {irokoj upotrebi je hidrauli~ki program - model HEC-RAS, koji omogu}ava ra~unanje jednodimenzionalnog stalnog i nestalnog toka u otvorenim vodotocima (US Army Corps of Engineers, 2003). Hidrauli~ki model zahtjeva opis geometrije rije~nog korita, od crtanja tlocrtne situacije vodotoka do definiranja ta~aka pojedinih popre~nih profila u lokalnim koordinatnim sistemima, opis geometrije vodotoka i priobalnog prostora, odre|ivanje koeficijenata hrapavosti korita, i ostalih parametara koji bi mogli uticati na hidrauli~ke veli~ine u vodotoku. Na lokaciji geodetsko ili druga~ije izmjerenog popre~nog profila, gdje su poznate prostorne koordinate X,Y, Z geometrija je dovoljno precizna. No, mnogo manje je precizna interpolacija geometrije korita me|u pojedinim izmjerenim popre~nim profilima. Da bi pobolj{ali opis geometrije rije~nog korita i poplavnih podru~ja, kao osnova za rad se upotrebljavaju digitalni modeli terena (DMT) u obliku nepravilne trokutne mre`e (TIN). DMT se mo`e napraviti na osnovu topografskih podataka sakupljenih pomo}u razli~itih tehnika daljinskog pra}enja, od klasi~nih geodetskih mjerenja, digitalizacijom karata, pra}enjem izohipsi, sve do moderne tehnolo-



Slika 2: *Na odsjeku vodotoka su ucrtane poplavne linije za protoke sa razli~itom vjerovatno}om. Osjetljivost (objekta) na poplave prvi je kriterij za prihvatljivost upotrebe prostora (gradnje) unutar pojedinih poplavnih linija*

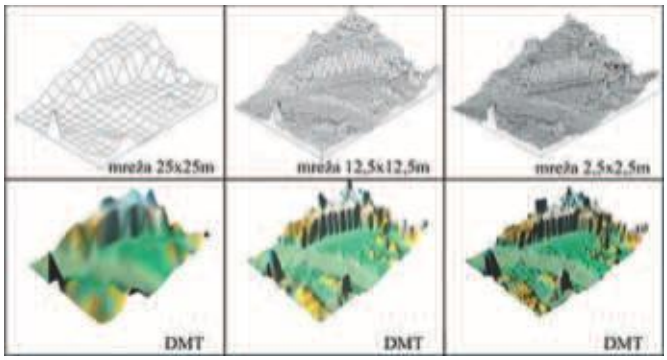
gije LIDARa, o kojoj }e biti kasnije ne{to vi{e napisano. Nabrojane tehnike daju naravno, podatke razli~ite to~nosti. Kad je DMT napravljen, pomo}u pro{irenja HEC-GeoRAS u programu ArcGIS se pripremaju datoteke sa to~nijim geometrijskim podacima {ireg prostora, potrebnim za izra~une s hidrauli~kim modelom HEC-RAS. Po potrebi se pripremljena geometrija u programu HEC-RAS mo`e dopuniti i pojedinostima, kao {to su objekti ili druge (biotehni~ke) gradnje u prostoru.

Za modeliranje je osim geometrije treba dodati i hidrauli~ke parametre koji opisuju osobine vodotoka ili prepreka u toku vode (koeficijenti pro{irenja/su`enja korita i sl.), i opisati odgovaraju}e po~etne i rubne uvjete. Radi se o odre|ivanju projektnih protoka, hidrograma i pripadaju}ih grani~nih uvjeta, koji se mogu razlikovati obzirom na to, da li su u pitanju obi~ni doga|aji, iznimni doga|aji (npr. klizanje brijega korita u vodotok) ili ekstremni doga|aji (izuzetne poplavne pojave). Obi~no se za osnovne izra~une (u ranim fazama projektiranja) upotrebljava stalni tok, a za kompleksnije faze planiranja i izra~uni nestalnog toka. Time se dokazuje funkcioniranje rje{enja, pa i stabilnost projektiranih ure|enja na hidrauli~ka opterе}enja. Jedan od bitnih ciljeva pa je i prikaz rezultata hidrauli~kih modeliranja na transparentan, razumljivi na~in drugim strukama, koje se bave planiranjem kori{tenja prostora, pa i naj{iroj javnosti, {to upravo upotreba GIS oru|a i izrada DMT omogu}ava.

DIGITALNI MODEL TERENA

Digitalni model terena (DMT) je digitalna prezentacija terena, na kojoj su dodane glavne topografske karakteristike terena, kao {to su recimo nagibi, kote, udubljenja, grebeni, itd. ([umrada, 2005). Za potrebe na{eg hidrauli~kog modeliranja se kao izuzetno korisno pokazalo programsko oru|e HEC-GeoRAS (Rak, 2006), koje za izradu DTM upotrebljava mre`u nepravilnih trokuta (TIN). TIN ima nekoliko o~itih prednosti u usporedbi s rasterskim DMT. Razmatrano podru~je naime TIN opisuje se mre`om zatvorenih, neprekrivaju}ih se trokuta, koji se dodiruju, i mogu se razlikovati po obliku i veli~ini. Zato je mogu}e iz raspolo`ivih ta~aka visinskih vrijednosti, napraviti mre`u mnogo br`e nego pomo}u odgovaraju}ih mre`nih interpolacija. TINov oblik je tako|er pogodniji za pohranjivanje podataka o crtama promjene nagiba (npr. stranice korita, nasipi i sl.), o visinskim ta~kama, dobro opisuje vertikalne strukture i sl. Upotrebom TINa mo`e se po potrebi pove}ati gusto}a ta~aka s kojima se detaljnije opi{e reljef, {to je jedna od ve}ih prednosti modela TINa, posebno kad je potrebno u`e podru~je detaljnije analizirati.

