

VIŠINSKA RAZLIKA DO NAJBЛИŽJEGA VODOTOKA (HAND) – PODATKI ZA SLOVENIJO

dr. Nejc Čož

ZRC SAZU, Inštitut za antropološke in prostorske študije

nejc.coz@zrc-sazu.si, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6050-0929>

DOI: https://doi.org/10.3986/9789610506683_09

UDK: 528.7:556.53(497.4)

IZVLEČEK

Višinska razlika do najbližjega vodotoka (HAND) – podatki za Slovenijo

Pripravili smo normaliziran digitalni model višin (HAND) na območju Slovenije. Model HAND je izračunan iz digitalnega modela višin in hidrografske mreže. Vsaka točka HAND-a predstavlja višinsko razliko med poljubno točko površja in hidrološko najbližjo točko odtoka. Model je bil prvotno razvit za namene kartiranja poplavne ogroženosti, vendar se je izkazal za uporabnega v širšem spektru hidroloških aplikacij, kot so napovedovanje suše, erozija tal in določanje virov podzemnih voda. Za izračun HAND-a smo se poslužili odprtokodnega programa TauDEM in programskega jezika Python. Slovenski HAND smo izračunali za strojno učenje modela za zaznavo suše, kjer je bil uporabljen kot pomožni podatkovni sloj. Testni rezultati so pokazali, da je HAND pripomogel k izboljšanju natančnosti modela.

KLJUČNE BESEDE

HAND, digitalni model višin, relativni model višin, hidrologija, poplave, suša

ABSTRACT

Height Above Nearest Drainage (HAND) – dataset for Slovenia

We have created the Height Above Nearest Drainage (HAND) dataset for Slovenia. HAND is a simple terrain metric calculated from a digital elevation model and a stream network. Each point of a HAND grid represents a vertical distance to the hydrologically nearest drainage point. The metric was initially developed for flood risk mapping purposes, however, it has become a useful indicator for many other water-related studies, including drought analysis, soil erosion, and delineation of groundwater resources. The computations were performed in Python and with open-source software TauDEM. The dataset was created to aid in the training of our drought detection model. The inclusion of HAND has shown promising results during the initial test runs of the drought model.

KEY WORDS

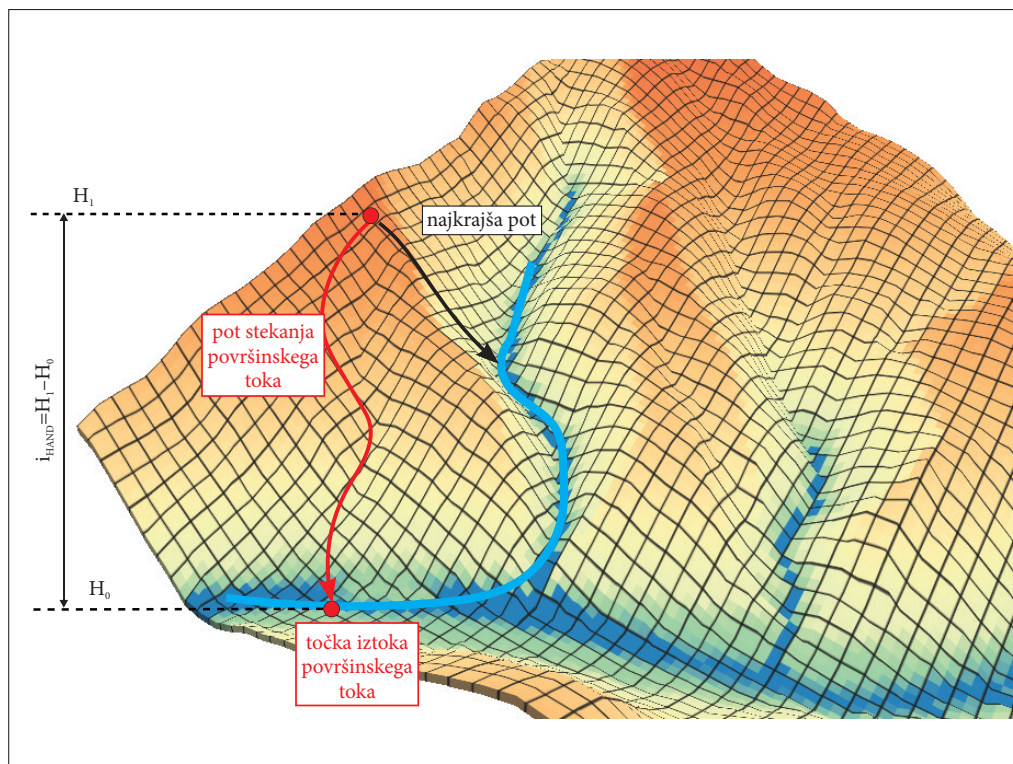
HAND, digital elevations model, relative elevations model, hydrology, floods, drought

1 Uvod

Prostorski podatki so pomemben vir za razumevanje hidroloških pojavov. Kljub temu, da se hidrološki procesi odvijajo na ravni širših geografskih območij, je večina hidroloških meritev opravljena točkovno (meteorološke postaje, vodomerne postaje). V zadnjih desetletjih se je dostopnost in kakovost (prostorska ločljivost posnetka, pogostost zajema, ipd.) podatkov daljinskega zaznavanja močno povečala. Uporaba satelitskih posnetkov, aerolaserskega skeniranja (ALS) in drugih neinvazivnih senzorjev je močno pripomogla k premostitvi tega problema ter omogočila razvoj novih metod za razumevanje prostorsko variabilnih hidroloških procesov (Blöschl s sodelavci 2019).

