

Prostorska porazdelitev erozivnosti padavin v Sloveniji

Sašo Petan*

Povzetek

V podporo kvantifikaciji erozijskih procesov oz. napovedovanju izgube tal v Sloveniji smo določili parametre regresijskih enačb za račun kinetične energije padavin, ki je izhodišče za določitev podnebnega dejavnika erozije tal oz. erozivnosti padavin v okviru metodologije (R)USLE. Pri tem smo izvajali meritve porazdelitve padavinskih delcev in intenzitete padavin na treh podnebnih območjih Slovenije. Končni cilj raziskave smo dosegli z izdelavo karte erozivnosti padavin Slovenije na podlagi določenih regresijskih enačb za račun kinetične energije padavin in dolgoletnih nizov podatkov o intenzitetah padavin, ki jih zbira Agencija Republike Slovenije za okolje na pluviografskih merilnih mestih po Sloveniji.

Uvod

Tla so zelo pomemben naravni vir. Njihova najpomembnejša lastnost je rodovitnost. Ta omogoča kopenskim bitjem pridobivanje življenjsko potrebnih snovi in energije iz tal. Rodovitnost in druge fizikalne, kemične in biološke lastnosti tal ogroža erozijo tal - govorimo o mehanski degradaciji tal zaradi delovanja naravnih sil (gravitacija, veter in padavine) in človekovih dejavnosti (npr. gradbeništvo, rudarstvo, turizem). Talni delci, ki so na zemeljskem površju, so nenehno podvrženi erozivnim silam. V naravni krajini z gostim vegetacijskim pokrovom, kot so gozdovi ali travniki, so tla pred erozijo dobro zaščitena. Človek s svojimi dejavnostmi spreminja naravno krajino že tisočletja. Na obdelovalnih površinah vegetacijo praviloma odstranimo, pridelke pospravimo, površine pa ostanejo gole in izpostavljene. Naravni erozijski procesi se tako pričnejo odvijati pospešeno. Govorimo o antropogeni eroziji, katere škodljive posledice se poznajo tudi na nekmetijskih površinah oz. ekosistemih. Erozijski nanos s kmetijskih površin vsebuje velike količine hranil in pesticidov. Dotok teh snovi v vodotoke, jezera in morja vpliva na kakovost voda in lahko povzroči porušenje biološkega ravnovesja z nepredvidljivimi posledicami. Zato ima pravilna ocena erozijskih procesov izjemen pomen pri preprečevanju in blaženju posledic erozije tal oz. degradacij okolja.

Poznavanje podnebnih oz. hidroloških razmer, oblikovanosti površja, fizikalnih lastnosti tal, pokrovnosti tal in človeških dejavnikov (Mikoš in Zupanc, 2000) so osnova za razumevanje erozijskih procesov. Eden najbolj pomembnih dejavnikov erozije tal je erozivnost padavin in površinskega odtoka (Mannaerts in Gabriels, 2000) in tudi glavnino erozije tal v Evropi povzroča voda (UNEP, 2002). Erozivnost padavin in površinskega odtoka je podnebni dejavnik, ki je najbolj natančno opredeljen v okviru široko uporabljene metodologije za izračun sproščanja tal USLE oz. RUSLE. Univerzalno enačbo izgube tal USLE (Universal Soil Loss Equation) sta razvila in podrobno opisala Wischmeier in Smith (1965, 1978) na podlagi dolgoletnih raziskav v ZDA. Osnovna ideja je bila razviti enostavno metodo za napovedovanje najbolj verjetnega povprečja letne izgube tal za potrebe gospodarjenja s kmetijskimi zemljišči. Renard in sod. (1997) so metodologijo USLE nekoliko osvežili in ji nadeli ime RUSLE (Revised USLE). Erozivnost padavin in

* UL FGG, Jamova 2, Ljubljana in Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, Ljubljana

površinskega odtoka je po (R)USLE odvisna od kinetične energije padavinskih dogodkov in pripadajoče maksimalne 30-minutne intenzitete padavin. Meritve kinetične energije padavin so glede na razširjenost meritev intenzitete padavin zelo redke (Mikoš in sod., 2006), saj šele novejša tehnologija omogočajo cenovno dostopnejše merilne instrumente.

Zato se kinetična energija padavin v praksi večinoma določa s pomočjo regresijskih enačb različnih oblik, ki podajajo odvisnost kinetične energije od intenzitete padavin in veljajo za specifično (podnebno) območje in interval intenzitet padavin.

V okviru raziskave sta bila zastavljena dva cilja: določiti parametre regresijskih enačb za račun kinetične energije padavin na treh podnebnih območjih Slovenije in izdelati karto erozivnosti padavin za območje Slovenije, ki bi služila kot izhodišče za določitev podnebnega dejavnika pri kvantifikaciji erozijskih procesov. Za doseg te ciljev smo opravljali meritve porazdelitve padavinskih delcev in intenzitete padavin. Upoštevali smo tudi podatke o intenzitetah padavin, ki jih zbira Agencija Republike Slovenije za okolje (v nadaljnjem besedilu: ARSO) na merilnih mestih po Sloveniji.

O metodologiji (R)USLE

Erozivnost padavin je podnebni dejavnik, ki je najbolj natančno opredeljen v okviru široko uporabljene metodologije (R)USLE za račun izgube tal. Osnovna enačba (R)USLE je bila zasnovana na podlagi poskusov, ki so bili opravljeni na standardni erozijski ploskvi USLE dolžine 22,1 m (in širine približno 4 m), naklona 9 %, neporaščeni in obdelani z oranjem v smeri padca pobočja. Takšne razmere, ki so pogojene z dimenzijami, naklonom, pokrovnostjo in obdelavo standardne ploskve USLE, v okviru metodologije (R)USLE imenujemo tudi standardne razmere. Enačba pa se glasi:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

pri čemer posamezne oznake pomenijo:

A - povprečna letna izguba tal na enoto površine [$t \text{ ha}^{-1}$],

R - dejavnik padavin in odtoka oz. erozivnost padavin [$\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$],

K - dejavnik erodibilnosti tal glede na standardne razmere [$t \text{ MJ}^{-1} \text{ h mm}^{-1}$],

L - dejavnik dolžine pobočja oz. razmerje med izgubo tal pri dejanski in standardni dolžini [-],

S - dejavnik naklona pobočja oz. razmerje med izgubo tal pri dejanskem in standardnem naklonu [-],

C - dejavnik pokrovnosti tal oz. razmerje med izgubo tal pri dejanski in standardni pokrovnosti [-] in

P - dejavnik zaščitnih (kmetijskih) ukrepov oz. razmerje med izgubo tal pri dejanski in standardni obdelavi oz. zaščiti zemljišča [-].

Vrednosti reaktivnih dejavnikov (*K*, *C* in *P*) načeloma razberemo iz predpisanih preglednic oz. grafikonov, aktivne dejavnike (*R*, *L* in *S*) pa praviloma izračunamo iz predpisanih enačb, za širša območja pa je lahko dejavnik *R* že določen v obliki kart. Erozivnost padavin *R* je definirana kot letno povprečje vsote produktov kinetične energije padavin *E* [MJ ha^{-1}], in maksimalne 30-minutne intenzitete padavin *I*₃₀ [mm h^{-1}] znotraj posameznih erozivnih dogodkov *ed*, ki so nastopili v daljšem časovnem obdobju trajanja *N* let (Renard in sod., 1997):

$$R = \frac{\sum_{ed} E \cdot I_{30}}{N} \quad (2)$$

Po metodologiji (R)USLE med erozivne dogodke ed štejemo vse deževne dogodke, pri katerih se je v šestih urah akumuliralo vsaj 12 mm padavin oz. v 15 minutah vsaj 6 mm padavin (Wischmeier in Smith, 1978).

