

Analiza vplivnih dejavnikov na kinetično energijo dežnih kapljic

Katarina Zabret^{*,**}, Lana Radulović^{*}, Mark Bryan Alivio^{*}, Nejc Bezak^{*}, Mojca Šraj^{*}

Povzetek

Erozivnost padavin, ki vpliva na premikanje, odnašanje in spiranje površinskih zemljinskih slojev ter s tem na degradacijo tal in različne okoljske probleme, je odvisna predvsem od kinetične energije dežnih kapljic. Pri tem veliko vlogo igra tudi vegetacija s prestrežanjem padavin, saj se v procesu prestrežanja spremeni mikrostruktura dežnih kapljic, t.j. velikost, hitrost in njihovo število. Za ugotavljanje vpliva različnih dejavnikov na kinetično energijo dežnih kapljic, smo analizirali podatke o lastnostih padavinskega dogodka, kot so količina, trajanje in intenziteta padavin, število dežnih kapljic ter tudi meteorološke dejavnike kot sta temperatura zraka in hitrost vetra. Analize smo izdelali z modelom ojačanih regresijskih dreves, in sicer posebej za meritve lastnosti padavin nad krošnjami dreves ter pod krošnjo breze in krošnjo črnega bora. Ugotovili smo, da je spremenljivka, ki ne glede na lokacijo in vegetacijsko obdobje najbolj vpliva na kinetično energijo kapljic, količina padavin. Ta je povezana s številom dežnih kapljic, katerih vpliv na kinetično energijo je bil prepoznan predvsem za prepuščene padavine pod drevesi. Poleg tega v obdobju vegetacije na kinetično energijo prepuščenih dežnih kapljic pomembno vpliva tudi čas trajanja padavin, ki je povezan z nasičenjem, potrebnim za začetek kapljanja prestreženih padavin z drevesnih krošenj.

Ključne besede: prepuščene padavine, erozivnost padavin, kinetična energija, prestrežanje padavin, mikrostruktura padavin

Key words: throughfall, rainfall erosivity, kinetic energy, rainfall interception, rainfall microstructure

Uvod

Velik del površine Slovenije je podvržen eroziji zemljine (Lazarevič, 1981), zaradi katere letno izgubimo več milijonov ton prsti (Komac in Zorn, 2005; Bezak et al., 2021). Eden izmed bistvenih dejavnikov erozije, pri kateri prihaja do premikanja, odnašanja in spiranja površinskih zemljinskih slojev, je delovanje vode, pri čemer upoštevamo tudi erozijo, do katere pride zaradi padavin. Ko so tla zasičena, padavine pričnejo tvoriti površinski odtok, ki spira zemljino (Bezak et al., 2021). Poleg tega pa dežne kapljice povzročajo tudi erozijo zaradi škropljenja, ko padejo na zemljino in razpršijo med seboj nepovezane delce (Lv et al., 2023; Zambon et al., 2021). Kolikšna je erozivnost padavin, je odvisno predvsem od lastnosti padavinskega dogodka in lastnosti zemljine (Fernández-Raga et al., 2017; Zambon et al., 2021; Beczek et al., 2022; Zore et al., 2022).

Vpliv lastnosti zemljine na erozivnost padavin raziskovalci naslavljajo z različnih vidikov, izpostavljajo pa predvsem lastnosti substrata ter nasičenost zemljine. Goebes in sodelavci (2014) tako na primer predlagajo, da bi za posamezne substrate kot so grobi in fini peski ter mulji upoštevali različne za ta substrat specifične parametre erozivnosti. Da je erozivnost padavin močno odvisna tudi od heterogenosti velikosti in porazdelitve kamninskih drobcov v zemljini, pa so s primerjavo laboratorijskih testov in terenskih meritev ugotovili Jomaa in sodelavci (2012). Beczek in sodelavci (2022) so proces erozije zaradi

* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

** Inštitut za vode Republike Slovenije, Einspielerjeva 6, Ljubljana

škropljenja obravnavali kot dvofazni proces razpršitve trdnih delcev in tekočine, ki jo prispeva že padel dež. Pri tem so ugotovili, da je prenos kinetične energije iz dežnih kapljic na razpršene delce konstanten. Zambon in sodelavci (2021) pa so na primeru analize vpliva začetne zasičenosti tal na erozivnost padavin ugotovili, da hidravlična prevodnost nasičene zemljine z naraščanjem kinetične energije padavin upada.