Eden glavnih hidroloških podatkovnih slojev je digitalni model (nadmorskih) višin (DMV), pridobljen z uporabo ALS. Lastnosti površinskega in podzemnega vodnega toka so neposredno povezane s fizičnimi lastnostmi površja. Smer vodnega toka je odvisna od gradienta potencialne energije, ki se ga določi na podlagi višinskih razlik med vrednostmi sosednjih točk. Na podlagi DMV-ja je tako možno opisati in razložiti dinamiko hidroloških procesov. Za reliefne podatke je značilno, da dobro korelirajo s hidrološkimi lastnostmi tal, kot sta zasičenost zemljin in tok podzemnih voda. Konkavna in nižje ležeča območja, kot je na primer dno rečne doline, so značilno podvržena visoki stopnji zasičenosti zemljine, medtem ko so višje ležeča območja z višanjem nadmorske višine progresivno bolj suha (Nobre s sodelavci 2011).

Rennó s sodelavci (2008) so razvili povsem nov normaliziran model višin, katerega cilj je možnost enoznačne primerjave hidroloških lastnosti različnih reliefnih tipov. Angleško ime modela je *Height Above Nearest Drainage* (HAND), kar lahko prevedemo v digitalni model višinskih razlik od najbližjega



Slika 1: Shematski prikaz izračuna HAND-a.

vodotoka. HAND je relativni model višin, katere so definirane kot višinska razlika med izbrano točko površja in koto gladine vodotoka v točki kamor se izteka njen površinski tok. Točka iztekanja površinskega toka ni nujno enaka geometrijsko najkrajši poti do vodotoka, kar je razvidno iz slike 1.

HAND je izračunan neposredno iz DMV-ja, za boljšo natančnost pa je priporočljivo upoštevati tudi podatke pripadajoče hidrografske mreže. Vrednosti modela tako ne prikazujejo več absolutnih vrednosti nadmorskih višin, temveč relativno vertikalno oddaljenost od hidrološko najbližjega vodotoka (slika 1). Ta lastnost je neposredno povezana s poplavljanjem, saj je ob znani informaciji najvišje kote visokih voda možno hitro in enostavno oceniti obseg poplavljenega območja. Ker so višine pogojene z smerjo površinskega odtoka, je tak način določanja poplavljenosti že a priori bolj natančen od statične metode, kjer je poplavno območje definirano s presekom kote visokih voda z lokalnim reliefom (Nobre in sod., 2016). V kombinaciji s pretočnimi krivuljami lahko hitro in enostavno izdelamo karte poplavne ogroženosti. Takšen pristop sicer ne dosega natančnosti kompleksnejših metod (npr. 2D/3D hidrodinamično modeliranje, 1D Saint-Venantove enačbe), vendar pa predstavlja enostavno in poceni rešitev za kartiranje poplavnih dogodkov v realnem času, kar je vedno v interesu reševalnim službam (Scriven in sod., 2021). Na podlagi evropske poplavne direktive iz leta 2007 (Direktiva, 2007) imamo v Sloveniji izdelan »Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije...« (Pravilnik, 2007), na osnovi katerega je bila leta 2018 izdelana Opozorilna karta poplav, ki podaja oceno poplavne ogroženosti na ravni države in je v lasti Ministrstva za okolje in prostor, Direkcija Republike Slovenije za vode. Pristop z uporabo HAND-a v Sloveniji zato ni toliko zanimiv iz vidika poplav, saj so omenjene karte poplavne ogroženosti natančnejše, ker so pripravljene s kompleksnejšimi metodami.

Kljub temu, da se HAND večinoma uporablja za analizo poplavne ogroženosti, se v literaturi najdejo tudi drugačne aplikacije modela. Med drugim je bil HAND uporabljen v kombinaciji s podatki Landsat 8 za določitev virov podzemne vode na območju gorovja Atlas v Maroku (Hamdani in Baali 2019). HAND je pripomogel k uspešnemu razločevanju med štirimi različnimi površinskimi tipi (ravinska močvirja, visokogorska mokrišča, pobočja in planote) in je bil posledično vključen v večparameterski odločitveni GIS model. Na podlagi HAND-a so izdelali tudi karti prsti in vegetacije za distribuiran hidrološki model (Cuartas s sodelavci 2012). Z modelom so simulirali vsebnost vlage v zemljini, nivo podzemne vode in podzemni pretok v porečju Amazonke. Validacija s terenskimi meritvami je potrdila, da je HAND primeren indikator prostorske porazdelitve hidroloških parametrov, kot so evapotranspiracija, zasičenost zemljine, slabše pa se je izkazal pri napovedi gladine in toka podzemnih voda v mokrih obdobjih. Olorunfemi s sodelavci (2020) so uporabili HAND za določitev območij, ki so potencialno podvržena eroziji zemljine.