Kinetično energijo padavin je težko meriti neposredno, zato se po navadi izračuna posredno iz meritev porazdelitve padavinskih delcev. Ker so bile v preteklosti te meritve razmeroma redke in do danes še niso doživele pravega razmaha, saj gre za aparature višjega cenovnega razreda, so se v preteklosti uveljavile empirične enačbe zasnovane na meritvah porazdelitve padavinskih delcev. Te enačbe podajajo specifično kinetično energijo padavin e kot funkcijo merjene intenzitete padavin I . Specifična kinetična energija padavin e je lahko podana v dveh oblikah: kot ploskovna gostota moči oz. energija na enoto časa in površinsko enoto e_A ali kot energija na površinsko enoto in enoto količine padavin e_B oz. količnik med ploskovno gostoto moči in intenziteto padavin. Tako lahko kinetično energijo E posameznega erozivnega dogodka oz. naliva izračunamo kot vsoto produktov specifične kinetične energije e_A in časa Δt intervala meritev intenzitete padavin I ali pa kot vsoto produktov specifične kinetične energije e_B in izmerjene višine padavin P_k v časovnem intervalu Δt . Pri tem je k število meritev oz. mnogokratnik intervala Δt v času erozivnega dogodka s trajanjem t :

$$E = \sum_k e_A \cdot \Delta t = \sum_k e_B \cdot P_k \quad (3)$$

Wischmeier in Smith (1958) sta na podlagi meritev, ki sta jih opravila Laws in Parsons leta 1943 v Washingtonu (ZDA), v metodologijo USLE vpeljala logaritmčno enačbo za račun specifične kinetične energije padavin e_B [$\text{MJ ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$]:

$$e_B = 0,1187 + 0,0873 \cdot \log_{10} I \quad (4)$$

pri čemer sta vrednost e_B omejila navzgor na $0,283 \text{ MJ ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ pri intenzitetah padavin I višjih od 76 mm h^{-1} . Pozneje sta Brown in Foster (1987) predlagala eksponentno enačbo za račun specifične kinetične energije padavin e_B , ki jo priporočajo tudi avtorji metodologije RUSLE (Renard in sod., 1997):

$$e_B = e_{\max} \cdot [1 - a \cdot \exp(-bI)] \quad \text{oz.} \quad (5)$$

$$e_B = 0,29 \cdot [1 - 0,72 \cdot \exp(-0,05I)] \quad (6)$$

Kadar gre I proti zelo visokim vrednostim (oz. neskončnosti) se specifična kinetična energija e_B asimptotično približuje vrednosti e_{\max} . Obratno, kadar gre I proti nič, pa e_B dobi končno pozitivno vrednost. Zato je oblika enačbe 5 superiorna analitična oblika za račun specifične kinetične energije (Renard in sod., 1997). Brown in Foster (1987) sta enačbo 6 izpeljala za jug ZDA. Sledilo jima je veliko avtorjev, ki so določili parametre enačbe 5 za druga (podnebna) območja po svetu.

Meritve porazdelitve padavinskih delcev

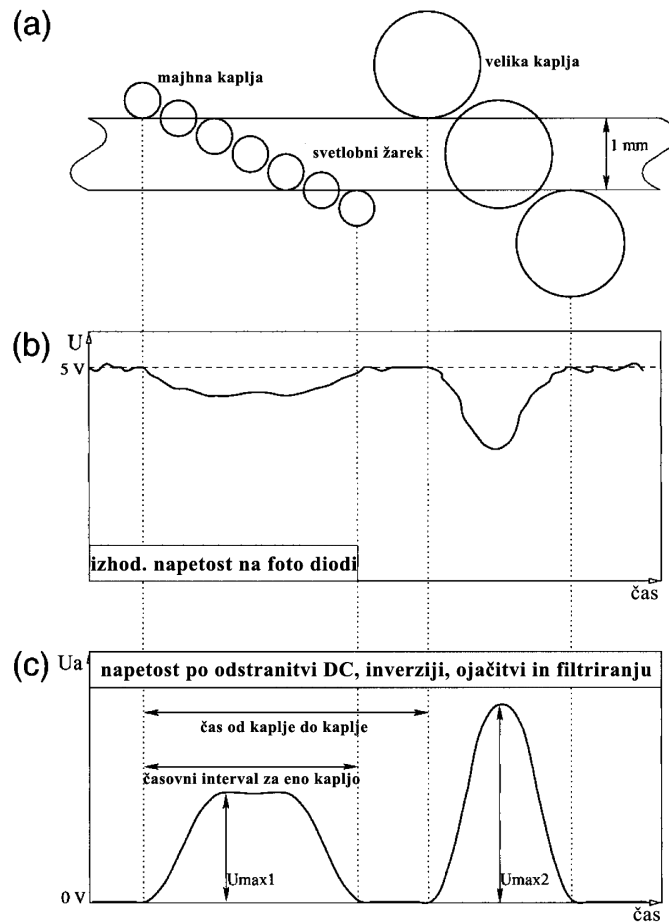
Tudi eden naših ciljev je bil ta, da določimo $KE-I$ funkcijske povezave oz. parametre (e_{\max} , a in b) eksponentne enačbe 5 za tri podnebna območja Slovenije. V ta namen smo v času med decembrom 2007 in julijem 2009 opravljali meritve porazdelitev padavinskih delcev z optičnimi disdrometri proizvajalca OTT (Slika 1) na treh merilnih mestih: v Bovecu, Ilirski Bistrici in Ljubljani. V podporo tem meritvam smo istočasno opravljali meritve intenzitete padavin s tehtalnimi dežmeri (Bovec in Ilirska Bistrica) oz. z dežemerom s prekucnikom (Ljubljana).

Optični disdrometer je v splošnem sestavljen iz naslednjih elementov: oddajne glave, sprejemne glave in elektronskega vezja s komunikacijskimi vrati. Bistveni element v oddajni glavi je IR-laserska dioda, ki oddaja svetlobni žarek, usmerjen proti sprejemni glavi, kjer leži fotodioda. Ob prehodu padavinskega delca skozi svetlobni žarek površine 54 cm^2 pride do zatemnitve na fotodiodi in posledično zmanjšanja izhodne napetosti (Slika 2). Izhodni signal na fotodiodi analizira programska oprema instrumenta: iz amplitude oslabiljenega signala instrument ugotovi velikost padavinskega delca, iz časa trajanja oslabiljenega signala pa hitrost padanja delca (Löffler-Mang in Joss, 2000). Algoritem instrumenta, ki vsebuje tovarniške kalibracijske parametre, izračuna ekvivalenten premer padavinskega delca krogelne oblike oz. premer ekvivolumetrične krogle in ne dejanske širine padavinskega delca (Thies Clima, 2006). Vsi veljavni padavinski delci, ki jih instrument zazna v izbranem merilnem koraku (praviloma 1 minuta), se nato razvrstijo v velikostne (32 razredov na intervalu med 0,2 in 25 mm) in hitrostne (32 razredov na intervalu med 0,2 in 20 m s^{-1}) razrede. Iz porazdelitve padavinskih delcev instrument prepozna vrsto padavin, izračuna intenziteto padavin (z ločljivostjo $0,001 \text{ mm h}^{-1}$ na intervalu do 1200 mm h^{-1}) in radarsko odbojnost. Vse podatke instrument sestavi v podatkovni telegram, ki ga po preteku merilnega koraka samodejno pošlje na izhode instrumenta.