Ve}ina DMTa, napravljenih na osnovu podataka dobivenih s razli~itim tehnologijama, je zadovoljavaju}e to~na za op}i prikaz terena. Iskustva, dobivena pri sastavljanju hidrauli~kih i GIS modela, pa su pokazala potrebu po preciznijem digitalnom modelu terena, koji bi zadovoljavaju}e bolje opisao geometriju



Slika 3: *Prikaz topografije terena sa DMT, izra|enih na osnovi visinskih ta~aka terena. Razli~ito guste mre`e pokazuju stepen pojednostavljenja informacija o topografiji (Alemseged, 2005.). Za hidrauli~ke izra~une (smjer, ja~ina, brzina vodnog toka) su dakako va`ni i detalji terena*

korita i prostora uz vodotok, pa time omogu}io i izradu kompleksnije numeri~ke mre`e hidrauli~kih modela. Izrada DMT na osnovu digitaliziranih izohipsi sa klasi~nih geodetskih karata (npr. GBK25 – 1:25.000, GBK10 i dr.) pokazuje, da te sadr`e, za precizan prikaz topografije, premalo ta~aka terena, jer je osnovna }elija mre`e prevelika. Da gusto}a izmjerenih karakteristi~nih ta~aka terena uti~e na to~nost DMTa, i posredno na hidrauli~ku analizu, se o~ito vidi na slici 4. Kod DMTa, izra|enog pomo}u najmanjeg broja ta~aka, pojavljuju se najve}a pojednostavljenja topografije, narastanjem gusto}e ta~aka na jedinicu povr{ine je vidljivo sve vi{e detalja terena.

Na slici 3 se vidi i to, da nije prikazana stvarna topografija rije~nog korita. Opis obala vodotoka vjerojatno dosti`e razinu vodne povr{ine u vrijeme snimanja terena. Iz takvog DMT zna~i nije mogu}e dobiti zabilje`eno dno rije~nog korita. Uzimanjem takve plohe (vodnog zrcala) u ra~un dakako rezultira pojavom poplava ve} pri manjim protocima. Po{to se ne uzima u obzir stvarni volumen korita, izra~unata je manja proto~na sposobnost korita i br`e je dostignut nivo, pri kojem voda izlazi iz korita, nego {to je to u stvarnoj situaciji. Gre{ku pri opisu geometrije rije~nog korita se obi~no ispravlja uno{enjem dodatnih ta~aka, tj. na terenu izmjerenih popre~nih profila korita vodotoka. Kako su izmjereni popre~ni profili korita obi~no na ve}oj me|usobnoj razdaljini, to ponovo dovodi do gre{aka prilikom interpolacije ta~aka pri izradi TIN.

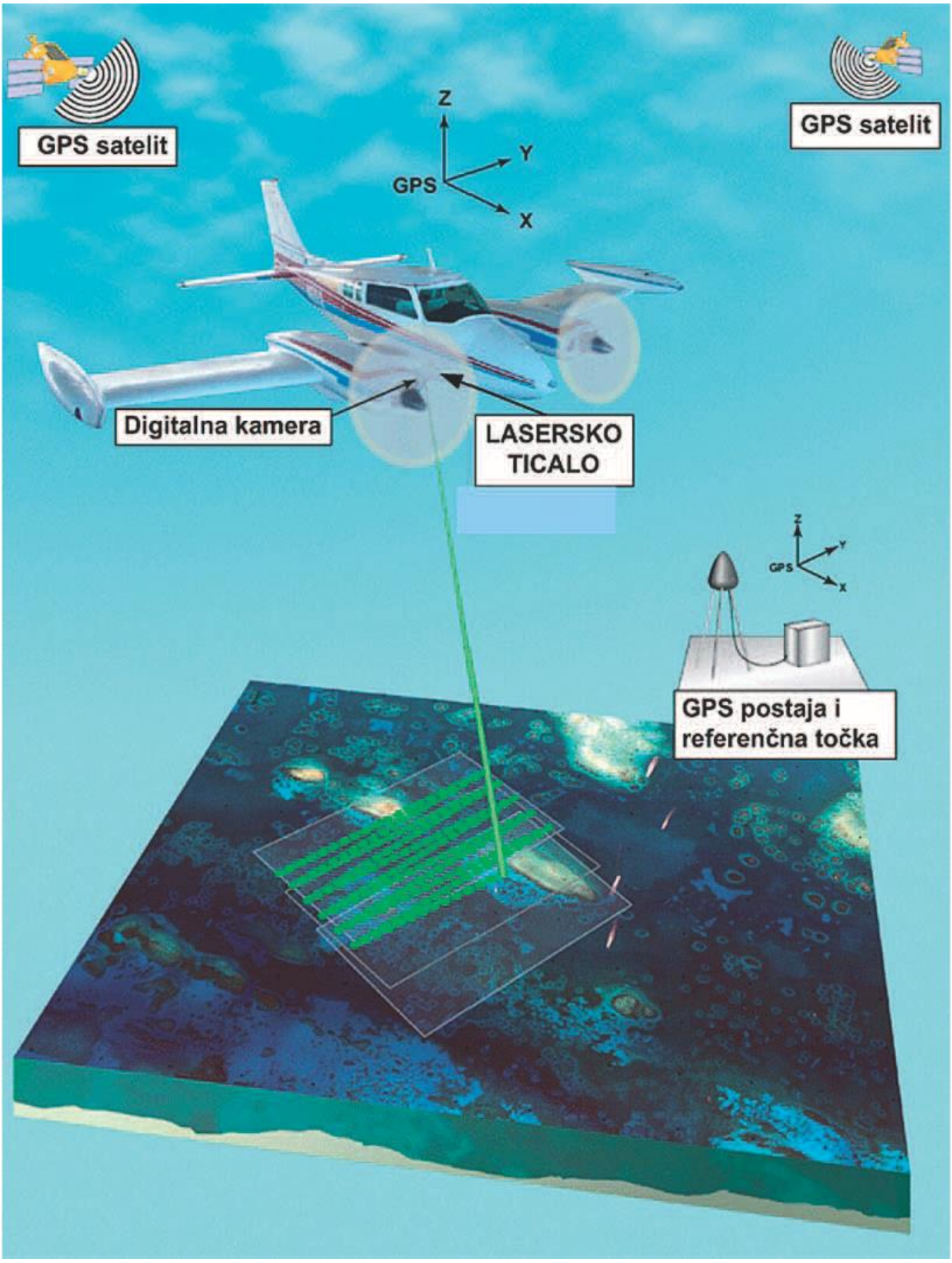
Pote{ko}a koja se pojavljuje kod izrade svih DMTa, ~ak i kad se upotrebljavaju nepravilne trokutne mre`e, je kako detaljno prikazati vertikalne prirodne pojave (npr. strma stijena, usko i strmo korito, ...), odnosno umjetne objekte (npr. oporni zidovi, mostovi). Ti objekti naime imaju razli~ite vrijednosti visina za vi{e nivojskih ta~aka koje imaju (gotovo) iste koordinate x i y. Obi~ni DMT taj problem ne mo`e u potpunosti rije{iti. Definiranje ravnina sa ve}im gradijentima moglo bi se pobolj{ati uno{enjem ve}e gusto}e ta~aka – takav DMT je ponekad zvan kao 2,5-dimenzionalni model.