Kinetična energija je tako poleg intenzitete prepoznana kot bistvena lastnost padavin, ki določa količino sprane zemljine (Angulo-Martínez et al., 2012). Dežne kapljice z večjo kinetično energijo, imajo večjo erozivno moč (Lv et al., 2023). Zambon in sodelavci (2021) so v simulatorju padavin spremljali erozivnost kapljic in ugotovili, da na kinetično energijo bolj kot velikost vpliva hitrost kapljic. Tako na hitrost kot tudi na velikost dežnih kapljic, ki dosežejo tla, pa pomembno vpliva vegetacija, ki tla prekriva (Ghahramani et al., 2011; Lüpke et al., 2019; Zore et al., 2022; Alivio et al., 2023; Ryzak et al., 2023). Dežne kapljice, ki pridejo v stik z vegetacijo, se na listih in vejah lahko zadržijo, tal ne dosežejo, po končanih padavinah pa izhlapijo. Te padavine imenujemo prestrežene padavine (Zabret et al., 2018). Del padavin, ki tla dosežejo tako, da prikapljujejo z vej in listov, imenujemo prepuščene padavine, odtok po deblu pa tla doseže tako, da sicer prestrežene padavine odtečejo po vejah in deblu (Zabret et al., 2018). Pri tem se poleg sprememb v količini in intenziteti padavin, ki tla dosežejo, bistveno spremenijo tudi lastnosti dežnih kapljic (Lüpke et al., 2019; Zore et al., 2022). Na to vplivajo predvsem lastnosti dreves in mikrolokacija, saj so na primer Lüpke in sodelavci (2019) pod bukvijo in smreko zabeležili v povprečju večje kapljice kot na odprtem, med tem ko so Zore in sodelavci (2022) pod brezo in borom izmerili v povprečju manjše kapljice. Spremembe v mikrostrukturi dežnih kapljic pa bistveno vplivajo tudi na spremembe v njihovi kinetični energiji (Zore et al., 2022).

Erozivnost padavin je naravni proces, ki vpliva na stanje in količino zemljine. Na erozivno moč dežnih kapljic zaradi sprememb v njihovi mikrostrukturi vpliva prerazporeditev padavin po stiku z vegetacijo. Na to, kolikšen del padavin doseže tla pod vegetacijo, vplivajo različne lastnosti padavinskega dogodka (Zabret et al., 2018; Zabret in Šraj, 2021). Da pa bi lahko ovrednotili, kako te lastnosti vplivajo na samo kinetično energijo dežnih kapljic in posledično na erozivnost padavin, smo izvedli analizo z modelom ojačanih regresijskih dreves. Cilj raziskave je določiti lastnosti padavinskega dogodka in meteoroloških pogojev med dogodkom, ki najbolj vplivajo na kinetično energijo dežnih kapljic ter ugotoviti morebitne razlike med vplivnimi dejavniki za padavine na prostem in prepuščene padavine pod drevesi.

Opis raziskovalne ploskve in metode

Meritve padavin, prepuščenih padavin ter mikrostrukture padavin izvajamo na raziskovalni ploskvi, ki obsega 600 m² in se nahaja v manjšem mestnem parku v Ljubljani ob stavbi Oddelka za okoljsko gradbeništvo UL FGG. Na zahodnem delu ploskve raste dve skupini dreves, navadni brezi (*Betula pendula* Roth.) in črna borovca (*Pinus nigra* Arnold), katerih krošnje se med seboj ne prekrivajo, vzhodni del ploskve pa obsega čistina, prekrita s travnato površino (slika 1). Brezi sta visoki 18,8 m in 19,3 m, bora pa 18,6 m in 14,6 m. Izmerjene vrednosti indeksa listne površine LAI (Li-Cor Inc., LAI-2200) za brezo se gibljejo med 0,5 m²/m² v obdobju mirovanja in 2,9 m²/m² v obdobju vegetacije, pri boru pa med 3,4 in 4,3 m²/m² v posameznih vegetacijskih obdobjih.

Padavine na prostem merimo z dvema avtomatskima dežemeroma Onset RG2-M (angl. tipping bucket), ki sta postavljena na čistini. Pod vsako skupino dreves spremljamo količino prepuščenih padavin, ki predstavljajo padavine, ki dosežejo tla pod drevesi s kapljanjem z listov in vej oziroma padejo skozi odprtine drevesne krošnje. Prepuščene padavine merimo

z dvema ostrorobnima koritoma površine 0,75 m², enim z avtomatskim merilnikom in enim z ročnim odčitavanjem. Za oceno prostorske porazdelitve prepuščenih padavin te dodatno zbiramo še z 11 premičnimi lijakastimi merilniki z ročnim praznjenjem in tehtanjem zbranih padavin. Mikrostrukturo padavin (število, hitrost in velikost dežnih kapljic) spremljamo z disdrometri (OTT Parsivel), ki so nameščeni na strehi stavbe ter pod vsako skupino dreves (slika 1). Merilna površina posameznega disdrometra je enaka 54 cm², izmerjene lastnosti dežnih kapljic pa so porazdeljene v razrede po velikosti (med 0,312 mm in 24,5 mm) in hitrosti (med 0,05 m/s in 20,8 m/s) (Zabret et al., 2017).



