

METODE**METODE DOLOČANJA EROZIVNOSTI DEŽJA**

AVTORJA

Daša Goršak

IBE, d. d., Hajdrihova 4, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija

dasa.gorsak@ibe.si

dr. Matjaž Mikoš

Oddelek za gradbeništvo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Jamova cesta 2, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija

matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si

UDK: 551.311.21:551.577(497.4); COBISS: 1.01

IZVLEČEK

Metode določanja erozivnosti dežja

V prispevku je prikazano določanje erozivnosti dežja s pomočjo meteoroloških podatkov, ki jih merijo v mreži Agencije Republike Slovenije za okolje. Razpoložljive padavinske podatke (5-minutne intenzitete padavin) smo uporabili za izračun dejavnika erozivnosti padavin in površinskega odtoka R. Na ta način lahko ocenimo povprečno letno izgubo tal na enoto površine s pomočjo enačbe RUSLE (slovensko Popravljená univerzalna enačba izgube prsti, angleško Revised Universal Soil Loss Equation). Določanje mesečnih, letnih in maksimalnih vrednosti dejavnika R smo prikazali na delu porečju Save med vtokoma Savinje in Krke in sicer za postaji Lisca in Sevno. Za postajo Malkovec smo erozivnost dežja na različne načine izračunali na podlagi podatkov o dnevni padavinah in povprečnih mesečnih temperaturah. Erozivnost dežja bolj sledi srednjim mesečnim temperaturam kakor srednjim mesečnim padavinam.

KLJUČNE BESEDE

hidrologija, meteorologija, geomorfologija, padavine, erozivnost dežja, erozivnost površinskega odtoka, RUSLE, statistična analiza, porečje Save, Slovenija

ABSTRACT

Methods for the determination of rainfall-runoff erosivity

This paper shows the determination of rainfall erosivity by using meteorological data that are available from the network of the Environmental Agency of the Republic of Slovenia. The available rainfall data (5-minute rainfall intensities) are used for the computation of the rainfall-runoff erosivity factor R. By doing so we can estimate the average annual soil loss per surface if using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). The determination of monthly, annual, and extreme values of the R factor is shown in the part of the Sava River basin between the confluences with the Savinja and Krka Rivers for the Lisca and Sevno stations. Furthermore, for the Malkovec station we showed different ways of computation of the R factor on the basis of daily precipitation and the mean monthly temperatures. The rainfall-runoff erosivity follows the mean monthly temperatures better than it follows the monthly rainfall.

KEY WORDS

hydrology, meteorology, geomorphology, precipitation, rainfall-runoff erosivity, RUSLE, statistical analysis, Sava River, Slovenia

Uredništvo je prispevek prejelo 14. aprila 2008.

1 Uvod

Dežna erozija je posebna oblika erozijskega delovanja dežnih kapelj, ki na zemeljski površini povzroča spiranje in odplavljanje nevezanih delcev prsti in kamnin. Dežno erozijo povzročajo dežne kaplje z udarjanjem, zato jo imenujemo tudi pljuskovna erozija, ter z njimi povezan površinski vodni odtok. Odvisna je od vrste in količine padavin. Dežno erozijo povzročajo predvsem kratkotrajni in intenzivni nalivi. Za preučevanje erozivnosti dežja in površinskega odtoka so pomembni količina padavin, intenziteta padavin in njena časovna porazdelitev, vrsta padavin, kinetična energija ter porazdelitev in hitrost dežnih kapelj. V prispevku so prikazani načini določanja erozivnosti dežja iz osnovnih meteoroloških podatkov, ki so na voljo v državni meteorološki mreži Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO).

2 Metodologija

Erozivnost padavin vpliva na njihovo zmogljivost za sproščanje in odplavljanje preperine in prsti (Diodato 2005). Odvisna je od količine, trajanja in intenzitete ter drugih značilnosti padavin, kot so porazdelitev velikosti dežnih kapelj, masa kapelj in hitrost njihovega padanja. Značilnosti lahko fizikalno opišemo s kinetično energijo kaplje. Podatki o erozivnosti so eden od pokazateljev ogroženosti območja zaradi erozije, torej erozivnost padavin določa dežno erozijo. Seveda erozivnost padavin ni edini dejavnik, ki vpliva na jakost dežne erozije in njen vpliv na spiranje prsti. Pomembni drugi dejavniki so še odpornost erozijske podlage, njen nagib in morebitna rastlinska zaščitenost.

Različni avtorji so razvili več indeksov za določanje erozivnosti, ki so običajno kombinacija maksimalne intenzitete in količine ali energije padavin. So številčni pokazatelji sposobnosti dežja, da erodira podlago. Razlikujemo empirične in fizikalne indekse. Slednji temeljijo na značilnostih padavin in so neodvisni od lastnosti prsti. Dober indeks erozivnosti padavin bi moral zadovoljivo prikazati spremenljivost padavin med letom in spremenljivost padavin med leti (Apaydin in ostali 2006).

Najpogosteje uporabljamo indeks erozivnosti v obliki dejavnika padavin in odtoka R , ki sta ga razvila Wischmeier in Smith (Renard in ostali 1997) v okviru enačbe USLE (slovensko Univerzalna enačba izgube prsti; angleško *Universal Soil Loss Equation*) oziroma njene izboljšanje različice RUSLE (slovensko Popravljená univerzalna enačba izgube prsti; angleško *Revised Universal Soil Loss Equation*). Čeprav so to enačbo razvili za ocenjevanje vpliva rabe tal na erozijo prsti za območje ZDA, jo povsod po svetu uporabljajo za empirično določanje povprečne letne erozije prsti. Enačba RUSLE je odvisna od hidroloških in topografskih dejavnikov (R , L , S) in ostalih dejavnikov (K , C , P), ki opisujejo erodibilnost, pokrovnost in rabo tal. Enačbo RUSLE zapišemo kot zmnožek omenjenih dejavnikov $A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$, kjer A označuje povprečno letno izgubo prsti na enoto površine (kg/ha na leto), R je dejavnik erozivnosti padavin in odtoka (pogosto imenovan na kratko kar le kot dejavnik erozivnosti padavin) in ga izrazimo v $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, K je dejavnik erodibilnosti prsti, L označimo dolžino pobočja, S pa njegov naklon. Oznaka C pomeni pokrovnost in vrsto rabe tal, P pa so označeni kmetijski zaščitni ukrepi. Ker v prispevku obravnavamo metode določanja erozivnosti padavin in ne vrednotenja izgube prsti, se bomo v nadaljevanju omejili na obravnavo dejavnika R kot enega od naštetih dejavnikov vrednotenja izgube prsti.