V našem primeru smo HAND izračunali za potrebe določanja suše iz satelitskih posnetkov. Naš model za določanje sušnega stanja je v času tega pisanja še v razvoju zato rezultati niso predmet te objave ampak zgolj metode. Temelji na metodah strojnega učenja, kot so odločitveno drevo in nevronske mreže, pri katerih so vključeni trije tipi podatkov – satelitski posnetki Sentinel-2 z več spektralnimi kanali in z izpeljanimi indeksi, meteorološke in talne meritve ter konstantne podatke o terenu, med katere sodi tudi HAND.

2 Metode dela in podatki

HAND indeks smo izračunali za območje celotne Slovenije. Hidrološko je Slovenija razdeljena na šest območij: porečja Save, Drave, Mure in Kolpe ter povodji Soče in jadranskih rek. HAND se lahko izračuna ločeno za vsako porečje posebej, saj je v izbranem območju odvisen zgolj od pripadajoče hidrografske mreže. Zaradi raznolikosti površja – tu je mišljen predvsem kraški svet – izdelava HAND-a ni bila enostavna in je potekala v iterativnih korakih. V kolikor je bila v končnem rezultatu zaznana lokalna anomalija, smo na izbranem območju temeljito pregledali podatke DMV-ja in vektorske hidrografske

sloje. Zaznane napake so bile v večini primerov posledica nenatančne klasifikacije vodotokov hidrografske mreže. Ob izločevanju nepotrebnih elementov je tako prišlo do napak, kot so prekinjena os vodotoka ali prekinjena povezava med vodotokom in točko ponora. Pred vsako novo iteracijo so bili vhodni podatki ročno popravljeni.

Kot vhodni podatek za izračun HAND-a potrebujemo zgolj DMV izbranega območja in pripadajočo hidrografsko mrežo. Proces izračuna, prikazan na Sliki 2a, je v grobem razdeljen na štiri sklope: (i) predpriprava vhodnih podatkov; (ii) hidrološko pogojevanje (ang. *hydrological conditioning*) DMV-ja; (iii) definiranje mreže vodotokov in (iv) izračun HAND-a. Predpriprava vhodnih podatkov je obsegala filtriranje vektorskih slojev in njihovo rasterizacijo ter manjše ročne popravke DMV-ja. Hidrološko pogojevanje DMV-ja je obsegalo polnjenje kotanj in odstranjevanje ovir na vodotokih, s čimer je bilo zagotovljeno koherentno stekanje površinskega toka. Pri tem so bile zapolnjene vse kotanje, ki niso vsebovale ponorov in stalnih vodotokov hidrografske mreže, kar vključuje tudi veliko vrtač na kraških površjih. Določitev HAND-a na kraških površjih je vprašljiva tudi zaradi ponikalnic, saj je HAND določen na podlagi gladin površinskih voda. Natančnost HANDA se močno poveča, če njegov izračun omejimo na manjša zaključena prispevna območja, z enotnimi površinskimi lastnostmi, pri čimer lahko uporabimo modele s še večjo prostorsko ločljivostjo. V našem primeru smo se kljub temu odločili za izdelavo HAND-a na državni ravni, saj nam bo služil predvsem kot pomožni podatek in približni indikator prisotnosti vode na površju, pri čimer se zavedamo omenjenih pomanjkljivosti modela.