Slika 1 – Lokacija merilnikov padavin, prepuščenih padavin ter mikrostrukture padavin na raziskovalni ploskvi

Za analizo vpliva meteoroloških spremenljivk na kinetično energijo dežnih kapljic na prostem, pod krošnjo breze in krošnjo bora smo uporabili statistični model ojačanih regresijskih dreves. Analizo smo izvedli v programskem okolju R z uporabo paketa »gbm« (Greenwell et al., 2022). Iskali smo odvisnost med kinetično energijo (KE) dežnih kapljic na odprtem oziroma prepuščenih dežnih kapljic pod drevesi z različnimi vplivnimi spremenljivkami, ki podajajo lastnosti padavinskega dogodka. Te spremenljivke, ki smo jih v analizi upoštevali, so bile količina padavin (Pa), trajanje padavinskega dogodka (Pd), povprečna intenziteta padavin med dogodkom (Pi), maksimalna 1-minutna intenziteta padavin tekom dogodka (Pi_max), vsota števila dežnih kapljic na dogodek (DropNr), največje število dežnih kapljic na minuto tekom dogodka (DropNr_max), povprečna (Ws) in maksimalna hitrost vetra (Ws_max) dogodka ter povprečna (T) in maksimalna temperatura zraka (T_max) dogodka. Kinetično energijo padavin smo določili računsko z uporabo empirične enačbe, ki temelji na podatkih o mikrostrukturi padavin (npr. Petan, 2010; Zore, 2022; Radulović, 2023):

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

Kjer je ρ [kg/m³] gostota vode, F [mm] merilna površina disdrometra, Δt [1/60 h] interval trajanja, n_i [-] število zaznanih kapljic znotraj i -tega velikostnega razreda, $D_{a,i}$ [mm] spodnja meja premera kapljic znotraj i -tega velikostnega razreda, $D_{b,i}$ [mm] zgornja meja premera kapljic znotraj i -tega velikostnega razreda, D_i [mm] premer kapljic znotraj i -tega razreda, $v_{a,i}$ [m/s] spodnja meja hitrosti padanja kapljic znotraj i -tega hitrostnega razreda, $v_{b,i}$ [m/s]

zgornja meja hitrosti padanja kapljic znotraj i-tega hitrostnega razreda ter v_i [m/s] hitrost padanja kapljic znotraj i-tega razreda.

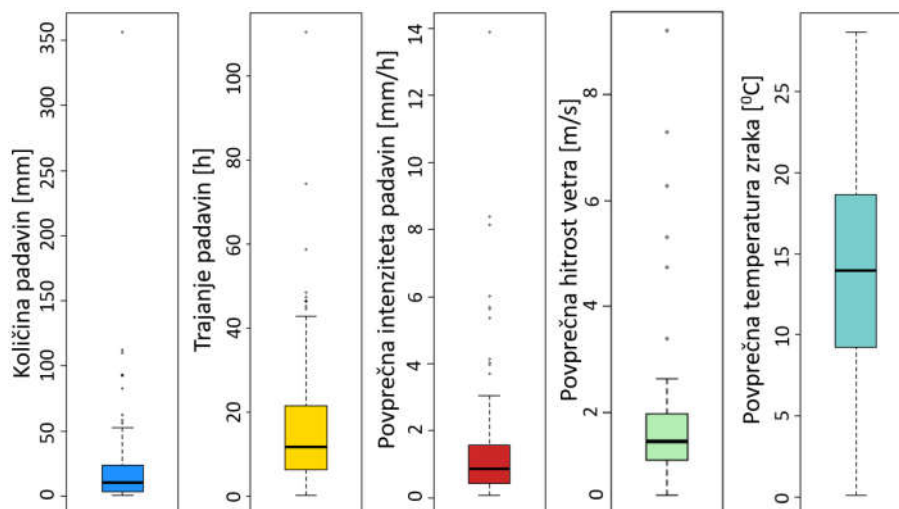
Podatke o količini, trajanju in intenziteti padavin ter lastnosti dežnih kapljic na odprtem smo pridobili iz meritev disdrometra na strehi. Za podatke o lastnostih prepuščenih dežnih kapljic pod drevesi pa smo uporabili meritve disdrometrov pod posamezno skupino dreves (slika 1). Podatke o vetru in temperaturi zraka smo izmerili na meteorološki postaji (Lufft WS700-UMB Smart Weather Sensor), locirani na stavbi Fakultete na Jamovi, oddaljeni približno 800 m od raziskovalne ploskve. Upoštevali smo eno leto meritev, in sicer padavinske dogodke, zabeležene med 12. 7. 2022 in 19. 7. 2023, ki smo jih med seboj ločili z vsaj štiriurnim obdobjem brez padavin na prostem ali prepuščenih padavin pod drevesi (Zabret et al., 2018; Zabret in Šraj, 2021). Dogodke smo razdelili na vegetacijsko obdobje, ko je krošnja breze olistana, ter na obdobje mirovanja vegetacije, ko je krošnja breze brez listov (22. 11. 2022 – 25. 4. 2023).