Slika 1: Optični disdrometer OTT na meteorološki postaji Bovec Letališče (Fotografija: Sašo Petan)

Proizvajalec disdrometra v tehničnih navodilih ne omenja točnosti disdrometra pri merjenju hitrosti padavinskih delcev, vendar Löffler-Mang in Joss (2000) navajata, da je točnost merjene hitrosti padavinskih delcev 25 % oz. 5 % za delce s premerom 0,3 mm oz. 5 mm.



Slika 2: Princip delovanja disdrometra (prirejeno po Löffler-Mang in Joss, 2000)

Opredelitev parametrov regresijskih enačb za račun kinetične energije padavin

Merjene podatke o porazdelitvi padavinskih delcev (meritve DSD) smo najprej filtrirali, saj je šlo za 1-minutne podatke iz disdrometriških meritev s trajanjem vsaj enega leta. Upoštevali smo samo deževne dogodke (brez sneženja), ki so dosegli skupno višino padavin vsaj 6 mm. Pri tem je bila višina padavin izračunana iz 1-minutnih intenzitet padavin $I(dt)$, ki so jih disdrometri sporočali v podatkovnih telegramih. V nadaljevanju smo iz obravnave izločili tudi vse 1-minutne meritve, pri katerih je bila intenziteta padavin $I(dt)$ nižja od $0,1 \text{ mm h}^{-1}$, da bi se izognili velikim napakam pri nadaljnjih računih zaradi nezanesljivosti instrumentov pri nizkih intenzitetah padavin. Za spodnjo mejo višine padavin pri določitvi erozivnih dogodkov smo izbrali 6 mm in ne 12 mm, kot je predpisano v (R)USLE, z namenom, da zaobjamemo tudi tiste deževne dogodke, ki niso med najbolj intenzivnimi (vsaj 6 mm v 15 minutah), a prispevajo primerljiv delež k bilanci kinetične energije padavin.

Pri računu intenzitete padavin $I(dsd)$ in specifične kinetične energije padavin $KE(dsd)$ (v smislu e_A) iz meritev DSD nismo upoštevali zaznanih padavinskih delcev s premerom večjim od 7 mm. S tem smo zmanjšali vpliv merskih napak pri disdrometrih, ki nastopijo ob hkratnem prehodu dveh ali več padavinskih delcev skozi svetlobni žarek oz. merilno površino. V takšnih primerih disdrometer zazna en velik padavinski delec in tako meri previsoke vrednosti maksimalnih intenzitet padavin (Lanzinger in sod., 2006). Meja 7 mm

pa je bila izbrana zato, ker se v svetovni literaturi za največje dežne kaplje, ki so še zmožne padati, ne da bi se razdelile v več manjših, navajajo vrednosti med 6 in 8 mm (Mason, 1978; Glickman, 2000; Fujiyoshi in sod., 2008, van Mook, 2002). Tako smo izključili tudi morebitna zrna toče.

Intenziteta padavin $I(dsd)$ [mm h^{-1}] je bila izračunana kot vsota volumnov padavinskih delcev iz vseh veljavnih (< 7 mm) velikostnih razredov i znotraj porazdelitve padavinskih delcev. Pri tem smo upoštevali simetrično krogelno obliko padavinskih delcev, ki so v časovnem intervalu s trajanjem Δt (1/60 h) prešli skozi merilno površino disdrometra F [mm^2]:

$$I(dsd) = \frac{\pi}{6F\Delta t} \cdot \sum_i n_i \cdot \frac{1}{D_{b,i} - D_{a,i}} \cdot \int_{D_{a,i}}^{D_{b,i}} D_i^3 dD \quad (7)$$

Pri tem je n_i [-] število zaznanih padavinskih delcev znotraj velikostnega razreda i , D_i [mm] pa premer padavinskega delca znotraj velikostnega razreda i , ki je omejen na intervalu med $D_{a,i}$ do $D_{b,i}$. Specifična kinetična energija $KE(dsd)$ [$\text{J m}^{-2} \text{h}^{-1}$] je bila za vsak časovni interval s trajanjem Δt izračunana na dva načina. Pri prvem izračunu oz. pri računu $KE_1(dsd)$ je bila upoštevana merjena hitrost padanja padavinskih delcev pri prehodu skozi merilno površino disdrometra F [mm^2]:

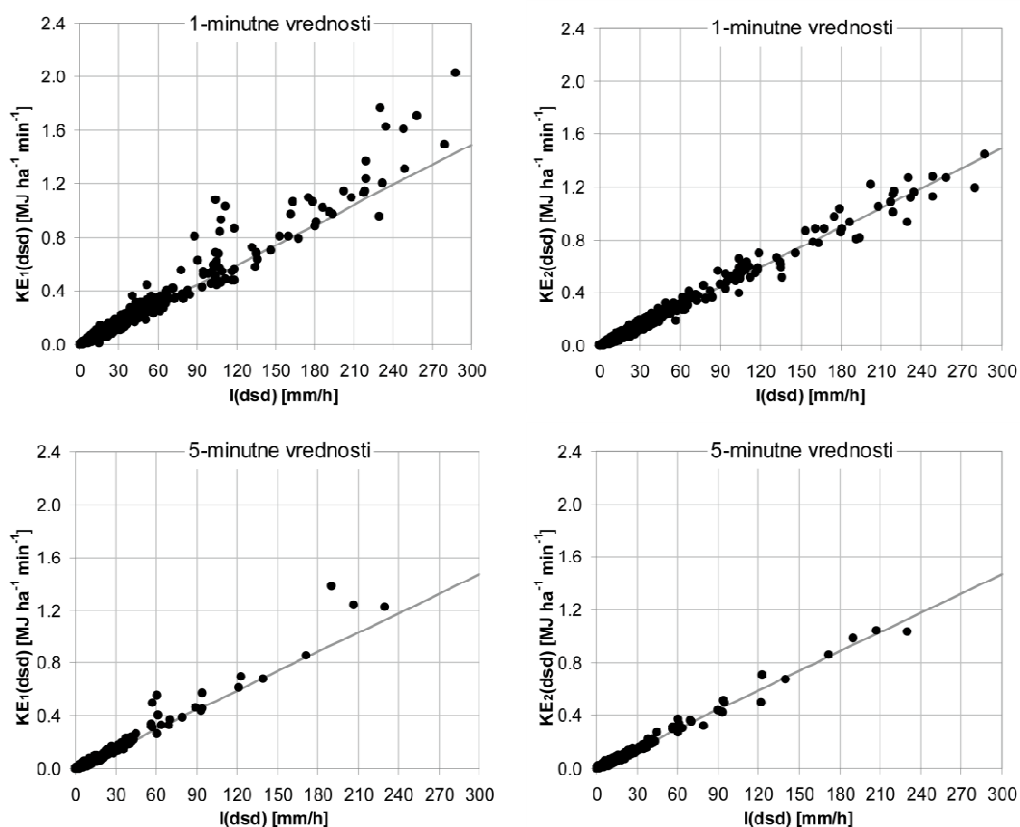
$$KE_1(dsd) = \frac{\pi\rho}{12 \cdot 10^3 F\Delta t} \cdot \sum_i n_i \cdot \frac{1}{D_{b,i} - D_{a,i}} \cdot \int_{D_{a,i}}^{D_{b,i}} D_i^3 dD \cdot \frac{1}{v_{b,i} - v_{a,i}} \cdot \int_{v_{a,i}}^{v_{b,i}} v_i^2 dv \quad (8)$$

V enačbi 8 je gostota vode označena kot ρ [kg m^{-3}], hitrost padanja padavinskih delcev znotraj razreda i pa kot v_i [m s^{-1}], ki je omejena na intervalu med $v_{a,i}$ do $v_{b,i}$. Pri izračunu specifične kinetične energije $KE_2(dsd)$ pa je bila hitrost v_i v enačbi 8 nadomeščena s končno hitrostjo padanja dežnih kapelj v_t [m s^{-1}] po Atlasu in sod. (1973):

$$v_t(D_i) = 9,65 - 10,3 \exp(-0,6D_i) \quad (9)$$

Tako izračunane 1-minutne vrednosti za specifično kinetično energijo padavin $KE_1(dsd)$ in $KE_2(dsd)$ so bile korelirane z 1-minutnimi vrednostmi intenzitete padavin $I(dsd)$ za vse tri z disdrometri opremljene merilne lokacije (Slika 3 prikazuje primer Ilirske Bistrice). Pri določitvi parametrov eksponentne enačbe 5 smo upoštevali specifično kinetično energijo $KE_2(dsd)$ in ne $KE_1(dsd)$, saj je slednja imela višjo razpršenost in tudi višjo napoved vsote kinetične energije E vseh erozivnih dogodkov.