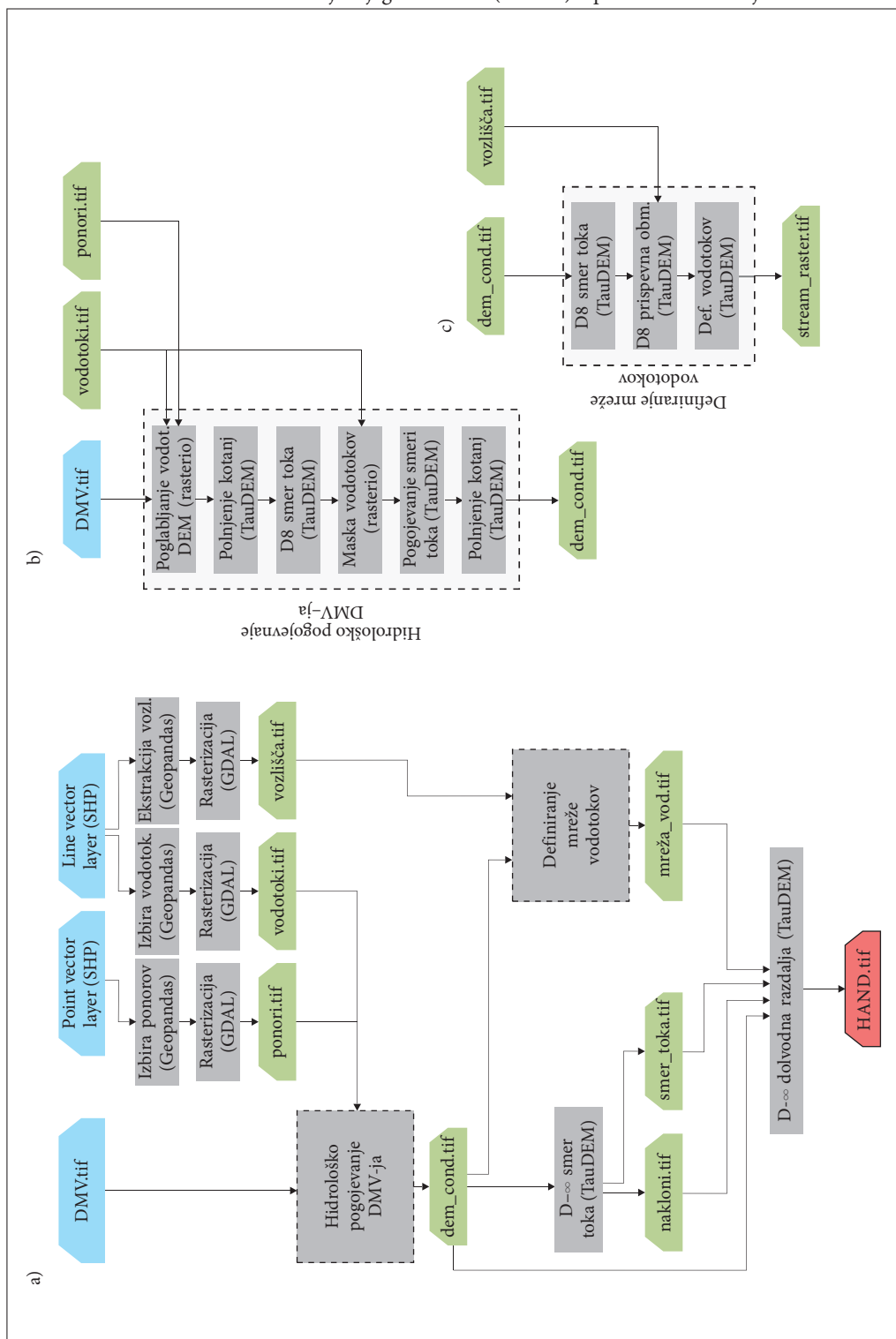
Z uporabo hidrografskih podatkov je bila nato definirana mreža vodotokov, ki je služila kot referenca za izračun normaliziranih višin. Končni rezultat predstavljenega postopka je državni HAND – model višin, normaliziran na slovensko hidrografsko mrežo s koherentnimi smermi površinskega odtoka.

Za pripravo HAND-a na državni ravni smo uporabili 10 m digitalni model reliefa (DMR), kar v našem primeru pomeni DMV pri katerem so bile odstranjene stavbe in vegetacija. DMR je bil izdelan z uporabo orodja LAsTools neposredno iz oblaka točk, javno dostopnega preko portala eVode. HAND produkt ima enako ločljivost kot vhodni DMR, s čimer smo dosegli veliko boljše natančnost kot pri globalnem HAND-u, ki temelji na 30 m SRTM (ang. *Shuttle Radar Topography Mission*) modelu višin (Donchyts s sodelavci 2016). Povprečna višinska natančnost slovenskega DMR-ja se giblje med 50 cm pri splošni topografiji manjše rečne struge, do 5 cm na odprtih, ravnih površinah (Triglav Čekada in Bric 2015).

Mreža vodotokov je lahko razmejena neposredno iz DMR-ja z določitvijo linij stekanja površinskih voda (Nobre s sodelavci 2011). V tem primeru je potrebno določiti točke začetka vodotoka na podlagi največje akumulacije površinskega toka. Ta točka je odvisna tako od hidrogeoloških značilnosti porečja, kot od časovnih variacij padavin (Papageorgaki in Nalbantis 2018), in jo je za reliefno razgibano območje, kot je slovensko, težko enoznačno določiti. Takšna metoda se je izkazala za učinkovito pri izdelavi globalnega HAND-a (Donchyts s sodelavci 2016), v našem primeru pa smo se, za izboljšanje natančnosti, odločili za uporabo vektorskega hidrografskega sloja.

Pri definiranju hidrografske mreže sta bila uporabljena dva vektorska sloja – linijski podatkovni sloj površinskih voda in točkovni sloj hidrografije. Linijski sloj vsebuje površinske vode zajete z linijskimi elementi, ki potekajo po središčni osi različnih tipov površinskih voda, kot so struge vodnega toka, kanali, akumulacijska jezera, melioracijski jarki, itd. in so dostopni na javnem spletnem portalu eVode. Za določitev referenčne mreže vodotokov smo iz linijskega sloja obdržali zgolj elemente klasificirane kot stalen vodotok, izmed teh pa izločili vse vodotoke tipa obcestni jarek, objekt (kanal) za posebno rabo vode in padavinski jarek. S tem smo izločili povirja, suhe struge, umetne kanale in ostale elemente hidrografske mreže, ki za izračun HAND-a niso relevantni. Izdelali smo tudi točkovni sloj, ki je razdelil vodotoke na odseke in je bil kasneje uporabljen za definiranje prispevnih območij.