S upotrebom novijih tehnika dobivanja visinskih ta~aka velike gusto}e, me|u kojima prevladava LIDAR, mo`e se u velikoj mjeri rije{iti probleme preciznosti i pote{ko}e, koje se javljaju kod izrade DMTa, napravljenih na osnovi digitaliziranih karata. Ako se uzme mnogo ve}i broj karakteristi~nih ta~aka terena, mogu} je kako prikaz detalja topografije, tako i precizniji prikaz (strmih) nagiba. Sve to korisno uti~e i na preciznost geometrijskih podataka, koji se s pomo}u GIS oru|a iz DMTa pripreme za upotrebu u hidrauli~kom modelu, sa ciljem preciznijeg opisa {irenja poplavnih tokova u prostoru.

TEHNOLOGIJA *LIDAR*

Kao i ve}ina novijih tehnika (GPS i sl.) i tehnologija *LIDAR - Light Detection and Ranging* je bila razvijena najprije za vojne potrebe. Tehnologija temelji na daljinskom evidentiranju povr{ine pomo}u laserskog ticala, koje je postavljeno na zra~ne letjelice (avione, helikoptere) ili svemirske letjelice. Takvo ticalo spada me|u aktivne senzore daljinskog prepoznavanja jer je sistem sam sebi izvor energije i nije ovisan od vanjskih izvora, kao npr. opti~ki sistemi. Upotrebljivost i dalja nadgradnja dala je razvoj mnogih sistema koji su danas dostupni i za komercijalnu upotrebu.

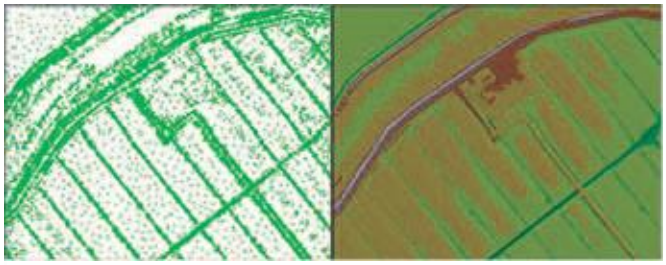
Osnova sistema laserskog evidentiranja se sastoji od ure|aja na letjelici i ure|aja za obradu podataka. Evidentiranje terena je shematski prikazano na slici 4. Lasersko ticalo, tj. laserski predajnik, prijemnik, detektor signala, poja~iva~ i ostale elektronske komponente, su samo dio sistema na letjelici. Neizostavni sastavni dijelovi su i radarske antene, GPS (Global Positioning System), IMU (inercijska mjerna jedinica) i video kamere ili fotoaparati za dokumentiranje drugih osobina povr{ine. Za preciznija mjerenja se obi~no upotrebljava LIDAR pri~vr{}en na helikopter, {to omogu}ava ni`e letenje, manju brzinu letenja i mjerenje koordinata s gusto}om 10-20 ta~aka na kvadratni metar. Snop laserskog svjetla ima promjer, kod ta~ke kad napusti laserski ure|aj, oko 7,5 milimetara, a pri dodiru s preprekom se pri visini leta izme|u 1000 i 2000 metara pove}a na promjer 50 centimetara. Zato sa {umom obraslim i urbaniziranim podru~jima snop pogodi vi{e nego jedan objekt, {to posljedi~no daje vi{e odbijenih signala. Vi{e odbijanja se mo`e i korisno upotrijebiti u razli~itim granama znanosti. Tako npr. na podru~ju {umarstva vi{e puta odbijeni signal, relativno na refleks s terena, omogu}ava utvr|ivanje visine, gusto}e i oblika razli~ite vegetacije (grmlje, drve}e), te odre|ivanje tipova habitata.