2.1 Dejavnik R po metodi RUSLE

Pri vrednotenju dejavnika erozivnosti padavin in odtoka R , ki ga uporabljamo v enačbi RUSLE, moramo upoštevati vpliv trkov vodnih kapelj in vpliv količine ter stopnje odtoka voda zaradi padavin. Dejavnik erozivnosti padavin R je zmnožek kinetične energije padavin E in njihove intenzitete I ter ga ne smemo enostavno upoštevati kot energijski parameter. Sama kinetična energija ni zadosten pokazatelj erozijske moči padavin, saj ima lahko zmeren in dolg naliv enako energijo kot mnogo krajši dež z večjo intenziteto. Erozivnost dežnih kapelj se povečuje z intenziteto naliva, ki jo upoštevamo

s komponento I_{30} . Izguba prsti na enoto površine v času nevihtnega (erozivnega) dogodka je tako v skladu z enačbo RUSLE premosorazmerna dejavniku erozivnosti padavin R : celotna kinetična energija naliva E je množena z maksimalno 30-minutno intenziteto padavin I_{30} , torej velja $R = E \cdot I_{30}$ (Renard in ostali 1997). Dolgoletna opazovanja in meritve so pokazali tudi, da za oceno povprečnih letnih izgub prsti niso pomembni le najintenzivnejši nalivi. Ocena mora namreč vsebovati vpliv vseh nalivov, tako zmerne kot močne nalive. V skladu z enačbo RUSLE pri računu erozivnosti padavin upoštevamo le nalive oziroma erozivne dogodke z več kot 12 mm padavin. Izjema so nalivi, ko v 15 minutah pade več kot 6 mm padavin, ki jih kljub prejšnjemu pogoju prav tako upoštevamo pri računu erozivnosti. Če v 6 urah pade manj kot 12 mm padavin, dogodka med seboj ločimo in obravnavamo vsakega posebej.

2.2 Program za določanje erozivnosti padavin RF

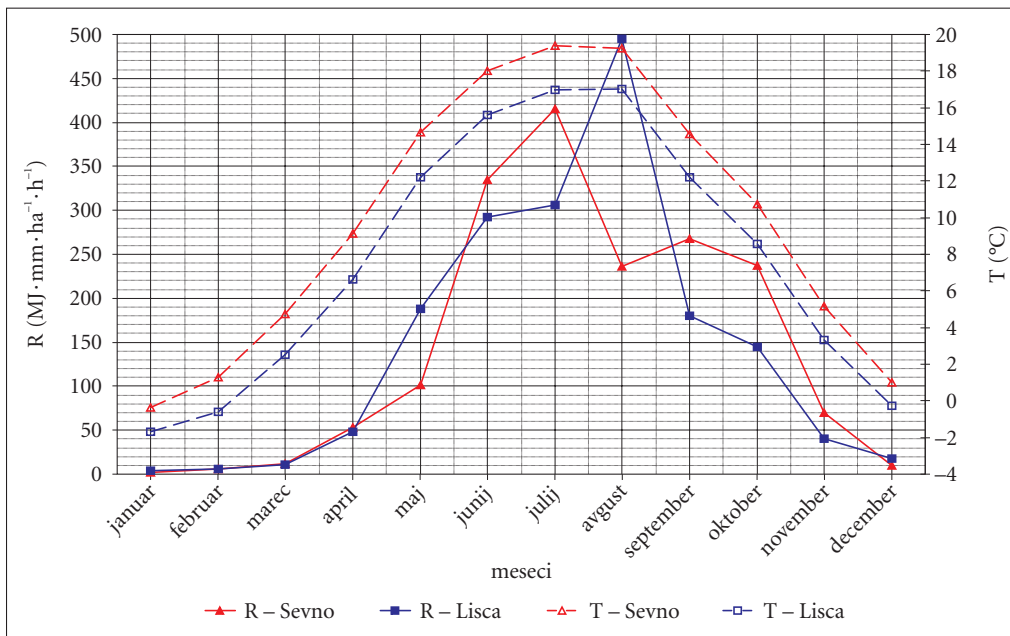
Petkovšek (2002) je razvil kratek računalniški program za določanje erozivnosti padavin, imenovan RF. V prvotni obliki je služil kot orodje za določanje dejavnika R v enačbi RUSLE. Joštova (2003) je v diplomski nalogi program izboljšala tako, da erozivnost padavin računa po metodah, katerih osnovna enačba za odvisnost kinetične energije dežnih kapljic od intenzitete padavin ima eksponentno obliko. Vhodni podatki programa so podatki o intenzitetah padavin iz avtomatskih dežemerov. Za podane padavine program izpiše erozivne dogodke in za vsakega izmed njih izračuna količino padavin, energijo padavin, maksimalne 30-minutne intenzitete padavin in dejavnika R .

Podatke, ki jih potrebujemo za račun dejavnika erozivnosti padavin R z uporabo programa RF, meri ARSO na 37 merilnih mestih v Sloveniji, medtem ko podatke o dnevni padavinah in temperature merijo kar na 188 merilnih mestih. Za podrobnejšo določitev prostorske spremenljivosti in časovnih trendov erozivnosti padavin v Sloveniji potrebujemo podatke tudi drugje, ne le v 37 avtomatskih merilnih mestih v Sloveniji. Zato je smiselno poiskati povezavo med dnevnimi padavinami (podatki iz 188 merilnih mest), povprečno mesečno temperaturo T ter dejavnikom erozivnosti padavin R in tako povečati prostorsko gostoto podatkov o erozivnosti padavin.