Slika 2: (a) Potek izračuna modela višin, normaliziranega na hidrografsko mrežo (HAND – Height Above Nearest Drainage). (b) Podrobnejši potek izdelave hidrološko pogojenega DMV-ja. (c) Podrobnejši potek definiranja referenčne mreže vodotokov. ► (str. 123)



Točkovni sloj vsebuje elemente hidrografije, ki so zajeti s točkovno geometrijo, kot so npr. slap, izvir, ponor, jez, zapornica, stopnja, itd.. Iz točkovnega sloja smo uporabili zgolj ponore, ki smo jih še dodatno filtrirali. Obdržali smo samo ponore, ki se nahajajo na skrajno dolvodni točki stalnih vodotokov. Ponori na suhih strugah so namreč povzročali lokalne anomalije v obliki večjih območij z nedefiniranimi HAND vrednostmi. Ponori so še posebej pomembni za natančno določitev odtoka na območjih s kraškim površjem, kjer mreža vodotokov ni zvezna, s čimer je določitev koherentne poti površinskega odtoka otežena.

Izdelava HAND-a v celoti temelji na prosto dostopnih programskih orodjih. Postopek priprave teče v programskem jeziku Python, posamezni vmesni izdelki pa so narejeni s Pythonovimi knjižnicami GDAL, Geopandas in Numpy ter zbirko orodij TauDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*). Slednja je, kot je razvidno že iz izvirnega imena, zbirka funkcij za pridobivanje in analizo hidroloških informacij iz rastrskih reliefnih podatkov v obliki DMR, kot so izračun smeri površinskega odtoka, akumulacija površinskega toka, razmejitev porečij, določitev mreže vodotokov, odstranitev kotanj, ipd. (TauDEM 2016).

V predpripravo vhodnih podatkov sodi rasterizacija vseh vektorskih slojev v binarne maske, ki so potrebne za obdelavo samega DMR-ja. Temu sledi priprava hidrološko pogojenega modela višin, ki je izvedena v več korakih (Slika 2b). Hidrografski podatki iz vektorskega sloja so »zapečeni« v DMR, s čimer pripomorejo k bolj natančni določitvi poti vodotokov. Temu sledi odstranjevanje kotanj in določitev smeri površinskega odtoka, iz kateri se izbere samo piksle, ki se nahajajo v strugi vodotoka. Tako pridobljena mreža vodotokov (s smermi površinskega odtoka) predstavlja vhodni podatek za funkcijo *Flow Direction Conditioning* (TauDEM), ki zagotovi, da so vrednosti višin v dolvodni smeri vodotoka vedno padajoče. Pri tem so pomembne samo smeri toka in ne dejanske višine zapisane v rastru. Kot rezultat dobimo hidrološko pogojen DMR brez nezaželenih artefaktov (nasipi, mostovi, ipd.), ki so preprečevali zveznost poti vodotokov.

Naslednji korak je priprava referenčne hidrografske mreže, na podlagi katere je možno določiti točke površja, katerih površinski tok odteka v posamezne točke hidrografske mreže (Slika 2c). Hidrološko pogojen DMR je uporabljen za izračun smeri površinskega odtoka (TauDEM - *D8 Flow Direction*), iz katerih so, v kombinaciji s točkami odsekov vodotoka, določena vplivna območja posameznih odsekov (TauDEM - *D8 Contributing Area*). Referenčno hidrografsko mrežo dobimo z uporabo funkcije za določitev vodotokov (TauDEM - *Stream Definition By Threshold*).

Iz hidrološko pogojenega DMR-ja nato pridobimo še naklone površja in raster smeri površinskega odtoka izračunanega po t.i. metodi neskončnih smeri (ang. *direction-infinity* oz. *D-infinity method*). Vsi štirje vmesni produkti (hidrološko pogojen DMR, nakloni, smeri toka, referenčna mreža vodotokov) so vhodni podatki za zadnjo procesno funkcijo *D-infinity Distance Down* (TauDEM), katere rezultat je končni HAND model višin.