Slika 4: *Osnova djelovanja sistema LIDAR (Nayegandhi, 2003.)*

Pri upotrebi LIDAR tehnologije za dobivanje koordinata terena, `ele se eliminirati sve ostale refleksе, zbog ~ega se uzima u obzir samo zadnje odbijanje, koje je obi~no odbijanje od tla ili bar blizu tla. Pri snimanju se zabilje`e velike koli~ine podataka, zato se razvijaju brojni algoritmi za ekstrakciju onih ta~aka, koje su va`ne za rad na odre|enom podru~ju odnosno za odre|enu namjenu. Takvi postupci su u~inkoviti u pribli`no 90% slu~ajeva, a za pomo} pri daljnjoj obradi se upotrebljavaju ortofoto (vidljivi ili infracrveni spektar) snimci, koji se snimaju istovremeno. Tehnika je ve} napredovala do te mjere, da se mogu upotrebljavati i na podru~ju evidentiranja objekata. Kompliciranі algoritmi omogu}avaju i predstavljanje modela zgrada i njihovu rekonstrukciju, gdje pojedini objekti dobiju kona~an izgled lijepljenjem fotografija stvarnih objekata.

Kao primjer detekcije drena`nog sistema na melioracijskom podru~ju, na slici 5 je s lijeve strane prikazana gusto}a s tehnologijom LIDAR dobivenih ta~aka, koje su bile odgovaraju}om obradom ve} zgusnute na mjestima koja su va`nija za hidrauli~ke analize, kao {to su prelazni rubovi u vodotok, oblika melioracijskih jaraka i sl. Na desnoj strani je prikazan obojen DMT izra|en s TIN za isto podru~je, koji pokazuje, kako su zbog velike preciznosti podataka o ta~kama terena, vidljivi i detalji terena, kao {to su npr. neravnine pojedinih razmatranih poljoprivrednih povr{ina.



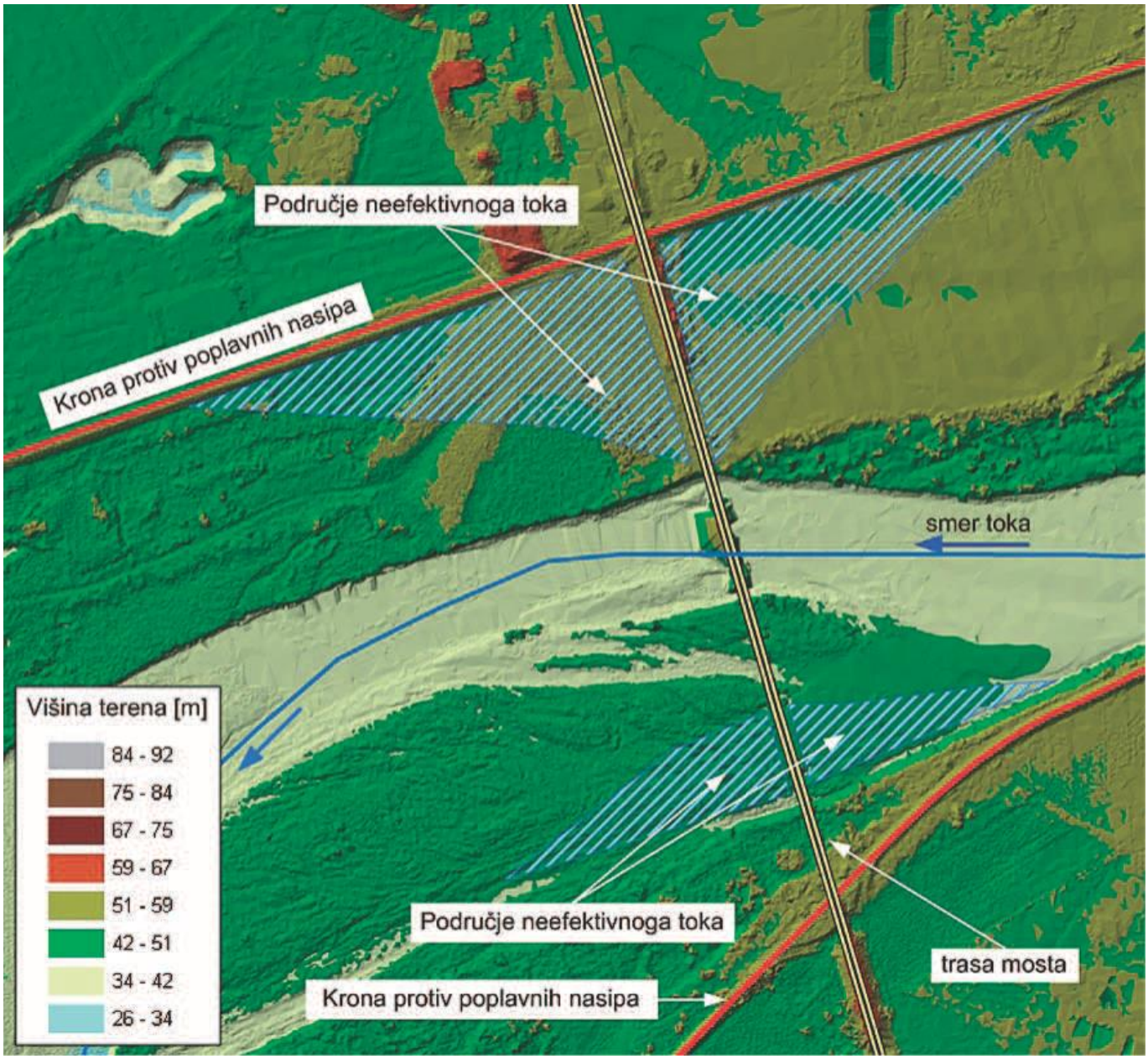
Slika 5: *Prikaz to~aka snimljenih s sistemom LIDAR (lijevo), koje su bile odgovaraju}e obra|ene, da bi dobili {to vi{e informacija o re`imu oticanja s melioracijskog sistema. Iz njih je izra|en prvo TIN (desno) i onda DMT s velikom precizno{}u, pa se time opisuje topografija i smjerovi oticanja oborina. (Rak, 2006.)*