Parametre eksponentne enačbe 5 so bili določeni tako, da smo začetne približke parametrov (enačba 6) spreminjali toliko časa, dokler ni bila dosežena maksimalna možna vrednost Nash-Sutcliffovega koeficienta modelske učinkovitosti (Nash in Sutcliffe, 1970). Za vsako od merilnih lokacij so bili na enak način določeni tudi parametri eksponentne enačbe na podlagi 5-minutnih podatkov za $I(dsd)$ in $KE(dsd)$ (5-minutne vsote 1-minutnih vrednosti, normirane na časovno enoto) z namenom uporabe s 5-minutnimi intenzitetami padavin iz pluviografov ARSO. Preglednica 1 združuje ugotovljene parametre eksponentne enačbe na vseh merilnih mestih. Enačba za račun specifične kinetične energije padavin iz 1-minutnih (5-minutnih) intenzitet padavin ima veljavnost na območju intenzitet padavin med 0,1 mm h^{-1} in 255, 280 oz. 399 mm h^{-1} (147, 172 oz. 254 mm h^{-1}) na merilnih mestih v Ljubljani, Ilirski Bistrici oz. Bovcu.



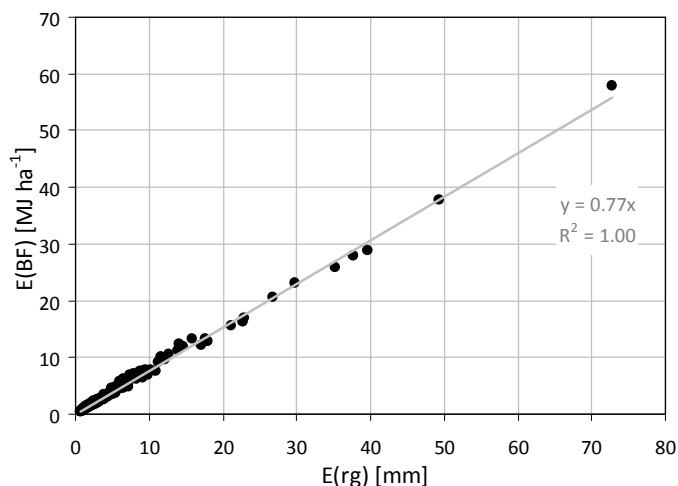
Slika 3: Korelacija med intenzitetami padavin $I(dsd)$ in specifično kinetično energijo padavin: $KE_1(dsd)$, račun z upoštevanjem merjene hitrosti padanja dežnih kapelj, levo; $KE_2(dsd)$, račun z upoštevanjem končne hitrosti padanja dežnih kapelj po Atlas in sod. (1973), desno. Siva črta predstavlja eksponentno enačbo 5 s parametri za Ilirsko Bistrico

Preglednica 1: Vrednosti parametrov (e_{max} , a in b) eksponentne enačbe za račun specifične kinetične energije padavin e_B v Bovcu, Ilirski Bistrici in Ljubljani

Parametri enačbe $e_B = e_{max} \cdot [1 - a \cdot \exp(-bI)]$	1-min. intenzitete padavin			5-min. intenzitete padavin		
merilno mesto	e_{max}	a	b	e_{max}	a	b
Bovec	0,341	0,60	0,040	0,336	0,60	0,047
Ilirska Bistrica	0,298	0,60	0,071	0,294	0,60	0,085
Ljubljana	0,316	0,60	0,061	0,310	0,60	0,074

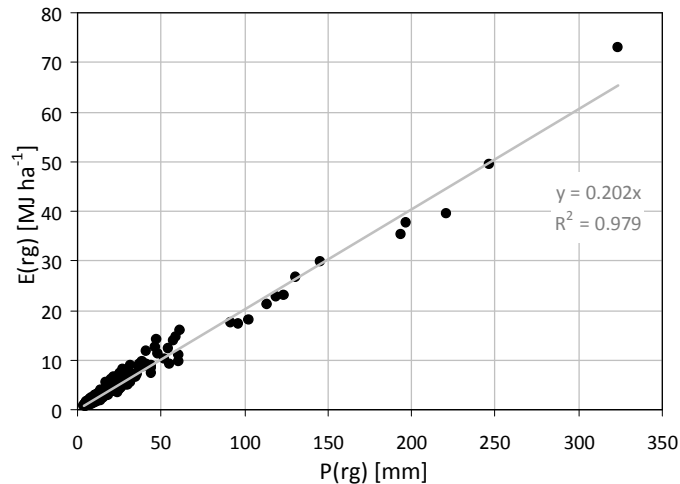
Modelsko učinkovitost eksponentne enačbe 5 z opredeljenimi parametri (Preglednica 1) smo preverili ob uporabi enačbe na izračunane 1-minutne in 5-minutne intenzitete padavin $I(dsd)$ ter na merjene intenzitete $I(rg)$ s strani dežemerov. Te modelske učinkovitosti smo primerjali z učinkovitostmi $KE-I$ funkcijskih povezav, ki so v svetovni literaturi predlagane s strani drugih avtorjev in so do sedaj že bile uporabljene pri raziskavah v mediteranskem in širšem prostoru. Pri tem smo iz obravnave izključili tiste funkcijske povezave drugih avtorjev, ki niso imele zadostnega intervala veljavnosti na območju intenzitet padavin. Primerjava je izpostavila tri enačbe drugih avtorjev, ki so imele zelo

primerljivo učinkovitost pri napovedovanju kinetične energije E erozivnih dogodkov z učinkovitostjo eksponentne enačbe 5 z opredeljenimi parametri (Preglednica 1) na vseh treh merilnih mestih. To so enačbe avtorjev: Usón in Ramos (2001) v kombinaciji s Sempere Torres in sod. (1992), Zanchi in Torry (1980) ter Wischmeier in Smith (1958). Enačba (6) Browna in Fosterja (1987), ki jo metodologija RUSLE priporoča pri računu erozivnosti padavin, se je izkazala kot neprimerna za uporabo v Sloveniji, saj podcenjuje kinetično energijo E posameznih erozivnih dogodkov v povprečju za 23 % (Slika 4).