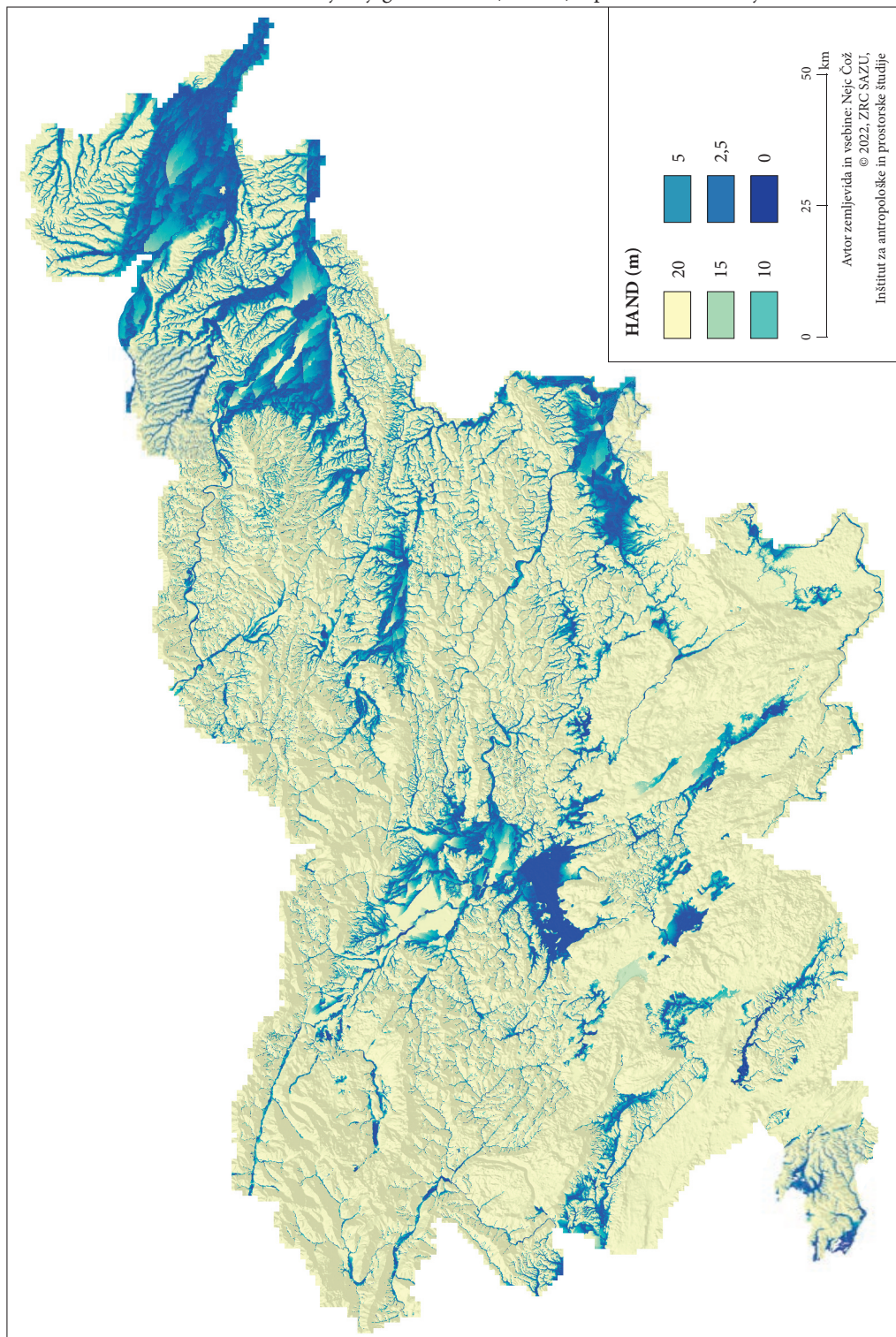
3 Rezultati in razprava

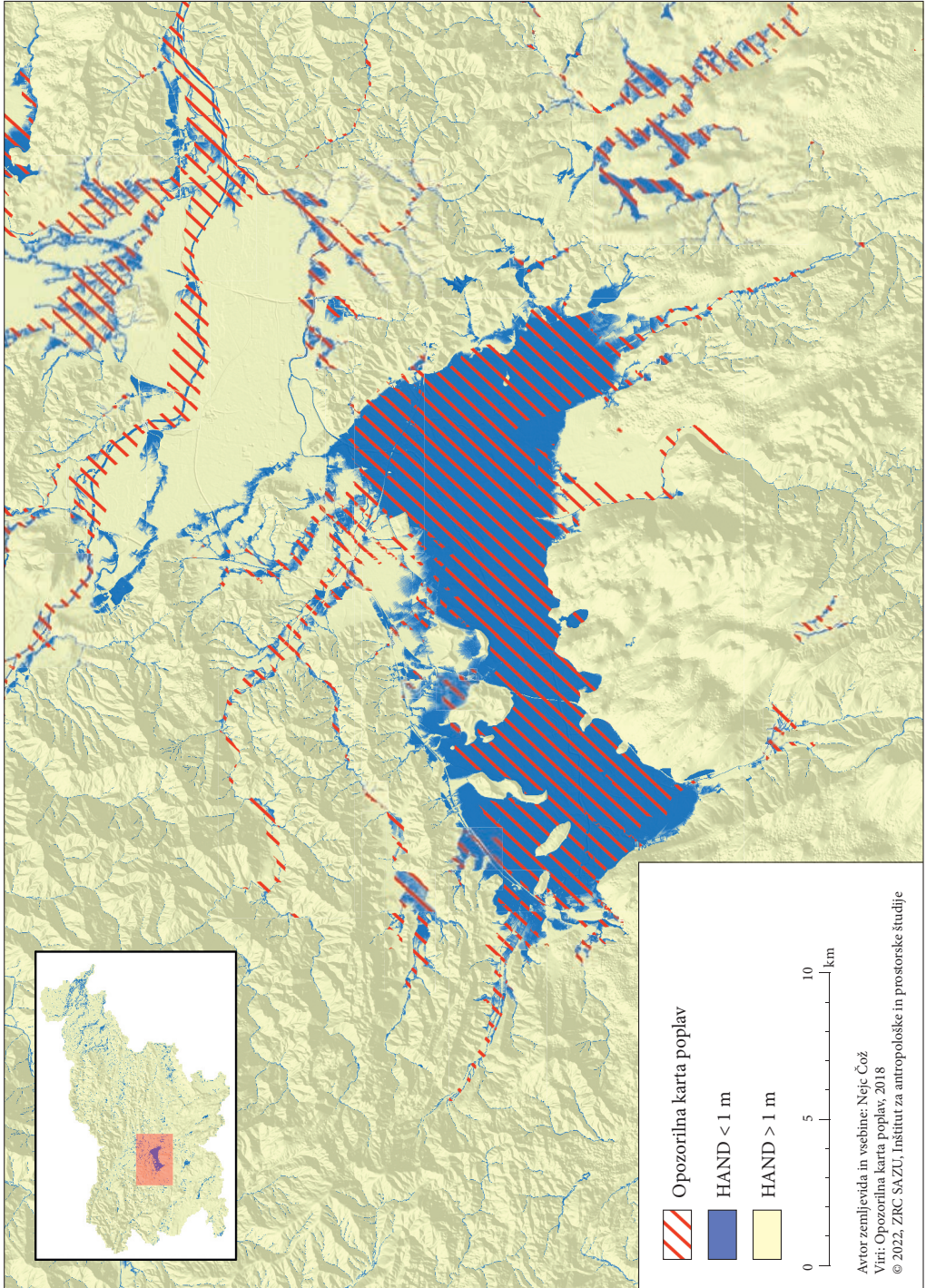
Izdelani HAND na območju Republike Slovenije v 10-metrski prostorski ločljivosti je prikazan na Sliki 3. Vrednosti HAND-a smo združili v 6 razredov, pri čimer je poudarek na nižjih vrednostih, saj so te najbolj zanimive z vidika hidroloških procesov. Velik delež površja Slovenije je visoko nad gladino vodotokov, kar se kaže v visokih vrednostih HAND-a (območja obarvana rumeno). Nižje vrednosti HAND-a pričakovano sledijo strugam glavnih vodotokov in se raztezajo po pretežno ravninskih predelih države. V visokogorjih in kraških pokrajinah so izrazite »rumene lise«, ki nakazujejo obsežnejša

Slika 3: Zemljevid HAND-a na območju Slovenije, prikazan na reliefu. ► (str. 125)

Slika 4: Primerjava HAND-a z opozorilno karto poplav na območju Ljubljanskega barja. Prikazane so HAND vrednosti med 0 in 1 m, ter območje zelo redkih poplav. ► (str. 126)

Višinska razlika do najbližjega vodotoka (HAND) – podatki za Slovenijo





območja z visokimi vrednostmi HANDA-a. Za oba omenjena pokrajinska tipa je značilno suho površje – v prvem zaradi strmih naklonov, v drugem zaradi prepustnega površja z veliko ponikalnicami – kar se ujema s predpostavko, da visoke vrednosti HAND-a nakazujejo območja s pretežno suhim površjem.