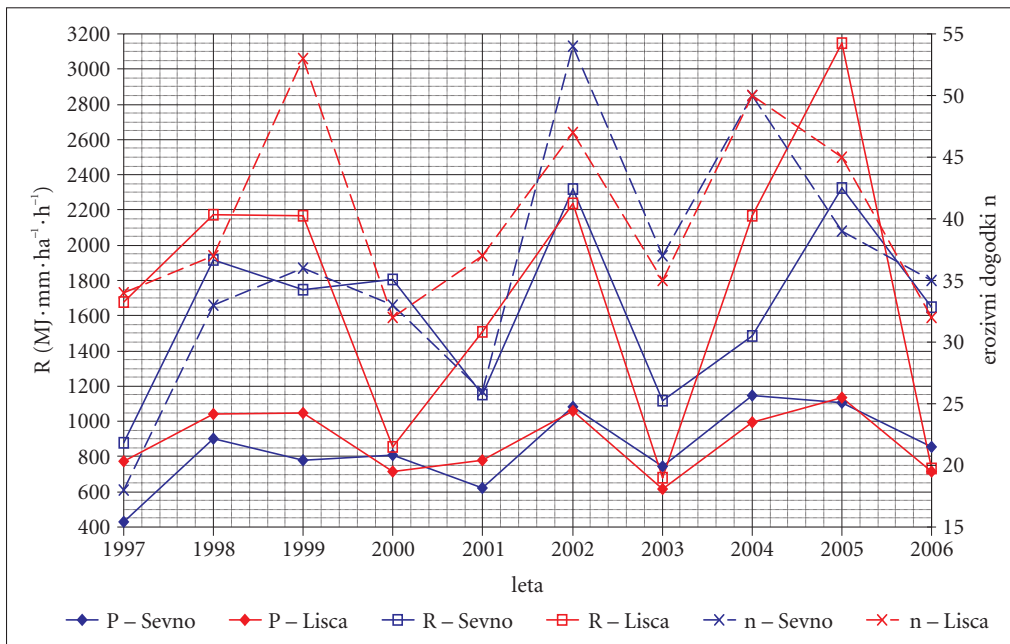
Veliko je že bilo poizkusov ocen erozivnosti padavin R na podlagi dnevni ali mesečni podatkov o padavinah (npr. Auerswald in Schmidt 1986), za oceno letni vrednosti dejavnika R pa nekateri avtorji uporabijo Fournierjev podnebni indeks in njegove izboljšave (Lal in Elliot 1994, 181; Nearing 2001). Mesečni dejavnik erozivnosti padavin R se pogosto oceni z enačbo $R = a \cdot \sum P_d^b$, pri čemer sta koeficient a in eksponent b parametra enačbe in P_d mesečna vsota dnevni padavin (na primer Petkovšek in Mikoš 2004). Omenjene metode ne dajejo neposrednega vpogleda v spreminjanje erozivnosti padavin preko leta. Če želimo prikazati spreminjanje erozivnosti padavin preko leta, analiziramo mesečne erozivnosti R v odvisnosti od srednjih mesečni temperatur T . To lahko izvedemo na dva različna načina. Ena možnost je upoštevanje linearne odvisnosti pri določitvi faktorja a v enačbi $R = a \cdot \sum P_d^b$, pri čemer je torej $a = a_0 + a_t \cdot T$. Faktor a je koeficient korelacije med vsoto kvadratov dnevni padavin P_d in erozivnostjo R . Faktor a je odvisen od povprečne mesečne temperature T , ker se temperatura pogosto kar dobro ujema s povprečnimi mesečnimi vrednostmi erozivnosti R . Člena a_0 in a_t sta za določeno lokacijo v tem modelu enaka za vse mesece. Druga možnost za izračun faktorja a pa je, da upoštevamo kvadratno odvisnost od temperature T : $a = a_0 + a_t \cdot T^2$. Na izbranih merilnih mestih v delu porečja reke Save med sotočjem s Savinjo in Krko, smo za določitev mesečne erozivnosti padavin R uporabili tako linearno kot kvadratno odvisnost od srednjih mesečni temperatur T in oba modela primerjali z izračunano mesečno erozivnostjo R ob uporabi merjenih 5-minutni intenzitet padavin.

3 Rezultati

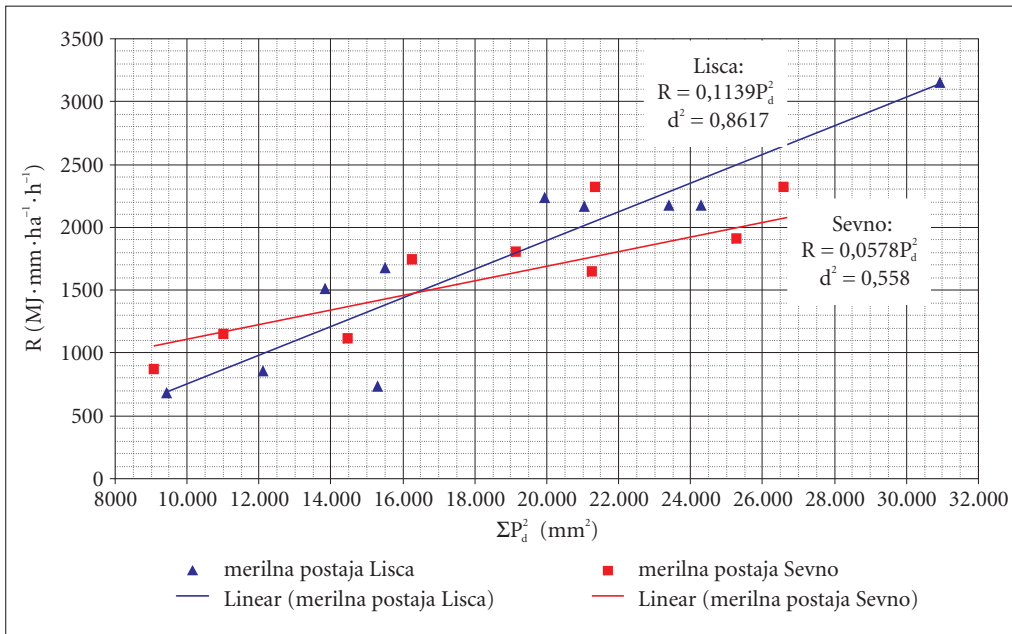
Načine določanja erozivnosti padavin za merilna mesta, na katerih razpolagamo z različnimi meteorološkimi podatki, bomo pokazali na primeru izbranega dela porečja Save, kjer je v gradnji veriga



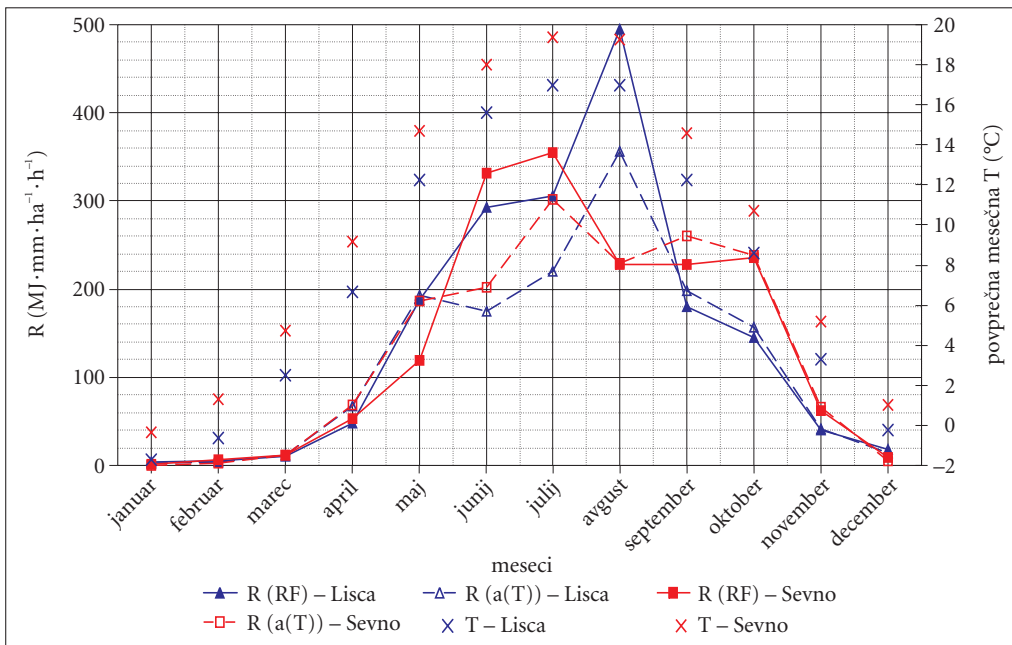
Slika 1: Povprečne mesečne vrednosti temperature T in erozivnosti dežja R za merilni mesti Lisca in Sevno.