Slika 4: Razmerje med kinetično energijo vseh zabeleženih erozivnih dogodkov na obravnavanih merilnih mestih po Brownu in Fosterju (1987) – $E(BF)$ in po eksponentni enačbi 5 z opredeljenimi parametri (Preglednica 1) – $E(rg)$

Veliko pozornost nam je vzbudila izrazita linearna odvisnost med višinami padavin P in kinetičnimi energijami E pripadajočih erozivnih dogodkov ob primerjavi na vseh treh merilnih mestih. Če račun specifične kinetične energije e_B kot funkcijo intenzitete padavin I nekoliko poenostavimo: namesto triparametrne eksponentne enačbe privzemimo linearno odvisnost na celotnem območju intenzitet padavin, tako kot so to storili Sempere Torres in sod. (1992) in tudi Uson in Ramos (2001), integrirajmo jo po času trajanja erozivnega dogodka in, kot že nakazuje Slika 3, dobili bomo linearno zvezo med kinetično energijo E erozivnega dogodka in pripadajočo višino padavin P . Ob taki predpostavki se račun kinetične energije erozivnih dogodkov E močno poenostavi. Pri tem se koeficient linearne odvisnosti praktično ne spreminja po merilnih mestih in znaša $0,20 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ v primeru, ko smo kinetično energijo erozivnih dogodkov $E(rg)$ in pripadajočo višino padavin P izračunali na podlagi merjenih intenzitet padavin $I(rg)$ (Slika 5).

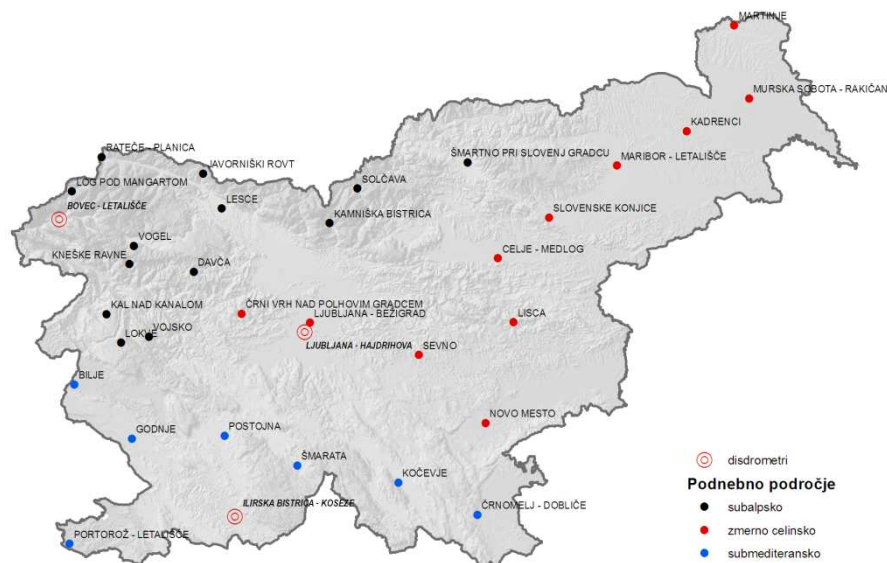


Slika 5: Razmerje med višino padavin $P(\text{rg})$ in kinetično energijo $E(\text{rg})$ erozivnih dogodkov, ki so jih zabeležili dežemeri v Bovcu, Ilirski Bistrici in Ljubljani

Na tem mestu naj omenimo tudi to, da so disdrometri zelo občutljivi instrumenti in naklonjeni netočnim meritvam, sploh pri visokih intenzitetah padavin. Kljub njihovi tovarniški kalibraciji so disdrometri v Ilirski Bistrici, Ljubljani oz. Bovcu namerili 1, 20 oz. 25 % višjo skupno vsoto padavin od dežemera na isti lokaciji znotraj obravnavanih erozivnih dogodkov. Do podobnih ugotovitev je prišel tudi Lanzinger s sod. (2006), ki je na isti lokaciji postavil tri identične optične disdrometre in izmerjeno višino padavin primerjal z meritvami referenčnega dežemera. V povprečju so posamezni disdrometri namerili višje vsote padavin, in sicer 5, 15 oz. 20 %.

Erozivnost padavin v Sloveniji

Izhodišče pri prostorskem modeliranju erozivnosti padavin so bili 10-letni nizi podatkov o intenziteti padavin na 31 pluviografskih postajah znotraj opazovalne mreže ARSO (Slika 6). Na podlagi merjenih 5-minutnih intenzitet padavin so bili določeni erozivni dogodki podobno kot pri disdrometriških meritvah, pri čemer smo upoštevali le deževne dogodke brez sneženja. Pluviografske postaje smo razdelili v tri podnebne skupine glede na geografski položaj in opravili račun specifične kinetične energije padavin po eksponentni enačbi (5) z ustreznimi parametri iz Preglednice 1. Pri tem smo na submediteranskem, subalpskem oz. zmerno celinskem območju Slovenije upoštevali parametre, ki smo jih določili iz disdrometriških meritev v Ilirski Bistrici, Bovcu oz. Ljubljani. Sledil je račun kinetične energije posameznih dogodkov E in povprečne letne erozivnosti padavin R (enačba 2). Manjkajoči prispevek k bilanci erozivnosti padavin R tistih erozivnih dogodkov, ki so na posameznih postajah ostali nezabeleženi zaradi izpada merilnih instrumentov, smo nadomestili s koreliranimi vrednostmi prispevkov glede na najprimernejšo postajo v neposredni bližini. Tako smo dobili končne vrednosti erozivnosti padavin R na pluviografskih postajah ARSO in jih kot atribut pripisali točkam v vektorskem sloju, ki so predstavljale geografski položaj omenjenih pluviografskih postaj.



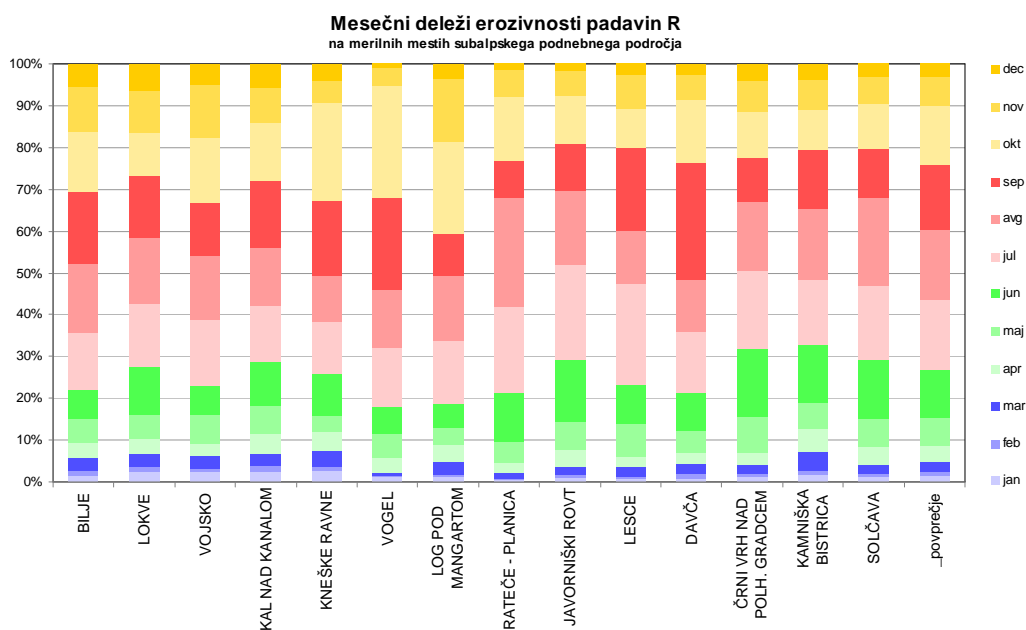
Slika 6: Pozicija disdrometrov in pluviografskih postaj ARSO ter njihova porazdelitev po podnebnih območjih Slovenije

Preden smo se lotili prostorske interpolacije erozivnosti padavin, smo določili mesečne deleže erozivnosti padavin. S tem smo dobili vpogled v sezonskost oz. časovno porazdelitev erozivnosti padavin skozi leto. Naj omenimo, da bi zagotovo potrebovali daljši niz podatkov, da bi se izognili močnim vplivom ekstremnih erozivnih dogodkov na posamezne mesečne deleže erozivnosti padavin, saj ti lahko predstavljajo tudi več kot 30 % povprečne letne erozivnosti padavin. Tako imajo izjemni padavinski dogodki, na primer novembra 2000 v Logu pod Mangartom, avgusta 2005 na Lisci, avgusta 2006 v Portorožu oz. septembra 2007 v Davči, prevladujoč vpliv na mesečne deleže erozivnosti padavin, kar se vidi na Slikah 7, 8 in 9. Zadnji stolpec na omenjenih slikah z oznako "_povprečje" pomeni delež vsote mesečnih erozivnosti padavin v vsoti letne erozivnosti padavin na vseh 31 merilnih mestih.