Rezultati in diskusija

Spomladi 2022 so na raziskovalni ploskvi pričeli delovati vsi trije disdrometri, ki omogočajo spremljanje mikrostrukture dežnih kapljic tako na odprtem kot tudi pod drevesi z različnimi lastnostmi (listavci in iglavci). V analizi smo zajeli dogodke v obdobju enega leta med 12. 7. 2022 in 19. 7. 2023. Predstavljene vrednosti so bile izmerjene z disdrometri, zato se lahko razlikujejo od vrednosti, ki so izmerjene z avtomatskimi prekucnimi merilniki.

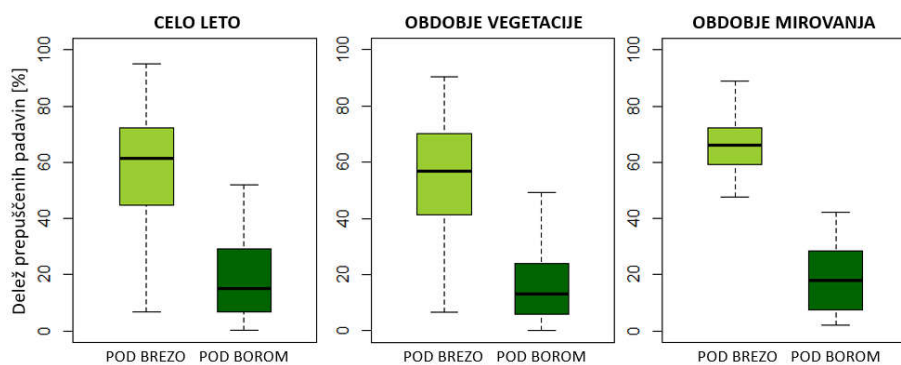
Lastnosti obravnavanih padavinskih dogodkov

V obravnavanem obdobju smo na raziskovalni ploskvi zabeležili 101 dogodek, pri katerem smo poleg padavin na odprtem zabeležili tudi prepuščanje padavin pod drevesi. Izmed teh dogodkov je bilo pet takih s sneženimi padavinami, ki smo jih izločili iz nadaljnje analize. Tako smo v obdobju vegetacije zabeležili 62 dogodkov, v obdobju mirovanja pa 22 dogodkov. Količina padavin vseh obravnavanih dogodkov je znašala 1930,4 mm in se je gibala med 1 mm in 356,5 mm na dogodek (slika 2). Dogodki so v povprečju trajali 17,0 h, najdaljši dogodek je bil zabeležen v sredini decembra 2022 in je trajal približno 3 dni (74,4 h). Povprečna intenziteta padavin pa je bila enaka 1,66 mm/h, z največjo doseženo minutno intenziteto 4,1 mm/min v avgustu 2022.