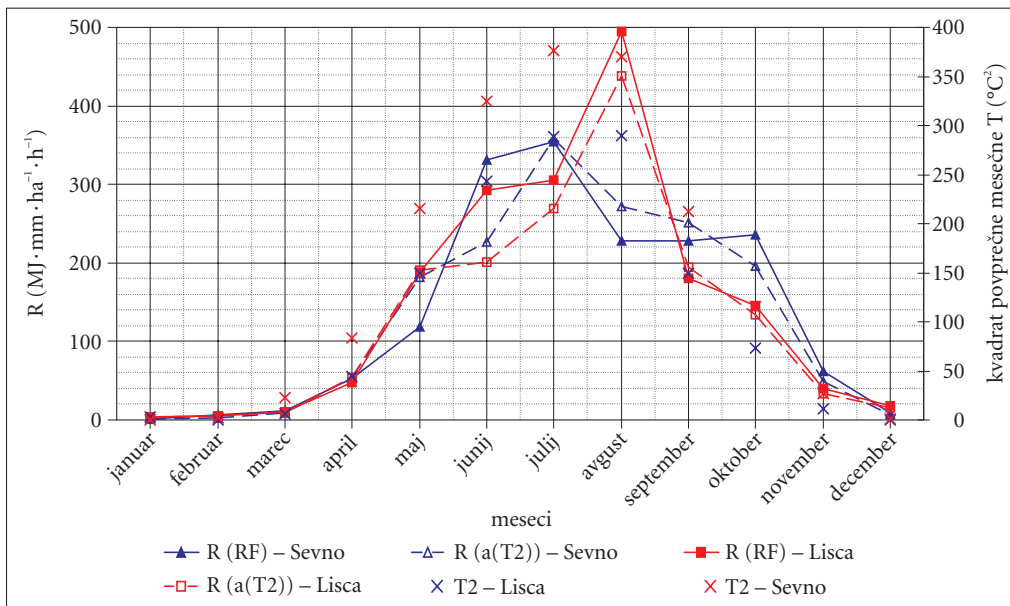
Slika 2: Letne vrednosti padavin P , erozivnosti dežja R in števila erozivnih dogodkov n za merilni mesti Lisca in Sevno.



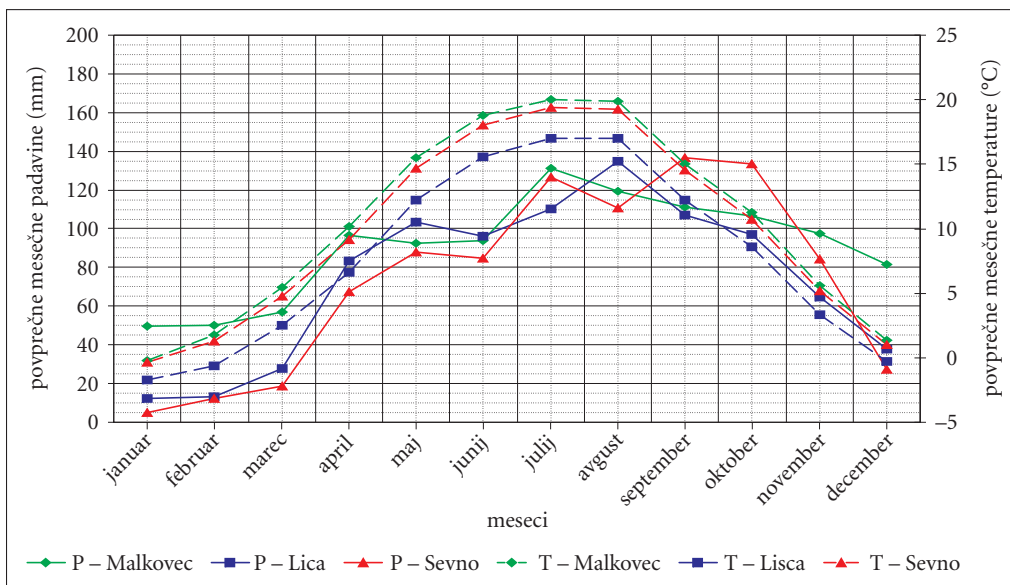
Slika 3: Prikaz razmerja med vsoto kvadratov dnevni padavin ΣP_d^2 in erozivnostjo dežja R za merilni mesti Lisca in Sevno.



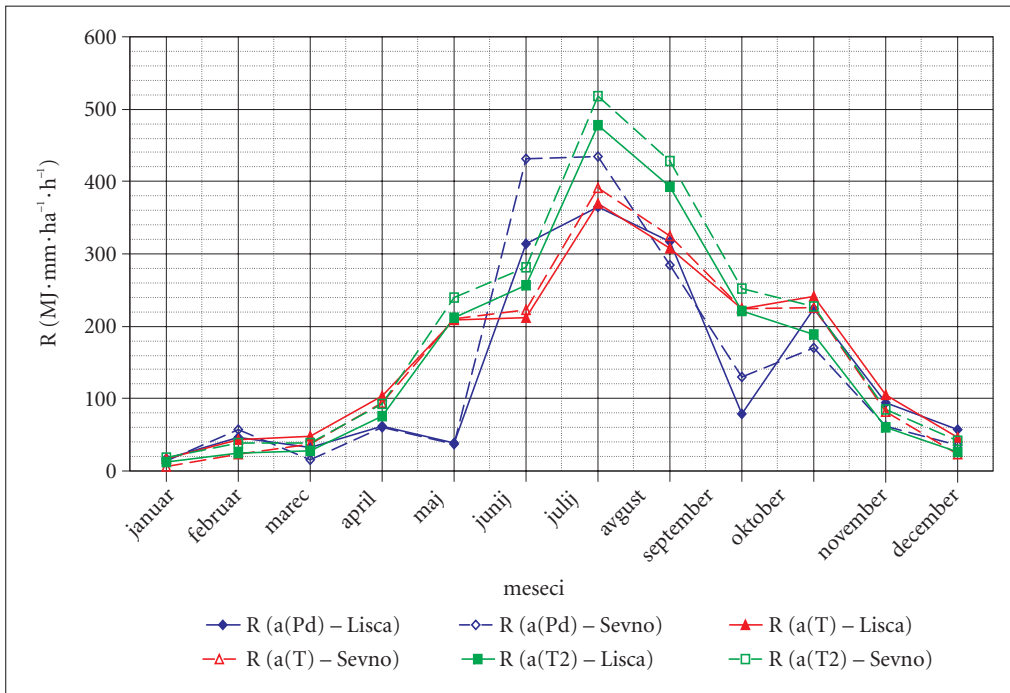
Slika 4: Primerjava erozivnosti dežja R, izračunane s programom RF in s pomočjo linearne enačbe $a = a_0 + a_1 \cdot T$, ter povprečne mesečne temperature T za merilni mesti Lisca in Sevno.