Va`na prednost koju donosi tehnologija LIDAR je to~na digitalna priroda podataka, koja je manje podlo`na horizontalnim gre{kama kao podaci o to~kama dobivenim pomo}u digitalizacije izohipsi. Pomo}u podataka dobivenih s tehnologijom LIDAR, dobivamo ta~ke terena s niskom tolerancijom, i do 2 cm (Supej, 2006). Za hidrauli~ke analize se kao prednost javlja i mogu}nost brzog dobivanja podataka kontinuiranim prelijetanjem poplavnog podru~ja i s tim pra}enje promjena na terenu skoro u realnom vremenu, jer je snimanje stanja mogu}e po svakom vremenu, i danju i no}i. Visoka to~nost DMT donosi prednosti i u slu~aju kad mogu manji elementi terena, kao {to su nasipi, manje brane, putovi, a i druge prepreke imati velik utjecaj kako na vodotok, tako i na po~etak i na~in plavljenja. Po{to je omogu}ena velika gusto}a izmjerenih ta~aka na karakteristi~nim mjestima, mogu}e je preciznije utvrditi i mjesta prelijevanja vode iz glavnog korita, a s tim i preciznije odrediti grani~ni protok kad rijeka po~ne plaviti.

LIDAR tehnologija nudi prednost i u odnosu na satelitski snimak, jer sistem dosti`e mnogo bolju reakciju, bolju preciznost, ve}i broj paralelnih produkata, djelomi~no ili potpuno prodiranje kroz vegetaciju itd. (Supej, 2006.). Naravno, javljaju se i slabosti. Prva je velika koli~ina skupljenih podataka, koji za obradu trebaju dobru kompjutersku opremu. Onda, pri bilje`enju geometrije (podvodnog) rije~nog korita, ote`ano je snimanje korita dubljih vodotoka i vodotoka s velikom koli~inom suspendiranih elemenata. Osnovna verzija laserskog ticala ima frekventni raspon oko karakteristike infracrvene svjetlosti, koje ne prodire duboko u tijelo vode jer se snop u vodi raspr{i, pa nema odbijenog signala i time podataka o podvodnom prostoru. Djelomi~no je pote{ko}u mogu}e rije{iti upotrebom dvojnog laserskog ticala od kojih jedan emitira infracrvenu, a drugi plavo-zelenu svjetlost. Druga svjetlost mo`e prodrijeti do odre|ene dubine ako u vodi nema prevelike koli~ine suspendiranog materijala. U slu~aju kad je suspendiranih materija previ{e, dolazi do raspr{ivanja i odbijanja snopa ve} prije dna, zbog ~ega detektirano dno korita opet mo`e sadr`ati povelike gre{ke. Sli~ne pote{ko}e se javljaju i kod br`ih vodotoka, a posebno kod brzaca. U tim slu~ajevima se upotrebljavaju vi{esnopovski (“multibeam”) ure|aji, namijenjeni posebno za snimanje batimetrije. Tako snimljene ta~ke se zatim zdru`uju s ta~kama terena, dobivenima s tehnologijom LIDAR. Osnovni pristup je zato, da se zbog slabog prodiranja snopa u vodu, mjerenja vr{e pri {to manjim (su{nijim) vodostajima.

PRIPREMA GEOMETRIJE RIJE^NOG KORITA I PRIKAZ POPLAVNIH PODRU^JA POMO]U ARCGIS PRO[IRENJA HEC-GeoRAS

Programsko pro{irenje HEC-GeoRAS uvijek se upotrebljava u kombinaciji s pro{irenjem ArcGIS ESRI 3D Analyst i ESRI Spatial Analyst. Dok nam 3D Analyst omogu}ava interpolaciju podataka DMT, s pro{irenjem Spatial Analyst mo`e se prikazati veli~ine izra~unatih dubina vode i brzine vode pomo}u rasterske mre`e ili oblikovanjem histograma. Kao {to je ve} spomenuto, DMT mora biti izra|en pomo}u TIN, {to omogu}ava bolje predstavljanje povr{inskih promjena kako rije~nog prostora, tako i pripadaju}ih poplavnih povr{ina. Kad je model terena u TIN spreman, po~inje se sa oblikovanjem slojeva to~aka, lini-



Slika 6: *Na izra|enu podlogu DMT se mogu dodavati mnogobrojne dodatne osobine objekata, vodotoka ili vodnog i priobalnog prostora (npr. podru~ja recirkulacije vode)*

ja i poligona, potrebnih za pripremu geometrijskih podataka za hidrauli~ke modele (npr. Za HEC-RAS). Neki podaci su obavezni, neki izborni. Me|u obavezne slojeve, pored samog DMT, spadaju sredi{njica vodotoka, te trase i profili popre~nih presjeka. Ta dva sloja se izrade najprije u 2D prostoru, i poslije pretvore u 3D oblik. Na osnovu DMTa, u programu se odrede potrebne razdaljine i visinske vrijednosti pojedinih ta~aka. Korisnik ima na raspolaganju i mnoge druge slojeve s kojima mo`e dopuniti geometrijski model – mogu se iscrtati linije obala rije~nog korita, linije nasipa i mostova, putova mogu}ih poplavnih tokova i sl. Mogu}i su i poligonski slojevi koji opisuju podru~ja neefektivnog toka ili objekte uz rije~no korito koje je zahvatio vodni tok, koji smanjuju povr{inu popre~nog presjeka, pa i podru~ja akumuliranja vode i sl., koje ina~e voda poplavi ali u njima recirkulira, a protoka vode u smjeru vodotoka zapravo i nema. Obi~no se takva podru~ja javljaju uz mostove, propuste, u meandrima i sl., kao {to je to prikazano na slici 6. Pored trase mosta, ~ijeg prikaz slu`i samo kao pomo} pri preciznijem odre|ivanju lokacije uzdu` vodotoka, a njegova geometrija se definira u hidrauli~kom modelu, iscrtane su i linije obrambenih nasipa (postoje}ih ili projektiranih).