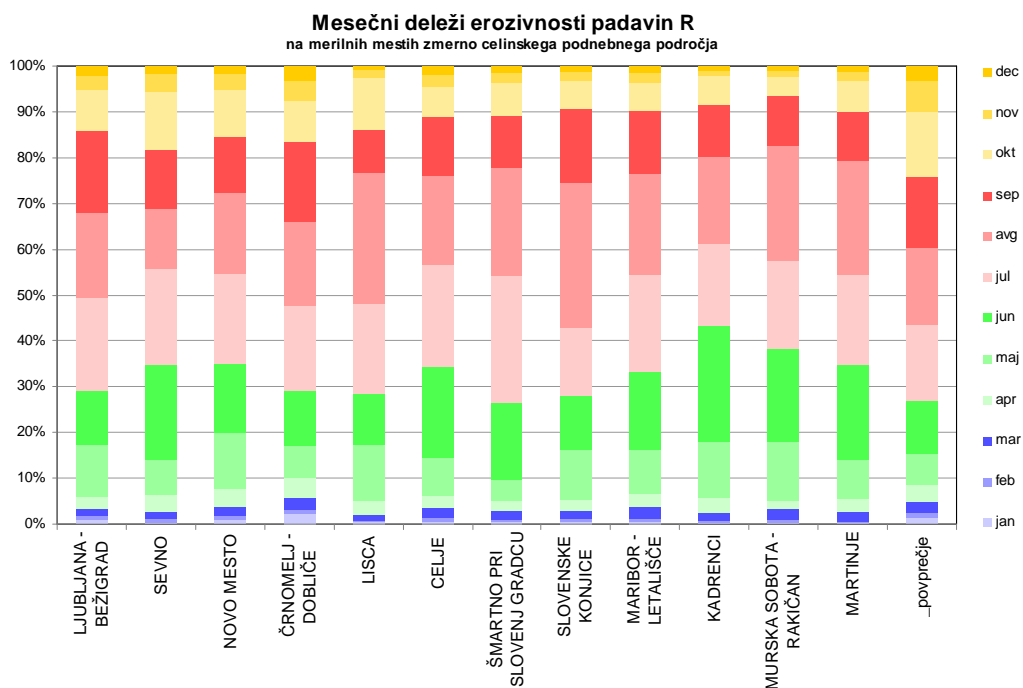
Glede na mesečne deleže erozivnosti padavin R lahko posamezna merilna mesta znotraj istega podnebnega območja razdelimo v skupine. Tako smo merilna mesta subalpskega podnebnega območja (Slika 7) razdelili na dve skupini glede na skupni delež R ob koncu septembra oz. poletja: pri merilnih mestih jugozahodno od Alpsko-Dinarske gorske pregrade je ta delež v povprečju nekoliko nižji od deleža pri merilnih mestih, ki ležijo na severovzhodni strani gorske pregrade. Pri prvih se ti deleži gibljejo med 59 in 73 % (povprečje 68 %), pri drugih pa med 76 in 80 % (povprečje 79 %). Merilna mesta zmerno celinskega podnebnega območja (Slika 8) smo ravno tako razdelili v dve skupini glede na porazdelitev mesečnih deležev R . Ob koncu septembra imajo merilna mesta južno oz. severno od Posavskega hribovja skupen delež R med 81 in 86 % (povprečje 84 %) oz. med 89 in 93 % (povprečje 91 %). Merilna mesta submediteranskega podnebnega območja (Slika 9) pa tvorijo homogeno skupino glede na skupen delež R ob koncu poletja.

Iz porazdelitve mesečnih deležev R in medsebojnih podobnosti oz. razlik le-teh med merilnimi postajami smo ugotovili, da so bile določene merilne postaje napačno razvrščene po podnebnih območjih. Tako smo štiri merilna mesta prestavili iz enega v drugo podnebno območje: Šmartno pri Slovenj Gradcu iz subalpskega v zmerno celinsko, Črni vrh pri Polhovem Gradcu iz zmerno celinskega v subalpsko, Črnomelj iz submediteranskega v zmerno celinsko in Bilje iz submediteranskega v subalpsko podnebno

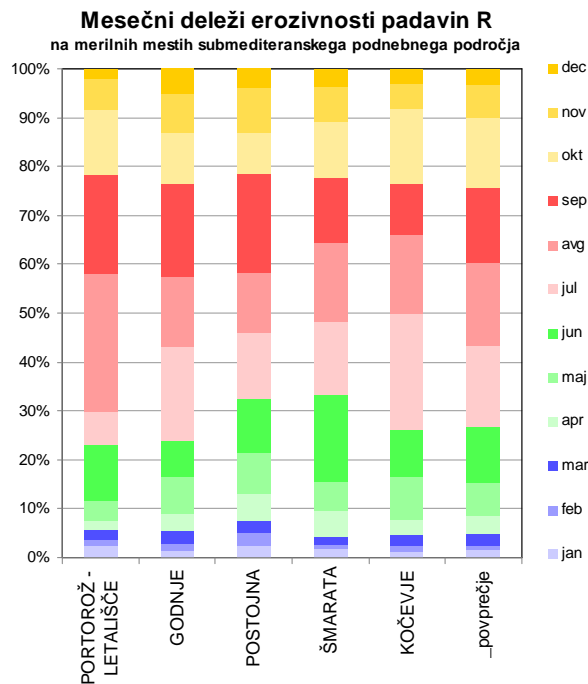
območje. Za te štiri postaje smo pred izdelavo karte erozivnosti padavin ponovno izračunali erozivnost padavin R , pri čemer smo uporabili ustrežnejše parametre eksponentne enačbe za račun specifične kinetične energije padavin.



Slika 7: Mesečni deleži erozivnosti padavin R na merilnih postajah ARSO, ki sodijo v subalpsko podnebno območje



Slika 8: Mesečni deleži erozivnosti padavin R na merilnih postajah ARSO, ki sodijo v zmerno celinsko podnebno območje



Slika 9: Mesečni deleži erozivnosti padavin R na merilnih postajah ARSO, ki sodijo v submediteransko podnebno območje

Sledila je prostorska interpolacija podatkov o povprečju letne erozivnosti padavin R , ki smo jo izvedli v enakem smislu, kot se izvaja prostorska interpolacija dolgoletnega povprečja višine padavin na ARSO (Dolinar, 2009), saj gre za enako fizikalno ozadje oz. izhodišče (intenziteta padavin). Izvedli smo interpolacijo mešanega tipa, ki je kombinacija globalne (regresijske) interpolacijske metode in geostatistične metode navadnega kriginga. Karto prvega približka erozivnosti padavin smo določili s pomočjo multiple linearne regresije (MLR), pri čemer smo želeli povprečje letne erozivnosti padavin R na pluviografskih postajah ARSO zapisati kot funkcijo Gauss-Krugerjevih koordinat postaj (X in Y) in njihove nadmorske višine (Z):