Slika 5: Primerjava erozivnosti dežja R, izračunane s programom RF in s pomočjo kvadratne enačbe $a = a_0 + a_1 \cdot T^2$, ter kvadrata povprečnih mesečnih temperatur T za merilni mesti Lisca in Sevno.



Slika 6: Primerjava povprečnih mesečnih padavin P in temperatur T za merilna mesta Malkovec, Lica in Sevno. Opomba k vrednostim povprečnih mesečnih padavin za merilno postajo Malkovec: podatki za to merilno postajo ne zajemajo podatkov o dneh s snežnimi padavinami, medtem ko so za drugi dve merilni mesti snežne padavine izvzete iz obravnave. Tako so prikazane vrednosti za merilno mesto Malkovec v zimskih mesecih višje v primerjavi s podatki iz postaje Lica in Sevno.



Slika 7: Primerjava izračunanih vrednosti erozivnosti dežja R po treh različnih metodah za merilno mesto Malkovec, vsakič z uporabo modela iz merilnih mest Sevno in Lisca.

pretočnih vodnih elektrarn. Za tak poseg v prostor bomo nujno morali opraviti tudi prostorsko analizo sproščanja in dotoka zemljin v akumulacijske prostore vodnih elektrarn. Za takšno analizo imamo na tem območju na voljo le dve merilni mesti ARSO, in sicer postaji Lisca in Sevno, ki ju dopolnjuje postaja Malkovec, kjer pa merijo le dnevne padavine. Na merilnih mestih Lisca in Sevno merijo tudi snežne padavine, ki pa smo jih iz tukaj opisane obravnave izločili, tako da smo dejavnik erozivnosti padavin dejansko določili kot dejavnik erozivnosti dežja. Na merilni postaji Malkovec ne razpolagamo s podatki o dnevih s snežnimi padavinami.

Najprej na osnovi razpoložljivih podatkov za merilni postaji Lisca in Sevno prikazujemo primerjave mesečnih, letnih in maksimalnih vrednosti padavin P in izračunanih erozivnosti R .

3.1 Mesečne vrednosti

Po podatkih za merilno postajo Lisca (slika 6) pade na območju postaje v obravnavanem obdobju (1997–2006) povprečno največ padavin (v tekočem stanju) v mesecu avgustu (15,20 % letne količine padavin), ko je tudi erozivnost padavin (slika 1) največja (28,56 % letne vrednosti). Najmanjša povprečna vrednost količine padavin pa je v mesecu januarju (1,37 % letne vrednosti). Takrat je tudi erozivnost padavin v tekočem stanju najmanjša (0,22 % letne vrednosti).

Na območju merilne postaje Sevno (slika 6) je v obravnavanem obdobju (1997–2006) povprečno največ padavin (v tekočem stanju) padlo v mesecu septembru (15,26 % letne količine padavin), največja erozivnost padavin (slika 1) pa je v mesecu juliju (21,62 % letne vrednosti). Najmanjša povprečna vrednost količine padavin je v mesecu januarju (0,55 % letne vrednosti). Takrat je tudi erozivnost padavin v tekočem stanju najmanjša (0,09 % letne vrednosti).

3.2 Letne vrednosti

Iz rezultatov na sliki 2 je razvidno, da se leta, ko je bila dosežena največja količina padavin P (v tekočem stanju) ne ujemajo z leti, ko je nastopilo največje število erozivnih dogodkov n , ali pa, ko je nastopilo najbolj erozivno leto. Enako velja tudi za leta z najmanjšo količino padavin, erozivnostjo ali pa z najmanjšim številom erozivnih dogodkov; tudi v tem primeru velja, da ni nujno, da ta leta sovpadajo.

3.3 Maksimalne vrednosti

Primerjava maksimalnih dogodkov v obdobju 1997–2006 za merilni mesti Lisca (preglednica 1) in Sevno (preglednica 2) kaže, da ti dogodki na obravnavanih merilnih postajah ne sovpadajo, saj se maksimalne vrednosti v obravnavanem obdobju niso pojavile sočasno niti se letne maksimalne vrednosti ne pojavijo v istem mesecu.

Preglednica 1: Maksimalni letni dogodki in njihov delež v letni vrednosti ter povprečne letne vrednosti za merilno mesto Lisca.

datum	R (MJ · mm · ha ⁻¹ · h ⁻¹)	P (mm)	E (10 MJ/ha)	delež R v letu (%)	delež R v povprečnem letu (%)
12. 6. 1997	541,21	59,4	13,33	32	31
4. 6. 1998	442,76	31,4	8,26	20	26
7. 7. 1999	284,54	65,9	10,62	13	16
29. 5. 2000	262,83	29,6	6,99	31	15
1. 7. 2001	539,91	43,0	9,93	36	31
6. 8. 2002	540,29	61,8	13,37	24	31
9. 7. 2003	190,6	28,7	6,81	28	11
7. 8. 2004	437,5	28,4	7,84	20	25
21. 8. 2005	1055,9	99,0	20,62	34	61
15. 9. 2006	111,96	46,1	6,36	15	6

Preglednica 2: Maksimalni letni dogodki in njihov delež v letni vrednosti ter povprečne letne vrednosti za merilno mesto Sevno.

datum	R (MJ · mm · ha ⁻¹ · h ⁻¹)	P (mm)	E (10 MJ/ha)	delež R v letu (%)	delež R v povprečnem letu (%)
12. 10. 1997	292,36	54,9	10,22	33	18
5. 9. 1998	231,19	59,7	10,14	12	14
1. 9. 1999	244,12	27,0	6,29	14	15
12. 6. 2000	1055,60	62,7	16,60	58	64
31. 5. 2001	195,27	48,0	8,96	17	12
24. 6. 2002	751,65	41,3	11,05	32	46
11. 9. 2003	195,40	43,5	7,35	17	12
10. 10. 2004	361,54	79,7	13,20	24	22
1. 7. 2005	405,90	46,9	9,85	17	25
25. 7. 2006	479,15	47,9	12,10	29	29