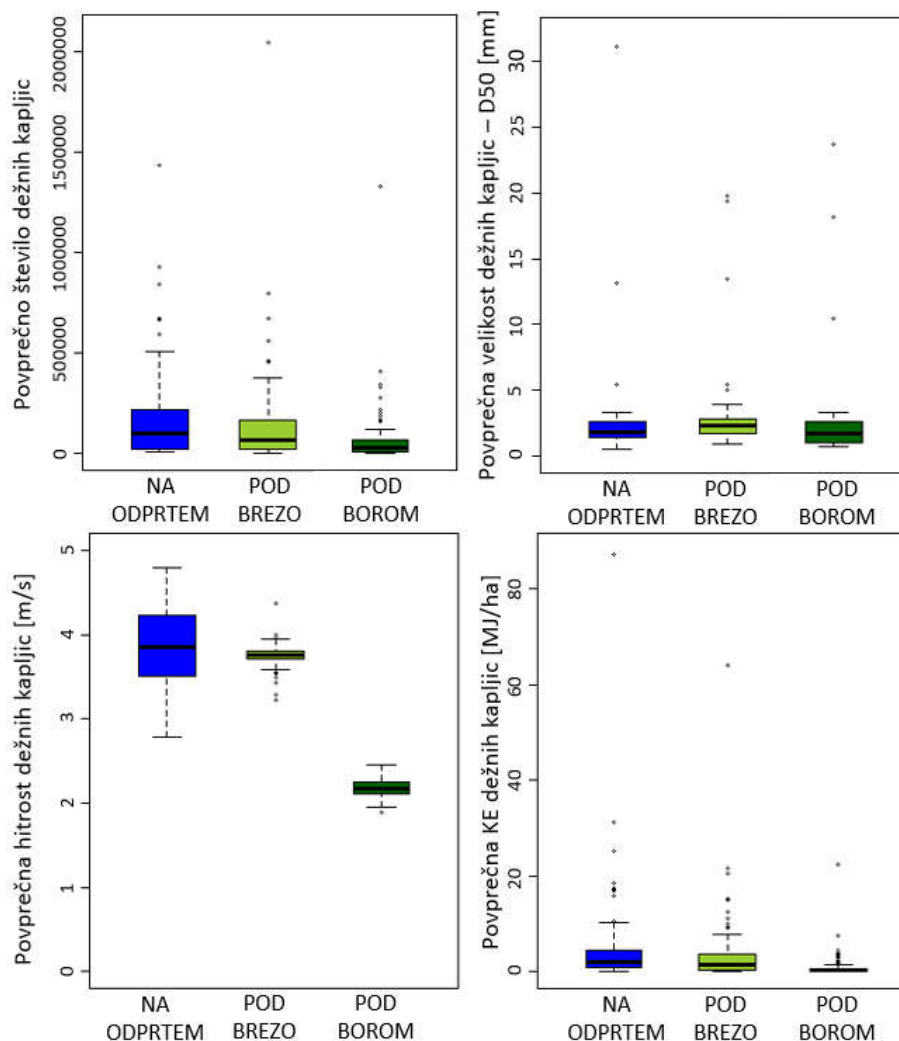
Slika 2 – Vrednosti meteoroloških spremenljivk obravnavanih padavinskih dogodkov

V celotnem analiziranem obdobju smo pod brezo izmerili 1342,6 mm prepuščenih padavin, kar predstavlja 69,5 % padavin, izmerjenih na odprtem. V povprečju je delež prepuščenih padavin znašal 56,8 % padavin na dogodek (slika 3). Padavine pod brezo smo v povprečju zabeležili približno 38 minut po začetku padavin na odprtem. Breza pričakovano prepusti manj padavin, ko je krošnja polno olistana, to je v obdobju vegetacije, ko je povprečen delež prepuščenih padavin na dogodek znašal 53,6 %. V obdobju mirovanja, ko je krošnja breze brez listja, pa je delež prepuščenih padavin v povprečju znašal 66,2 % (slika 3). Pod borom je bil delež prepuščenih padavin nižji, saj smo v celotnem obdobju izmerili 604,7 mm prepuščenih padavin, kar predstavlja 31,3 % vsote vseh padavin, izmerjenih na odprtem. V povprečju je bor prepustil 17,3 % padavin na dogodek (slika 3), med začetkom padavin na prostem in prepuščanjem padavin pod drevesom pa je v povprečju minilo skoraj dve uri (117 min). Ker je bor zimzeleno drevo, večjih razlik v deležu prepuščenih padavin po posameznih vegetacijskih obdobjih nismo opazili (slika 3). Delež prepuščenih padavin pod brezo in pod borom ustreza vrednostim v razponu, ki so jih za raziskovalno ploskev za različna obdobja meritev poročali Zabret in Šraj (2021), Zore in sodelavci (2022) ter Alivio in sodelavci (2023).



Slika 3 – Deleži prepuščenih padavin, izmerjeni pod brezo in borom v celotnem analiziranem obdobju ter v odboju vegetacije in mirovanja

Prestrežanje padavin poleg zmanjšane količine dežja, ki tla doseže pod drevesi, pomembno vpliva tudi na lastnosti dežnih kapljic (slika 4). Manjša količina prepuščenih padavin v primerjavi s padavinami na odprtem se odraža tudi v manjšem številu dežnih kapljic, ki v povprečju na dogodek dosežejo tla pod drevesi. V povprečju smo tekom dogodka na odprtem zabeležili 172.659 dežnih kapljic, pod brezo 12 %, pod borom pa kar 58 % dežnih kapljic manj. Spremenile so se tudi lastnosti dežnih kapljic (slika 4). Povprečna mediana volumskega premera dežnih kapljic na odprtem je znašala 2,5 mm na dogodek, pod brezo so bile kapljice v povprečju malenkost večje (2,8 mm), pod borom pa manjše (2,2 mm). Povprečna hitrost dežnih kapljic pa je bila podobna na odprtem in pod brezo (3,9 m/s oziroma 3,8 m/s), pod borom pa je bila opazno nižja (2,2 m/s).