Več kot 73 % površja Slovenije ima HAND večji od 20 m, kar 85 % pa večjega od 5 m. Ta območja so torej 20 m oz. 5 m nad normalno gladino mreže vodotokov, zato lahko z visoko gotovostjo ocenimo, da so varna pred poplavljanjem v primeru visokih voda. Poplavno bolj ogrožena območja, z vrednostjo HAND-a 1 m ali manj, predstavljajo manj kot 7 % celotnega ozemlja Slovenije. Kljub temu, da je odstotek površja države z nizkimi vrednostmi HAND-a majhen, pa ta območja obsegajo večino urbanih središč in območij z večjo gostoto poselitve. Na Sliki 4 je, na primeru Ljubljanskega barja, predstavljena primerjava rezultatov modela HAND z opozorilno karto poplav (2018). HAND v vrednostih manjših od 1 m zadovoljivo sovpađa z območjem zelo redkih poplav iz opozorilne karte, ki vključuje poplave s povratno dobo 50 ali več let. Kljub dobremu ujemanju je potrebno poudariti, da HAND ne služi natančnemu določanju poplavljenih območij, ampak služi zgolj kot enostaven indikator. DMV je statičen podatek, karte poplavne ogroženosti pa so rezultat kompleksnih hidrodinamičnih modelov, ki poleg samega reliefa upoštevajo tudi tip površja (koeficient hrapavosti) in hidrograme vodotokov.