3.4 Ocena dejavnika erozivnosti R na podlagi dnevni padavin P_d in povprečnih mesečnih temperatur T

Tudi merilne postaje na izbranem območju porečja Save, to so merilne postaje Lisca, Malkovec in Sevno, predstavljajo značilne razmere glede razpoložljivosti padavinskih podatkov nujnih za oceno dejavnika erozivnosti R na podobno velikem delu slovenskega ozemlja (druge gostota merilnih mest ni bistveno drugačna). Edino merilna postaja Lisca razpolaga s podatki o srednji mesečni temperaturi T , dnevnih padavinah P_d in 5-minutno intenziteto padavin i . Na postaji Malkovec so na razpolago podatki o srednji mesečni temperaturi T in o dnevnih padavinah P_d , postaja Sevno pa omogoča merjenje 5-minutnih intenzitet padavin i ter srednjo mesečno temperaturo T . Zato je način primerjave med temi tremi postajami metodološko uporaben povsod drugod po Sloveniji, kjer moramo za določitev dejavnika erozivnosti R uporabljati tako padavinske postaje s podatki o dnevnih padavinah, kakor tudi druge postaje s podatki o 5-minutnih intenzitetah padavin.

Na sliki 4 prikazujemo rezultate izračuna erozivnosti R s programom RF in z uporabo linearne odvisnosti od srednjih mesečnih temperatur T . Na sliki 3 prikazujemo vrednosti erozivnosti R (letne vrednosti za obravnavano obdobje 1997–2006) in vrednosti vsote kvadratov dnevnih padavin (letne vrednosti za obravnavano obdobje 1997–2006). Iz prikaza vidimo, da je v obravnavanem 10-letnem obdobju ujemanje boljše za merilno mesto Lisca ($d^2 = 0,86$), precej slabše pa za merilno mesto Sevno ($d^2 = 0,56$).

V preglednici 3 podajamo izračune za obdobje 1997–2006 za mesečne vrednosti erozivnosti R , in sicer erozivnost, izračunano na podlagi podatkov o 5-minutnih intenzitetah (program RF), ter erozivnost, izračunano s pomočjo koeficienta a odvisnega od erozivnosti R in vsote kvadratov dnevnih padavin $\sum P_d^2$. Ujemanje mesečnih vrednosti na Lisci je slabše maja, julija in septembra, ko se prepletajo spomladansko-poletni oziroma poletno-jesenski padavinski režimi. Podobno je tudi v Sevnem (maja in septembra). Učinkovitost regresijske enačbe e podobno kot korelacijski koeficient meri linearno povezanost med dvema spremenljivkama, v idealnem primeru je enaka 1, ko je uporabljeni model brez napake ocene. Razlika med vrednostmi e za obe merilni mesti kaže na to, da uporabljeni model $R = a \cdot \sum P_d^2$ nekoliko bolje opiše dejansko mesečno erozivnost padavin za postajo Sevno ($e = 0,89$) kakor za postajo Lisca ($e = 0,84$). Nadalje nas je zanimalo, kako se spreminjajo preko leta vrednosti parametra a iz regresijske enačbe $R = a \cdot \sum P_d^2$ in ali lahko modeliramo njegovo spreminjanje preko leta v odvisnosti od srednjih mesečnih temperatur z uporabo linearnega in kvadratnega modela. Najprej smo uporabili linearni model.

Z linearno interpolacijo med poznanimi vrednostmi povprečnih mesečnih temperatur T in mesečnega koeficienta a (iz preglednice 3) lahko iz enačbe $a = a_0 + a_t \cdot T$ za obe merilni mesti določimo vrednosti koeficientov a_0 in a_t : $a_0 = 0,0311$ in $a_t = 0,0039$ za merilno mesto Lisca ter $a_0 = 0,0117$ in $a_t = 0,0052$ za merilno mesto Sevno (obdobje meritev 1997–2006). Nato po enačbi $a = a_0 + a_t \cdot T$ izračunamo vrednosti koeficienta a po mesecih in nato še mesečne vrednosti za učinkovitost uporabljene regresijske enačbe e . Vrednosti e za celotno obravnavano obdobje za obe obravnavani merilni postaji kažejo na dobro ujemanje rezultatov, to je ko se vrednost e približuje vrednosti 1. Tako kot pri računu koeficienta a v odvisnosti od erozivnosti R in vsote kvadratov dnevnih padavin $\sum P_d^2$, je tudi v primeru uporabe linearnega modela $a = a_0 + a_t \cdot T$ ujemanje nekoliko boljše za merilno postajo Sevno ($e = 0,8672$) kot za postajo Lisca ($e = 0,8447$). Bolj bistveno je opažanje, da če uporabimo linearni model za spreminjanje parametra a preko leta v odvisnosti od mesečnih temperatur $a = a_0 + a_t \cdot T$ ne izboljšamo učinkovitosti modela za napoved mesečne erozivnosti $R = a \cdot \sum P_d^2$, čeprav se povprečna mesečna temperatura in mesečna erozivnost dobro ujemata, kakor vidimo na sliki 4, ki prikazuje tudi primerjavo vrednosti erozivnosti R , dobljenih po različnih metodah.

Z uporabo kvadratne odvisnosti od srednjih mesečnih temperatur T dobimo za obravnavani merilni mesti Sevno in Lisca naslednje vrednosti faktorja a_0 in a_t : $a_0 = 0,0329$ in $a_t = 0,0003$ za merilno mesto Lisca ter $a_0 = 0,0208$ in $a_t = 0,0003$ za merilno mesto Sevno (obdobje meritev 1997–2006). Primerjava vrednosti R izračunanih iz podatkov o 5-minutnih intenzitetah padavin (program RF) in s kvadratno enačbo $a = a_0 + a_t \cdot T^2$ kaže na zelo dobro ujemanje rezultatov, saj vrednost učinkovitosti regresijske

Preglednica 3: Mesečne vrednosti erozivnosti dežja R , koeficienta a in učinkovitosti e za merilni mesti Lisca in Sevno.