Program, koji je bio kori{ten, omogu}ava i vezu sa slojem u kojem se opi{e i upotreba tla (poljoprivreda, {uma, isl.). Osobine toga sloja su od velike pomo}i pri definiranju Manningovih koeficijenata hrapavosti n_g, prije svega za definiranje uticanja ve-

getacije na poplavnim podru~jima. Razmatrano podru~je je mogu}e i podijeliti, kao {to je prikazano na slici 7, na dijele podru~ja sa jednakom ili sli~nom zarasti ili kori{tenjem tla, te se za svakoga od njih odredi koeficijent hrapavosti. Program zatim odredi promjenu koeficijenta n_g uzdu` cjelokupnog popre~nog profila, {to osiguravа to~nije uzimanje u obzir stvarnog stanja, nego u slu~aju, kad bi se uzela popre~na vrijednost za cjelokupni popre~ni profil. Pri kreiranju tih slojeva, od velike su pomo}i aerofoto snimci, ako se dovoljno precizno prekrivaju sa DMT, jer se mogu s dovoljnom to~no{}u odrediti lokacije pojedinih objekata, nasada, {uma i sl. Mogu poslu`iti i kod odre|ivanja objekata koji uti~u na vodni tok, a njihovu geometriju definiramo ve} u ArcGIS-u (npr. ku}e, gospodarske objekte, i sl.) ili kasnije u HEC-RAS-u. Neposredno se u hidrauli~ki model unosi prije svega objekti koji imaju znatnu hidrauli~ku ulogu, kao {to su mostovi, propusti, planirani nasipi i sl. Nakon oblikovanja svih slojeva, izradi se namjenska datoteka, s cjelokupnim geometrijskim podacima, koja je primjerena za hidrauli~ki matemati~ki model HEC-RAS.



Slika 7: *Za podru~ja sa karakteristi~nim zajedni~kim osobina, kao {to ih nudi detaljnija geometrija rije~nog koridora, mogu se odrediti i druge osobine poplavnih podru~ja – prikazana su podru~ja, gdje karakteristi~na vegetacija uti~e na koeficijent hidrauli~kog otpora vodnom toku*

PRIKAZ HIDRAULI^KIH IZRA^UNA S PROGRAMSKIM ORU\EM HEC-GEORAS

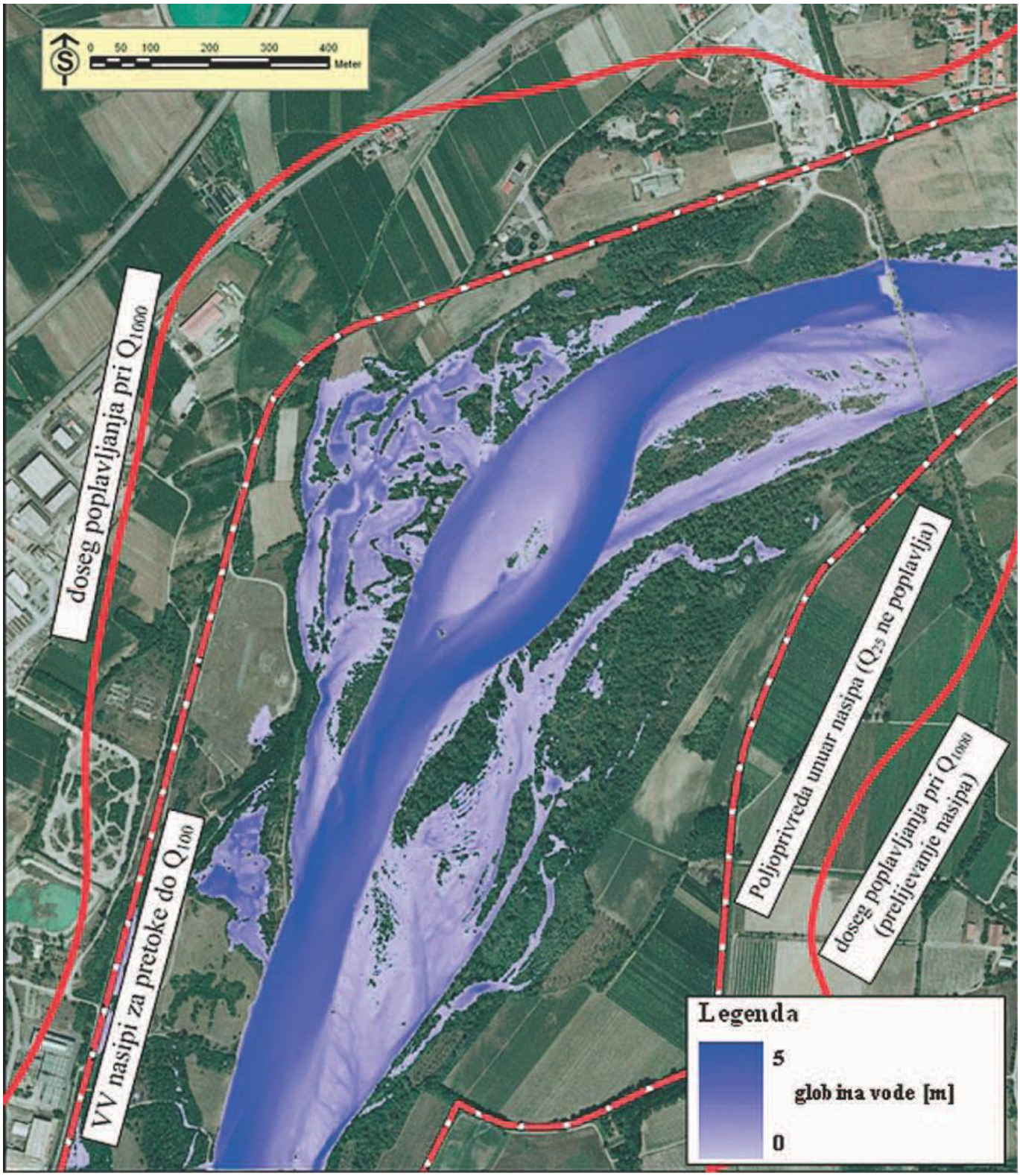
Po zavr{enoj hidrauli~koj simulaciji se rezultati izra~una toka vode pomo}u HEC-GeoRAS prenese nazad u GIS oru|e. Treba naime izra~unati sjeci{ta (kose) vodne povr{ine s terenom, tzv. poplavne linije, s kojima se na razli~itim kartama prika`e obim plavljenja za razmatrane protoke razli~ite vjerovatno}e pojave. Za prikaz poligona vodne povr{ine ponovo se izradi mre`a TIN, {to se izvede interpolacijom visina vodne povr{ine izme|u rije~nih profila. Nagib povr{ina poligona me|u profilima predstavlja pad povr{ine vode. Ako je geometrija pripremljena pomo}u programskog oru|a HEC-GeoRAS, poligoni koji predstavljaju vodnu povr{inu su ve} smje{teni u prostor. Pri tome je potrebno naglasiti da poligone, koji nisu geopozicionirani, nije mogu}e prenijeti u prostor.