Izdelani HAND smo preliminarno uporabili tudi pri treniranju modela strojnega učenja za določanje sušnega stanja. Poleg satelitskih posnetkov Sentinel-1 in Sentinel-2 ter meteoroloških meritev, je bil HAND uporabljen kot eden od pomožnih nespremenljivih podatkov o terenu. Ker je model zaznave suše v času priprave prispevka še v razvojni fazi, uvid v končne rezultate še ni mogoč ampak zgolj kratek povzetek v metode in uporabljene podatke. Učne vzorce smo pripravili na ravni kmetijskih zemljišč (GERK-ov), referenčne podatke o suši za leto 2017 pa smo pridobili neposredno iz Agencija RS za kmetijske trge in razvoj podeželja. Prvi rezultati testiranja so bili vzpodbudni, pri čimer smo se na začetku omejili zgolj na koruzna polja, saj je koruza predstavljala poljščino z eno od najštevilčnejših pojavnosti in s tem zagotavlja zadostno število vzorcev.

4 Sklep

Opisali smo postopek za izdelavo relativnega modela višin, normaliziranega na mrežo vodotokov in prikazali rezultat na območju Republike Slovenije. Podrobno smo opisali njegove lastnosti in na podlagi končnega produkta izpostavili njegovo uporabnost za ocenjevanje poplavne ogroženosti in napovedovanje suše. Za uporabo na državnem nivoju je zadostoval DMR z desetmetrsko ločljivostjo. Z drugimi dostopnimi podatki je mogoče izdelati model tudi v višji ločljivosti (npr. 1 m), kar bi bilo še posebej uporabno pri analizah območij manjše površine, na primer na nivoju naselij ali na ravni manjšega porečja. V prihodnosti želimo izkoristiti vsestranskost HAND-a za hidrološke analize in ga uporabiti na relevantnih raziskovalnih področjih.

ZAHVALA: Prispevek je nastal s finančno podporo Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v okviru raziskovalnega programa št. P2-0406 Opazovanje Zemlje in geoinformatika in temeljnega raziskovalnega projekta številka J6-9395 Opazovanje suše v visoki ločljivosti z modeliranjem talnih in satelitskih podatkov. Hvala recenzentom za konstruktivne komentarje.

5 Viri in literatura

Blöschl, G., Bierkens, M. F. P., Chambel, A., Cudennec, C., in sod. 2019: Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal* 64 (10): 1141–1158. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507>

- Cuartas, L. A., Tomasella, J., Nobre, A. D., Nobre, C. A., Hodnett, M. G., Waterloo, M. J., de Oliveira, S. M., von Randow, R. de C., Trancoso, R. and Ferreira, M. 2012: Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. *Journal of Hydrology* 462–463: 15–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.047>
- Direktiva 2007: Direktiva 2007/60/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 23. oktobra 2007 o oceni in obvladovanju poplavne ogroženosti (Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks). *Official Journal of the European Union*, L 288/27, 27–34. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj> (Pridobljeno 25. 2. 2022).
- Donchyts, G., H., Winsemius, J., Schellekens, T., Erickson, H., Gao, H., Savenije and N. van de Giesen. 2016: Global 30m Height Above the Nearest Drainage. *Eguga* 18 (April): EPSC2016-17445. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3956.8880>
- Hamdani, N. and Baali, A. 2019: Height Above Nearest Drainage (HAND) model coupled with lineament mapping for delineating groundwater potential areas (GPA). *Groundwater for Sustainable Development* 9 (July): 100256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100256>
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M. and Saleska, S. 2011: Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology* 404 (1–2): 13–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Momo, M. R., Severo, D. L., Pinheiro, A. and Nobre, C. A. 2016. HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. *Hydrological Processes* 30 (2): 320–333. DOI: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.10581>
- Olorunfemi, I. E., Komolafe, A. A., Fasinnirin, J. T., Olufayo, A. A. and Akande, S. O. 2020: A GIS-based assessment of the potential soil erosion and flood hazard zones in Ekiti State, Southwestern Nigeria using integrated RUSLE and HAND models. *CATENA* 194 (May): 104725. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104725>
- Papageorgaki, I. and Nalbantis, I. 2018: On Spatio-Temporal Modelling of Stream Network Initiation. *Environmental Processes* 5 (S1): 239–257. DOI: <http://link.springer.com/10.1007/s40710-018-0338-z>
- Pravilnik 2007: Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (Rules on methodology to define flood risk areas and erosion areas connected to floods and classification of plots into risk classes). *Uradni list RS*, št. 60. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV8318> (Pridobljeno 25. 2. 2022).
- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J. and Waterloo, M. J. 2008: HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment* 112 (9): 3469–3481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018>
- Scriven, B. W. G., McGrath, H. and Stefanakis, E. 2021: GIS derived synthetic rating curves and HAND model to support on-the-fly flood mapping. *Natural Hazards* 109 (2): 1629–1653. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04892-6>
- TauDEM 2016: Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM) software for hydrologic terrain analysis and channel network extraction: <https://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/> (4. 3. 2021).
- Triglav Čekada, M., Bric, V. 2015: Končan je projekt laserskega skeniranja Slovenije. *Geodetski vestnik* 59 (3), 586–592.