mesec	Lisca					Sevno				
	R (model RF) (MJ · mm · ha ⁻¹ · h ⁻¹)	R (model RF) (%)	R (računski) (MJ · mm · ha ⁻¹ · h ⁻¹)	a	e	R (model RF) (MJ · mm · ha ⁻¹ · h ⁻¹)	R (model RF) (%)	R (računski) (MJ · mm · ha ⁻¹ · h ⁻¹)	a	e
januar	3,78	0,22	3,98	0,0301	0,99	1,54	0,09	1,57	0,0250	0,98
februar	5,75	0,33	5,69	0,0410	0,99	6,00	0,37	6,07	0,0497	0,92
marec	10,72	0,62	10,32	0,0349	0,86	11,48	0,70	5,64	0,0167	0,26
april	48,31	2,78	49,62	0,0420	0,86	53,07	3,24	48,83	0,0418	0,85
maj	188,30	10,85	41,87	0,0171	-2,12	118,61	7,23	33,99	0,0160	-0,96
junij	292,56	16,86	294,02	0,1546	0,77	331,54	20,22	408,13	0,2124	0,83
julij	306,04	17,64	244,26	0,1082	0,40	354,62	21,62	344,51	0,1286	0,81
avgust	495,40	28,56	409,45	0,1120	0,85	228,50	13,93	206,40	0,1004	0,83
september	180,57	10,41	79,88	0,0318	-0,39	227,50	13,87	155,03	0,0521	0,41
oktober	145,13	8,37	169,71	0,0698	0,83	235,96	14,39	186,92	0,0528	0,65
november	40,44	2,33	44,53	0,0473	0,68	61,64	3,76	52,97	0,0309	0,90
december	17,77	1,02	20,96	0,0452	0,97	9,46	0,58	9,25	0,0286	0,94
skupaj	1734,76	100,00	1374,28	-	0,84	1639,91	100,00	1459,31	-	0,89

enačbe za merilno mesto Lisca znaša $e = 0,9497$, za Sevno pa $e = 0,9010$ in sta obe vrednosti precej višji kakor v primeru uporabe linearnega modela. Zelo dobro ujemanje vrednosti vidimo tudi na sliki 5. Bistveno je torej opažanje, da če uporabimo kvadratni model za spreminjanje parametra a preko leta v odvisnosti od mesečnih temperatur $a = a_0 + a_t \cdot T^2$, s tem precej izboljšamo učinkovitost modela za napoved mesečne erozivnosti $R = a \cdot \sum P_d^2$.

Ker za merilno postajo Malkovec nismo razpolagali s podatki o 5-minutnih intenzitetah padavin, smo erozivnost R izračunali s pomočjo koeficientov a , dobljenih za merilni mesti Lisca in Sevno.

Merilno mesto Malkovec se nahaja v istem geografskem območju kot merilni mesti Lisca in Sevno, zato smo predpostavili, da je vpliv količine dnevnih padavin ter povprečnih dnevnih temperatur na erozivnost za vsa merilna mesta podoben.

Iz slike 6 vidimo, da se trendi povprečnih mesečnih temperatur v obravnavanem obdobju za vse tri postaje dobro ujemajo, po vrednostih pa sta si povsem blizu merilni mesti Malkovec in Sevno. Tudi trend padavin je za primerjane postaje podoben. Meseci z največ padavinami nastopajo poleti (za Sevno tudi v začetku jeseni), vrednosti v teh mesecih pa dosegajo podobne maksimume, in sicer pribl. 130 mm padavin v mesecu dni. Za oceno porazdelitve mesečne erozivnosti na merilnem mestu Malkovec (slika 7), kjer nimamo na voljo merjenih podatkov o 5-minutnih intenzitetah padavin in tako ne moremo neposredno izračunati mesečne erozivnosti, priporočamo uporabo modela z dnevnimi padavinami $R = a \cdot \sum P_d^2$ in kvadratnega modela $a = a_0 + a_t \cdot T^2$, razvitega za merilno mesto Lisca. Prednost merilnega mesta Lisca je v tem, da imamo na njem na voljo tako podatke o dnevnih padavinah P_d kakor tudi o 5-minutnih intenzitetah padavin ter je na tem merilnem mestu dobljena zveza med mesečno erozivnostjo in dnevnimi padavinami preverjena s podatki o dejanski mesečni erozivnosti, izračunani iz podatkov o nalivih in 5-minutnih intenzitetah padavin. Take kontrole na merilnem mestu Sevno ne moremo izvesti, ker imamo tam na voljo le podatke o dnevnih padavinah. Račun spreminjanja mesečnih erozivnosti padavin preko leta pa je na vseh treh merilnih mestih možno, ker imamo podatke o srednjih mesečnih temperaturah T , ki nastopijo v linearnem modelu $a = a_0 + a_t \cdot T$ ali kvadratnem modelu $a = a_0 + a_t \cdot T^2$.

Maksimalna vrednost povprečne mesečne erozivnosti v vseh primerih izračuna nastopi v mesecu juliju, ko sta na merilni postaji zabeležena tudi maksimuma povprečnih vrednosti padavin in temperature. Enako velja za merilno postajo Lisca, kjer je erozivnost največja v mesecu avgustu, prav tako so takrat zabeležene največje količine povprečnih mesečnih padavin in temperatur. Na merilni postaji Sevno sovpadata meseca maksimalne erozivnosti in maksimalne temperature (julij), medtem ko je mesec z največ padavinami september.

4 Sklep

Leta z največjimi padavinskimi dogodki se ne ujemajo nujno z leti z največjimi erozivnostmi padavin ali pa z največjim številom erozivnih dogodkov. To dokazuje, da erozivnost padavin ni odvisna le od količine padavin, temveč tudi njihovega od trajanja, intenzitete in drugih značilnosti.

Modela linearne ter kvadratne enačbe za odvisnost od mesečne temperature za obravnavana merilna mesta sta dobra, saj se rezultati, dobljeni s tema metodama, zelo dobro ujemajo z dejanskimi vrednostmi erozivnosti, ki smo jih dobili z uporabo RF programa. Vrednosti namreč znašajo v primeru uporabe linearne enačbe $e = 0,8672$ za merilno mesto Sevno in $e = 0,8447$ za merilno mesto Lisca; pri uporabi kvadratne enačbe pa $e = 0,9010$ za Sevno in $e = 0,9497$ za Lisca. Primerjava obeh modelov pokaže, da daje kvadratni model boljše napoved z manjšo napako. Tovrstno primerjavo med modeloma moramo opraviti še na drugih merilnih mestih v Sloveniji, predno dokončno priporočimo uporabo kvadratnega modela. Uporaba kvadratnega modela za merilno postajo Solčava je dala zadovoljive rezultate (Mikoš in ostali 2006) in govori v prid uporabe kvadratnega modela.

Glede na te zaključke smo v nadaljevanju določili erozivnost padavin še za območje merilne postaje Malkovec (slika 7), na kateri se ne izvajajo meritve 5-minutnih intenzitet padavin. Če upoštevamo,

da Malkovec leži blizu Lisce in Sevnega, za katera smo pokazali, da linearna enačba in predvsem kvadratna enačba dajeta dobre rezultate, lahko sklenemo, da je ocena erozivnosti padavin z uporabo modela kvadratne odvisnosti od mesečnih temperatur dovolj dobra ocena tudi za merilno postajo Malkovec.