Osim 2D prikaza {irine poplavljenih podru~ja, postupcima u okviru HEC-GeoRAS se mo`e pokazati i podjela dubine vode po prostoru. Rezultati takvog prikaza stanja u prostoru su vidljivi na slici 8, gdje je razli~ita dubina vode prikazana razli~itim nijansama plave boje. U rije~nom koritu je voda i pri poplavi najdublja, naravno uz uvjet da se korito pri poplavi bitno ne mijenja zbog erozije ili talo`enja sedimenata. Na slici 8 je o~ita {irina plavljene povr{ine pri protoku Q_{25}, kao primjer uobi~ajenog, s projektom predvi|enog stanja. Vidljiva je i trasa visokovodnih nasipa koji su bili dimenzionirani na (grani~ni) projektni protok s 100-godi{njim povratnim periodom i izra~unata poplavna linija za vanredne doga|aje, npr. za pojavu protoka Q1000. Naravno, mogu}e su i mnoge druge analize, kao npr. prikaz lokalne brzine vode, kojom se mo`e upozoriti na opasnost odno{enja ljudi, erozije i sl., a i druge u~inkovite prikaze hidrauli~kih rezultata i u trodimenzionalnom prostoru.

Na slici 8 je prikazano stanje kod dvadesetpetogodi{njeg protoka (Q_{25}) projicirano na aerofoto snimku. Tako je ve} na prvi pogled mogu}e vidjeti, da se za brojne korisnike prostora mogu dobiti i druge informacije o upotrebi prostora - raspored obra|enih zemlji{ta unutar inundacije poka`e, da su se poljoprivrednici prilagodili na pojavu niskih visokih voda (cca. $Q_{30}$). Za te njive naravno postoji rizik da budu poplavljena, no taj preuzeti rizik je o~ito uzet kao prihvatljiv. Prikazana trasa protiv poplavnih nasipa sa projektnim protokom Q100 pokazuje, do kuda se`e podru~je preuzetog rizika pri pojavi stogodi{njih voda. Kako postoji i mogu}nost plavljenja pri jako visokim protocima (npr. hiljadugodi{nje vode, Q1000), potrebno je uzeti u obzir da se, iako rijetko, mo`e materijalizirati i preostali rizik. Stoga je potrebno kod prostornog planiranja razumjeti i upotrijebiti vodoprivredne informacije i uvjete, prikazane na transparentan na~in. Upotreba kombinacije LIDARa i hidrauli~kih modela ima zato lijepu perspektivu.

ZAKLJU^AK

Namjena teksta je, predstaviti koncept i izra|enu metodologiju uklju~ivanja modernih metoda detekcije terena i upotrebe GIS oru|a za pripremu geometrijskih podataka za hidrauli~ko modeliranje. Zato u tekstu nisu date brojne jednad`be koje su ina~e kori{tene u izra~unima. Prikazani pristup daje pobolj{anu to~nost hidrauli~kih izra~una, jer uzima to~niji digitalni model terena, odnosno dodatnu batimetriju vodotoka. Rezultat je bolje poznavanje stvarnog stanja poplavnih tokova, jer ve} manje promjene topografije mogu utjecati na re`im oticanja vodotoka (smjer, ja~ina). Takva metodologija rada stoga donosi va`ne dodatne informacije o poplavnom stanju u prostoru, kao {to su lokacije i koli~ine izlijevanja iz korita rijeke, a i smjer, brzina, dubina i raspodjela vodnih tokova na poplavljenom podru~ju. Na `alost su



Slika 8: *Iz LIDAR topografije i to~nijih hidrauli~kih ra~una je mogu} i to~niji prikaz {irine poplavnog podru~ja i dubine vode (Steinman et al., 2006.)*

testiranja pokazala, da za podru~ja, gdje su dostupne samo digitalizirane karte ve}ih razmjera, ta metoda rada prakti~ki nije upotrjebljiva.