Slika 4 – Povprečne lastnosti dežnih kapljic po posameznem dogodku

Podobne spremembe v mikrostrukturi dežnih kapljic pod brezo so zabeležili tudi Zore in sodelavci, ki so opazili 20 % zmanjšanje števila in 7 % zmanjšanje hitrosti prepuščenih kapljic, poleg tega pa so opazili tudi 27 % zmanjšanje premera prepuščenih dežnih kapljic pod brezo. Manjše vrednosti vseh treh parametrov pa so pod brezo zabeležili tudi Alivio in sodelavci (2023). Spremembo mikrostrukture dežnih kapljic pod listavcem in iglavcem (bukvijo in smreko) pa so opazovali tudi Lüpke in sodelavci (2019), ki so prav tako zabeležili v povprečju večje kapljice pod listavcem kot pod iglavcem, kar pripisujejo transformaciji dežnih kapljic v prepuščene padavine pretežno s kapljanjem z vej in listov. Podobno so za rdeči kitajski bor opazili tudi Li in sodelavci (2019). Ta pojav je najverjetneje tudi razlog, da smo za analizirano obdobje zabeležili v povprečju največje kapljice pod brezo in ne na prostem, kot v predhodnih študijah (slika 4).

Kinetična energija dežnih kapljic, ki neposredno vpliva na erozivnost padavin, je odvisna od velikosti kapljic in njihove hitrosti. Nižja povprečna hitrost dežnih kapljic prepuščenih padavin pod drevesi v primerjavi s hitrostjo dežnih kapljic padavin na odprtem se tako odraža tudi v nižji povprečni kinetični energiji (KE) prepuščenih dežnih kapljic. Povprečna vrednost KE kapljic tekom padavinskega dogodka v obravnavanem obdobju je namreč pod brezo za 21 % nižja, pod borom pa kar za 82 % nižja kot na odprtem (slika 4). Zabeležene vrednosti zmanjšanja kinetične energije dežnih kapljic pod drevesi so podobne 30 % zmanjšanju vrednosti pod brezo v olistani dobi (Zore et al., 2022) in 33,7 % zmanjšanju

povprečne vrednosti KE prepuščenih padavin pod brezo v celotnem analiziranem obdobju (Alivio et al., 2023).

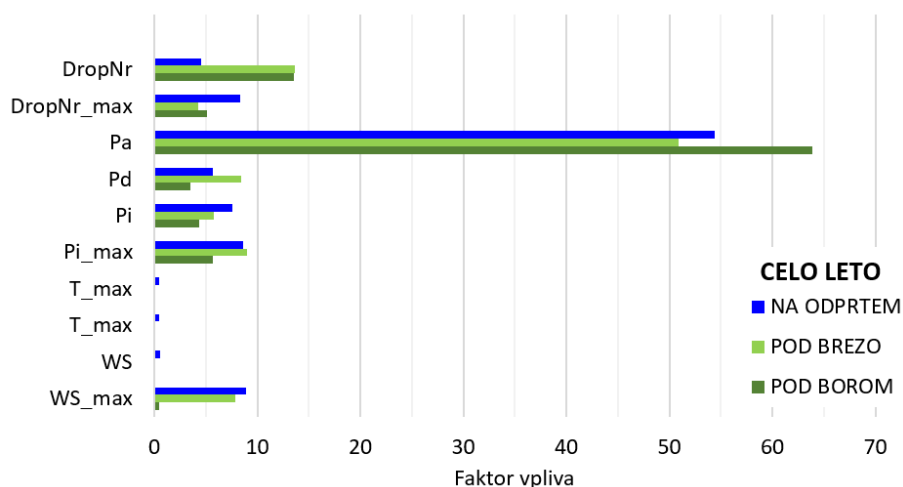
Vpliv meteoroloških spremenljivk na kinetično energijo dežnih kapljic

Vpliv lastnosti padavinskega dogodka na kinetično energijo dežnih kapljic smo ovrednotili z uporabo modela ojačanih regresijskih dreves. Poleg napovedovanja ciljne spremenljivke (v tem primeru KE), s tem modelom lahko dobimo tudi informacijo o tem, kakšen je vpliv posamezne vplivne spremenljivke (v tem primeru lastnosti padavinskega dogodka) na ciljno spremenljivko. Vrednost vpliva spremenljivke namreč podaja faktor vpliva, ki za vsako vplivno spremenljivko določi delež vpliva tako, da je vsota faktorjev vpliva posameznih spremenljivk enaka 100.