V prispevku smo za tri merilna mesta meteorološke mreže Agencije Republike Slovenije za okolje pokazali, kako lahko za njih določimo letne in mesečne vrednosti dejavnika erozivnosti padavin in površinskega odtoka R , ki je osnova vrednotenja površinskega spiranja in odplavljanja prsti oziroma površinske izgube tal z uporabo metode RUSLE.

5 Viri in literatura

- Apaydin, H., Erpul, G., Bayramin, I., Gabriels, D. 2006: Evaluation of indices for characterizing the distribution and concentration of precipitation: A case for the region of Southeastern Anatolia Project, Turkey. *Journal of Hydrology* 328. Amsterdam.
- Auerswald K., Schmidt, F. 1986: Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern. Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- Brown, L. C., Foster, G. R. 1987: Storm erosivity using idealised intensity distributions. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 30. St. Joseph.
- Diodato, N. 2005: Predicting RUSLE monthly erosivity index from readily available rainfall data in Mediterranean area. *The Environmentalist* 25. Dordrecht.
- Jošt, D. 2003: Analiza merjenih padavin v Solčavi za določanje erozivnosti padavin. Diplomsko naloga, Oddelek za gradbeništvo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Lakota Jeriček, Š. 2007: Analiza agresivnosti in erozivnosti padavin v Sloveniji. Diplomsko naloga, Oddelek za gradbeništvo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Lal, R., Elliot, W. 1994: Erodibility and erosivity. *Soil erosion research methods*. St. Lucy Press. Florida.
- Maček, J. 2006: Analize erozivnosti padavin na območju Kamniško-Savinjskih Alp. Diplomsko naloga, Oddelek za gradbeništvo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Mikoš, M., Jošt, D., Petkovšek, G. 2006: Rainfall and runoff erosivity in the alpine climate of north Slovenia: a comparison of different estimation methods. *Hydrological Sciences Journal* 51-1. Wallingford.
- Petkovšek, G. 2002: Kvantifikacija in modeliranje erozije tal z aplikacijo na povodju Dragonje. Doktorsko delo, Oddelek za gradbeništvo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Petkovšek, G., Mikoš, M. 2004: Estimating the R factor from daily rainfall data in the sub-Mediterranean climate of southwest Slovenia. *Hydrological Sciences Journal* 49-5. Wallingford.
- Renard, K. G., Foster, G. A., 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). *Agriculture Handbook Number 703*. Washington.
- Skube, G. 2006: Analiza merjenih padavin v Zgornjesavski dolini. Diplomsko naloga, Oddelek za gradbeništvo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.

6 Summary: Methods for the determination of rainfall-runoff erosivity

(translated by Mojca Vilfan)

Rainfall-runoff erosivity determines the capacity or rainfall and surface runoff for soil detachment and soil washing away. To a large extent, it is a function of rainfall amount, duration and intensity, as well as of rainfall characteristics: rainfall drop size distribution, drop mass, and fall velocity. The most frequently used erosivity index is the rainfall-runoff erosivity factor R , developed by Wischmeier and

Smith as the Universal Soil Loss Equation (USLE), and its improved version: the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). In the case when all other factors, beside rainfall, are constant, after this equation the soil loss during a storm (erosive) event is directly proportional to the storm factor: the total kinetic energy of the storm E times its maximum 30-minute intensity I_{30} . For computing rainfall-runoff erosivity only those storms or erosive events with more than 12 mm rainfall are taken into account. The only exceptions to this rule are storms when in 15 minutes more than 6 mm rainfall was registered. If in 6 h less than 12 mm rainfall was registered, the single storm events were separated from each other.

In the paper, we showed the possible ways of determining rainfall-runoff erosivity using basic meteorological data that are available in the public (state) network of the Environmental Agency of the Republic of Slovenia (ARSO). The data needed for the computation of the rainfall-runoff factor R are measured by ARSO in 37 measuring stations in Slovenia, while the daily rainfall data are measured in 188 measuring stations. For an analysis of spatial variability and temporal trends in rainfall erosivity in Slovenia we need the data from a large number of rainfall gauges, therefore it makes sense to look for a relation between daily rainfall P_d (188 stations), mean monthly temperature T , and rainfall-runoff erosivity factor R (37 stations).

The possibilities for the determination of rainfall-runoff erosivity factor R for sites, where different meteorological data are available, are shown for the case of the area of the Middle Sava River. In this river reach, a chain of run-of-river hydro power plants is planned. For such a spatial intervention, an analysis of sediment supply to accumulation basins should be performed. The meteorological gauging stations in the selected area of the Middle Sava River show the typical conditions in Slovenia with regard to the data availability. In this area only three meteorological stations are present: Lisca, Malkovec, and Sevno. Only the Lisca station has all three data types available, i. e. mean air temperature T , daily rainfall P_d and 5-minute rainfall intensities i . At the Malkovec station the data on air temperature T and on daily rainfall P_d are available, and at the Sevno station the data on air temperature T and 5-minute rainfall intensities i are available. Therefore, a comparison between these three meteorological stations is methodologically a very interesting one.

On the basis of the data available for the Lisca and Sevno stations we showed the comparison between monthly, annual, and extreme values of rainfall and computed rainfall-runoff erosivity. Using the rainfall data from the Lisca station for the period from 1997 to 2006, on average the highest monthly rainfall is measured in August (15.20% of annual rainfall), when also the rainfall-runoff erosivity is highest (28.56% of the total annual erosivity). The lowest average rainfall was measured in January (1.37% of annual rainfall). In this month also the erosivity of liquid precipitation is the lowest (0.22% of the total annual erosivity). Using the rainfall data from the Sevno station for the same period from 1997 to 2006, on average the highest monthly rainfall is measured in September (15.26% of annual rainfall), but the highest rainfall-runoff erosivity was measured in July (21.62% the total annual erosivity). The lowest average rainfall was measured in January (0.55% of annual rainfall). In this month also the erosivity of liquid precipitation is the lowest (0.09% of the total annual erosivity).

The analysis shows that the years with the highest annual rainfall not necessarily correspond to those with the highest annual erosivity or highest number of erosive events. This proves that erosivity is not only a simple function of rainfall amount but also of its duration, intensity and kinetic characteristics.

Since for the Malkovec station there are no data available on rainfall intensities, the rainfall-runoff erosivity R was computed using daily rainfall data and the empirical factors determined in the stations of Lisca and Sevno. From a comparison between the resulting erosivities one may conclude that the linear and the quadratic model for the functional relationship to air temperature for the stations under investigation is relatively good, since the results obtained by these two models are correlated well with the erosivities computed directly from the measured rainfall intensities.

In this paper we showed for three measuring stations of the meteorological network of the Environmental Agency of the Republic of Slovenia, how, using these data, we can determine the annual and monthly values of factor R (rainfall-runoff erosivity factor) that is the basis for assessing soil detachment and washing away or soil loss as determined by the widely used Revised Universal Soil Loss Equation.