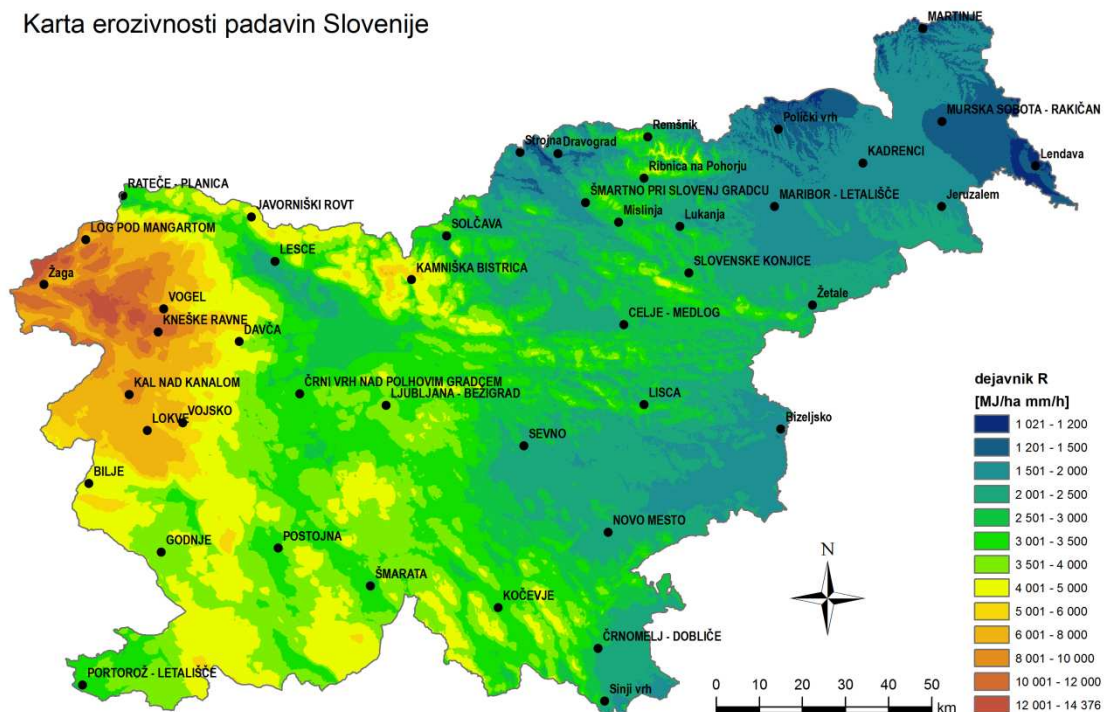
$$R_{pp} = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3X^2 + a_4Y^2 + a_5Z + a_6\Delta Z + a_7XY + a_8XZ + a_9YZ \quad (10)$$

Spremenljivke za račun prvega približka dejavnika R_{pp} smo pripravili iz 100-metrskega digitalnega modela reliefa (DMR) za celotno območje Slovenije. Pri tem spremenljivka ΔZ pomeni višinsko razliko med nadmorsko višino obravnavane točke in najvišje točke v smeri proti severovzhodu, ki leži v krožnem izseku širine 60° in radija 2000 m. V našem primeru je bila ta vrednost radija na intervalu med 500 in 4000 m s poskušanjem izbrana kot merodajna. Ugotovili smo, da imata spremenljivki Z in ΔZ največjo signifikantnost oz. težo pri linearnem modelu, najmanjšo pa Y in YZ , ki smo jih tudi izločili iz računa prvega približka erozivnosti padavin R_{pp} po enačbi 10. Tako smo iz digitalnega modela reliefa Slovenije pripravili matriko R_{pp} za celotno območje Slovenije. Matriko koeficientov za množenje s karto R_{pp} pa smo pridobili s pomočjo interpolacije kriging iz 31 točkovnih vrednosti t. i. ostankov d_{pp} :

$$d_{pp} = \frac{R}{R_{pp}} \quad (11)$$

Skalarni produkt matrik oz. kart R_{pp} in d_{pp} je dal preliminarno karto erozivnosti padavin R . Tako pridobljena karta erozivnosti padavin R Slovenije ni bila zadovoljiva, saj so bile vrednosti na robovih drugačne od pričakovanih oz. ponekod celo negativne, sploh ob jugovzhodni in severni meji Slovenije. Zato smo na problematičnih območjih posegli po podatkih iz najbližjih padavinskih postaj, kjer se beležijo le dnevne višine padavin. Na osnovi korelacije letnih višin padavin iz padavinskih postaj z višinami padavin na najbližjih pluviografskih postajah smo pridobili vrednosti za dejavnik R na 13 dodatnih merilnih mestih. Tako smo lahko ponovili postopek MLR, le da smo ga sedaj opravili na osnovi vrednosti dejavnika R na 44 merilnih mestih ARSO. Pot do zadovoljivega končnega rezultata je vodila skozi nekaj ponovitev interpolacije navadnega kriginga. Pri interpolaciji smo dodali še osem točk oz. uteži na skrajnem severovzhodu Slovenije, saj so vrednosti dejavnika R na določenih mestih (predvsem na robovih) še vedno zasedale nižje vrednosti od najnižjih pričakovanih, tako da smo končni rezultat dosegli tudi s pomočjo "ročnih" korekcij. Karta erozivnosti padavin je prikazana na Sliki 10.

Karta erozivnosti padavin Slovenije



Slika 10: Karta erozivnosti padavin Slovenije

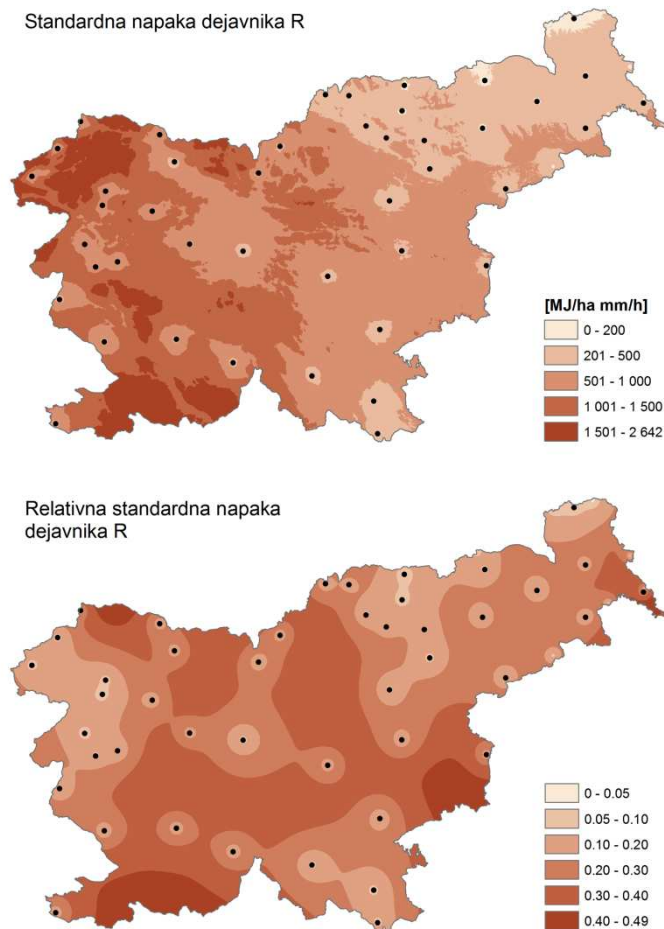
Preglednica 2: Porazdelitev razredov dejavnika *R* glede na preliminarno karto erozivnosti padavin

razred dejavnika <i>R</i> [MJ ha ⁻¹ mm h ⁻¹]	delež površja Slovenije [%]
1021 do 1200	0,5
1200 do 1500	3,6
1500 do 2000	13,0
2000 do 2500	16,7
2500 do 3000	14,3
3000 do 3500	15,4
3500 do 4000	14,6
4000 do 5000	11,9
5000 do 6000	2,5
6000 do 8000	4,0
8000 do 10000	2,0
10000 do 12000	1,3
12000 do 14376	0,4