Ne glede na obdobje, ki ga v analizi upoštevamo, na kinetično energijo dežnih kapljic na vseh treh lokacijah najbolj vpliva količina padavin na prostem oziroma količina prepuščenih padavin pod drevesom (slike 5-7). V celotnem obdobju meritev vplivni faktor te spremenljivke znaša med 50 % (pod brezo) in 66 % (pod borom), v obdobju vegetacije pa se vpliv količine padavin pod drevesi zmanjša, saj na odprtem znaša 59 %, po drevesoma pa 48 % (breza) oziroma 37 % (bor). Tudi v obdobju mirovanja količina padavin najbolj vpliva na kinetično energijo dežnih kapljic na odprtem (85 %), manj pa na kinetično energijo prepuščenih dežnih kapljic (62 % in 60 % pod brezo in pod borom).

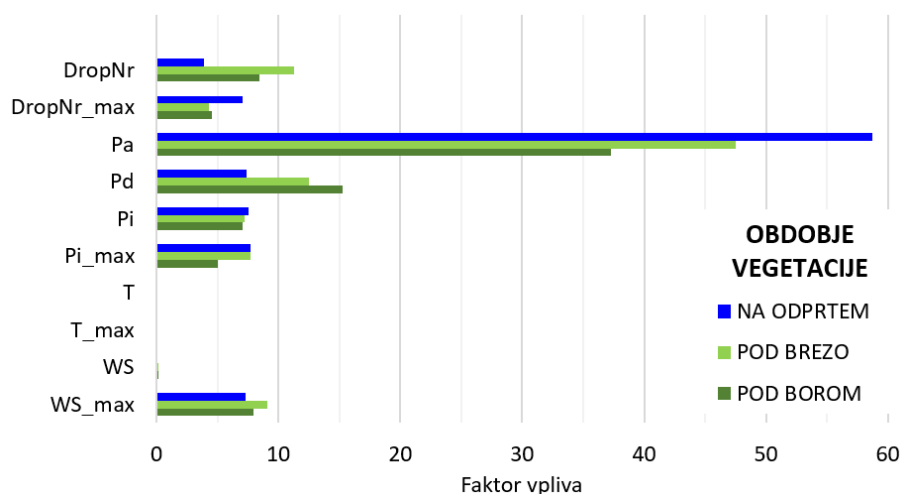
Količina padavin je tudi sicer spremenljivka, ki najbolj vpliva na prerazporeditev padavin z vegetacijo. Analiza vpliva meteoroloških spremenljivk na delež prepuščenih padavin pod brezo in borom z uporabo ojačanih regresijskih dreves je namreč prav tako pokazala, da je količina padavin najvplivnejša spremenljivka (Zabret et al., 2018). Podobno so ugotovili tudi raziskovalci v številnih drugih študijah vplivov na komponente prestrezanja padavin (Staelens et al., 2008; Šraj et al., 2008; Siegert and Levia, 2014).

V celotnem obdobju meritev na kinetično energijo dežnih kapljic na odprtem poleg količine padavin (P_a) z vplivnim faktorjem večjim od 8 % vplivajo še največja hitrost vetra izmerjena tekom dogodka (W_{S_max}), največja minutna intenziteta padavin (P_{i_max}) in največje število dežnih kapljic, zabeleženih v intervalu ene minute ($Drop_{Nr_max}$) (slika 5). Slednja spremenljivka je povezana s količino padavin in maksimalno minutno intenziteto in s tem še potrjuje vpliv že omenjenih spremenljivk. V primeru prepuščenih padavin pa je tako pod brezo kot tudi pod borom spremenljivka z drugim največjim vplivom in z vplivnim faktorjem enakim 13,5 %, število prepuščenih dežnih kapljic tekom dogodka ($Drop_{Nr}$).