Preuzimanje u~inkovitih protiv mjera pri pojavi visokih voda, i preventivno sagledavanje opasnosti od poplava u prostoru, u velikoj mjeri je ovisno i o to~nosti odre|ivanja stepena opasnosti na pojedinim lokacijama. [to to~nije karte, sa gradacijom opasnosti od poplave pri protocima sa razli~itim povratnim periodima, potrebne su kako organima za za{ti-

tu i spa{avanje, tako i ostalima koji planiraju ili koriste vodni i/ili priobalni prostor. Po{to na tim podru~jima va`e i fizi~ka i pravna ograni~enja upotrebe, potrebno je da se svi vlasnici upoznaju sa stvarnim stanjem (opasnost, ugro`enost) u prostoru.

Ve}a to~nost hidrauli~kih izra~una je utoliko va`nija u ravni~arskim predjelima, gdje ve} manje pove}anje razine vode mo`e uzrokovati plavljenje ve}ih podru~ja. Za to~nije izra~une je potrebno i to~nije bilje`enje terena, koje u pro{losti nije bilo lako izvodivo. Osobine rije~nog korita i poplavnih podru~ja, koje uti~u na hidrauli~ke osobine vodotoka, se mogu efikasnije opisati upotrebom GIS oru|a. Va`an napredak u hidrauli~koj analizi je omogu}ila detekcija topografije s dovoljno velikom gusto}om i to~no{}u, koju je omogu}ila tehnologija LIDAR. Prednost tehnologije je, pored to~nosti, i mogu}nost dobivanja topografije {irih podru~ja u vrlo kratkom vremenu, te brzina postupaka za izradu DMT, pa se mo`e o~ekivati i bilje`enje promjena za vrijeme poplava.

Na primjeru analiziranja hidrauli~kih osobina vodotoka, prikazana je istovremena upotreba GIS oru|a, te dobivanje podataka geometrije rije~nog korita i poplavnih povr{ina LIDAR tehnologijom i izradom preciznog DMT. Na osnovu na{ih iskustava pri upotrebi tih metodologija u okviru Interreg projekta (Slovenija – Italija), takav je pristup usvojen i za najva`nije projekte u Sloveniji (npr. projektiranje HE na Savi). Zato se pro{le zime (u periodu bez li{}a), u Sloveniji zapo~elo LIDAR snimanje topografije i za potrebe hidrauli~kih analiza od poplava najugro`enijih podru~ja. Rezultati izra~una daju to~niju lokaciju poplavnih linija, pa i druge va`ne informacije, kao npr. brzinu i raspodjelu dubine vode u poplavljenom podru~ju (hidrostati~ki i dinami~ki pritisak na objekte).

Rezultati hidrauli~kog modeliranja omogu}avaju sagledavanje opasnosti od poplava u postupcima planiranja, ocjenjivanje pozitivnih efekata protiv poplavnih mjera, a i analizu optere}enosti objekata (i stabilnosti) u poplavnim podru~jima. Kad budu izvr{ene i analize osjetljivosti objekata razli~itih konstrukcija i na hidrodinami~ka optere}enja, za njih }e biti mogu}e izvr{iti i procjenu ugro`enosti. Za pojedine objekte bi tako dobili ocjenu o~ekivane {tete od poplava, ocjenu ugro`enosti stabilnosti (potkopavanje, otpor vodnom toku), pa i ocjenu otpornosti (na prodor vode u objekt, na ru{enje obodnih zidova) u odnosu na optere}enje vodom i/ili naplavinama. Takve analize su potrebne i u slu~aju djelovanja lavina (objekti na skijali{tima), blatnih tokova i sli~nih optere}enja objekata.

Dok se optere}enja mogu odrediti hidrauli~kim modeliranjem, otpornost i stabilnost objekata na optere}enja u takvim uvjetima odre|uje se analizom konstrukcije i opreme. A to zna~i, da se moraju na tim pitanjima povezivati brojni stru~njaci, konstruktori i hidrotehnici, arhitekti i brojni drugi.

LITERATURA

1. Alemseged, T. H. Integrating Hydrodynamic Model and High Resolution DEM For Flood Modelling. Enshede, Netherlands, 2005.
2. Banovec, P., Steinman, F., Tr~ek, R,. Ocjena poplavnih {teta u dolini Sel{ke Sore i valorizacija ekonomskih efekata retenzija. Voda i mi, god. 6, str. 9-14, Sarajevo 2002.
3. Nayegandhi, A. Lidar Mapping of Vegetation at Assateague Island National Seashore, USGS, 2003.
4. Rak, G. Uporaba prostorskih podatkov v analizi hidravli~nih lastnosti vodotokov. Ljubljana, Fakulteta za gradbeni{tvo in geodezijo, 2006.
5. Steinman, F., Gosar, L. Povezava ra~una gladin v odprtih vodotokih in CAD sistema. Zbornik 18. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Bled: str. 179-186, 1996.
6. Steinman F., Gosar L., Banovec P. Poro~ilo o poteku projekta SIMIS – Sistem integralnega monitoringa na pore~ju So~e, Interreg IIIB, UL, FGG, Ljubljana, 2006.
7. Supej, B, Kova~i~, B. Tehnologija LIDAR pri planiranju, projektiranju, vzdr`evanju in upravljanju vodotokov. 17. Mi{i~ev vodarski dan 2006, Maribor, str. 183-188, 2007.
8. [umrada, R. Strukture podatkov in prostorske analize. UL, FGG, Ljubljana, 2005.
9. US Army Corps of Engineers; Hydrologic Engineering Center. Susquehanna River Flood Warning and Response system. Davis, CA, www.nap.usace.army.mil/GIS/fwrs.htm , 2003
10. ZVSS (Zveza vodnih skupnosti Slovenije), Vodnogospodarske osnove Slovenije, 1978, na: http://vodomet.fgg.uni-lj.si/KMTe