Najnižje vrednosti erozivnosti padavin v Sloveniji najdemo na skrajnem severovzhodu države, kjer se vrednosti gibljejo med 1000 in 2000 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹, najvišje pa na najvišjih območjih Julijskih Alp, kjer vrednosti presegajo 10 000 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹, v Krnskem pogorju pa celo 14 000 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹. Iz karte se vidi, da v Sloveniji prevladujejo območja z erozivnostjo padavin med 2000 in 4000 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹ in tako zasedajo 61 % celotnega območja Slovenije. V Preglednici 2 so prikazani deleži razredov dejavnika *R* po površju Slovenije glede na izdelano karto erozivnosti padavin. Srednja vrednost erozivnosti padavin *R* v Sloveniji znaša 3393 MJ ha⁻¹ mm h⁻¹.

Zaključki

Bistvena pomanjkljivost izdelane karte erozivnosti padavin Slovenije je relativno slaba natančnost napovedi dejavnika *R* (Slika 11). Ta nenatančnost izhaja iz interpolacije prostorskih podatkov zaradi dveh bistvenih razlogov: izhodišče za izdelavo karte dejavnika *R* je bila relativno redka mreža pluviografskih postaj s podatkovnim nizom vsaj 10 let (1999–2008) in pri izdelavi karte nismo poznali vrednosti dejavnika *R* onstran slovenske meje. Ti dve pomanjkljivosti smo zasilno odpravili tako, da smo na najbolj kritičnih območjih mrežo dopolnili s padavinskimi postajami, kjer se merijo dnevne višine padavin, in v teh točkah določili dejavnik *R* s pomočjo korelacije iz letnih višin padavin oz. da smo v posameznih točkah ob meji Slovenije privzeli pričakovane vrednosti za dejavnik *R*.



Slika 11: Standardna napaka (zgoraj) in relativna standardna napaka (spodaj) karte erozivnosti padavin Slovenije

Iz Slike 11 se vidi, da je na območjih, kjer smo zgostili mrežo znanih vrednosti dejavnika R oz. je ta bolj gosta kot drugje, relativna standardna napaka najmanjša. Najbolj problematična območja so tista, kjer ni znanih vrednosti R oz. ni daljšega niza pluviografskih meritev padavin. Ta območja so: širše območje Brkinov in Idrije, Karavanke oz. Jezersko, Koroška, Suha Krajina, Posavje in Pomurje. Podobno ugotavljajo tudi Angulo-Martínez in sod. (2009), ki so testirali številne interpolacijske metode (regresijske, geostatistične, mešane) za izdelavo karte erozivnosti padavin na povodju reke Ebro (Španija). Na približno enako gosti mreži znanih vrednosti dejavnika R kot v našem primeru (Ebro – 112 postaj na 85 000 km², Slovenija – 31 postaj na 20 000 km²) so vse interpolacijske metode pokazale visoko negotovost kot posledico visoke spremenljivosti dejavnika R tako v časovnem kot tudi prostorskem smislu. Pri tem poudarjajo pomen dolgoletnega niza podatkov z gosto prostorsko pokritostjo.

Viri

Angulo-Martínez, M., López-Vicente, M., Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. 2009. Mapping rainfall erosivity at a regional scale: a comparison of interpolation methods in the Ebro basin (NE Spain). Hydrol. Earth Syst. Sci. 13: 1907-1920.

- Atlas, D., Srivastava, R.C., Sekhon, R.S. 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Rev. Geophys. Space Phys.* 11: 1-35.
- Brown, L. C., Foster, G. R. 1987. Storm erosivity using idealised intensity distribution. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs* 30: 379-386.
- Dolinar, M. 2009. Osebna korespondenca o izdelavi karte erozivnosti padavin. (26. 11. 2009 in 17. 12. 2009)
- Fujiyoshi, Y., Yamamura, I., Nagumo, N., Nakagawa, K., Muramoto, K., Shimomai, T. 2008. The maximum size of raindrops – can it be a proxy of precipitation climatology? International Conference on Clouds and Precipitation 2008, Cancun, Mexico, July 7–11, 2008. <http://cabernet.atmosfcu.unam.mx/ICCP-2008/abstracts/> (16. 8. 2010)
- Glickman, T.S. 2000. *Glossary of Meteorology*, druga izdaja. Boston, American Meteorological Society. <http://amsglossary.allenpress.com/glossary/> (16. 6. 2010)
- Lanzinger, E., Theel, M., Windolph, H. 2006. Rainfall amount and intensity measured by the Thies laser precipitation monitor. *TECO-2006: WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation Geneva, Switzerland, 4–6 December 2006. WMO, Instruments and observing methods, IOM No. 94.3: 9 str.*
- Laws, J.O., Parsons, D.A. 1943. The relation of raindrop size and intensity. *Trans. Amer. Geophys. Un.* 24: 452-460.
- Löffler-Mang, M., Joss, J. 2000. An Optical Disdrometer for Measuring Size and Velocity of Hydrometeors. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 17: 130-139.
- Mannaerts, C.M., Gabriels, D. 2000. Rainfall erosivity in Cape Verde. *Soil Till. Res.* 55: 207-212.
- Mason, B.J. 1978. Physics of a raindrop. *Physics Education* 13: 414-419.
- Mikoš, M., Zupanc, V. 2000. Erozijska tal na kmetijskih površinah. *Sodobno kmetijstvo* 33: 419-423.
- Mikoš, M., Jošt, D., Petkovšek, G. 2006. Rainfall and runoff erosivity in the alpine climate of north Slovenia. *Hydrol. Sci. J.* 51 (1): 115-126.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Washington, DC, USDA ARS. *Agricul. Handbook* 703: 384 str.
- Sempere-Torres, D., Salles, C., Creutin, J.D., Delrieu, G. 1992. Quantification of soil detachment by raindrop impact: performance of classical formulae of kinetic energy in Mediterranean storms. V: Bogen, J., Walling, D.E., Day, T. (ur). *Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins*. Oslo, IAHS Publ. 210: 115-124.
- Thies Clima. 2006. *Laser Precipitation Monitor, Instruction for Use 021341/02/06*. Göttingen, Adolf Thies GmbH & Co. KG: 56 str.
- UNEP. 2002. *Global Environment Outlook 3*. London, Earthscan Publications Ltd: 416 str.
- Usón, A., Ramos, M.C. 2001. An improved rainfall erosivity index obtained from experimental interrill soil losses in soils with a Mediterranean climate. *Catena* 43: 293-305.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans Am. Geophys. Union* 39: 285-291.
- van Mook, F.J.R. 2002. *Driving Rain on Building Envelopes*. Doktorska disertacija. Eindhoven, University of Technology, Building Physics Group (FAGO), Eindhoven University Press: 198 str.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Washington, DC, USDA ARS. *Agricul. Handbook* 282: 47 str.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. Washington, DC, USDA ARS. *Agricul. Handbook* 537: 57 str.
- Zanchi, C., Torri, D. 1980. Evaluation of rainfall energy in central Italy. V: De Boodt, M., Gabriels, D. (ur.). *Assessment of Erosion*. Toronto, Wiley: 133-142.