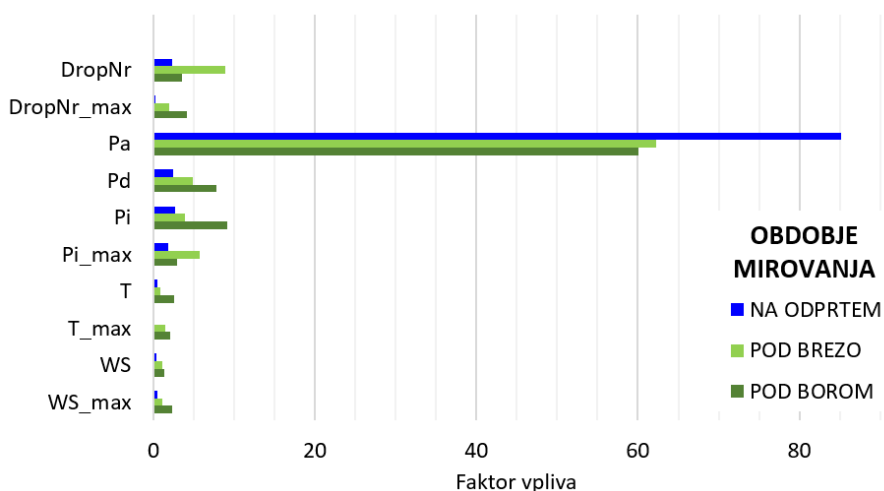
Slika 5 – Faktor vpliva posamezne vplivne spremenljivke na kinetično energijo na odprtem, pod brezo in pod borom v celotnem analiziranem obdobju

V obdobju vegetacije kinetično energijo dežnih kapljic na odprtem določajo predvsem spremenljivke, ki so neposredno povezane z lastnostmi padavinskega dogodka, to so povprečna intenziteta padavin (P_i), maksimalna minutna intenziteta padavin (P_{i_max}) in trajanje padavinskega dogodka (P_d) (Slika 6). Trajanje padavinskega dogodka je v tem obdobju tudi druga najbolj vplivna spremenljivka na KE pod obema drevesoma, kar je verjetno povezano predvsem s časom, ki je potreben, da se drevesna krošnja zasiči, kar vodi v pričetek bolj intenzivnega prepuščanja padavin. Poleg tega na KE prepuščenih padavin pod brezo in pod borom pomembneje vplivata še celotno število dežnih kapljic dogodka ($DropNr$) ter maksimalna hitrost vetra (W_{s_max}) (Slika 6).



Slika 6 – Faktor vpliva posamezne vplivne spremenljivke na kinetično energijo na odprtem, pod brezo in pod borom v obdobju vegetacije

Vpliv količine padavin (P_a) na kinetično energijo dežnih kapljic na odprtem je največji v obdobju mirovanja, ko faktor vpliva za to spremenljivko znaša kar 85 % (slika 7). Ostale tri spremenljivke, ki imajo na odprtem faktor vpliva večji od 2 %, pa so intenziteta (P_i), trajanje (P_d) in skupno število dežnih kapljic ($DropNr$) padavinskega dogodka. Pod drevesoma pa so poleg splošnih lastnosti padavinskega dogodka (P_i in P_d) tudi v obdobju mirovanja pomembne lastnosti prepuščenih dežnih kapljic, pod brezo predvsem vsota števila kapljic ($DropNr$), pod borom pa maksimalno število dežnih kapljic na minuto ($DropNr_max$).



Slika 7 – Faktor vpliva posamezne vplivne spremenljivke na kinetično energijo na odprtem, pod brezo in pod borom v obdobju mirovanja

Ne glede na vegetacijsko obdobje in lokacijo meritve, je najbolj vplivna spremenljivka, ki določa kinetično energijo dežnih kapljic, količina padavin dogodka. Tudi Geißler in sodelavci (2013), ki so se sicer osredotočili na vpliv vegetacijskih spremenljivk na kinetično energijo prepuščenih dežnih kapljic, so tekom analize potrdili pomemben vpliv količine padavin, kar velja tudi za študijo, ki so jo izvedli Brasil in sodelavci (2022). Poleg tega je bil dokaj velik vpliv prepoznani tudi za število dežnih kapljic, kar pa je povezano s količino padavin (Zabret et al., 2018). Večja količina padavin namreč pomeni večje število dežnih kapljic, s tem pa tudi bolj raznolik spekter njihovih velikosti in hitrosti. Mao in sodelavci (2023) na primer navajajo, da koncentracija števila in velikosti dežnih kapljic naraščata s količino in intenziteto dežja, zato spekter kapljic postaja vse širši, torej je možnost pojava večjih in hitrejših dežnih kapljic, ki dosežejo večjo kinetično energijo, večja. To je lahko povezano tudi z večjim premerom dežnih kapljic, ki so bile izmerjene pod brezo (Slika 4) in zabeleženim velikim vplivom števila dežnih kapljic na KE pod brezo (slike 5-7).

Izmed ostalih analiziranih lastnosti dogodka je bil za celotno obdobje meritev izpostavljen tudi vpliv maksimalne minutne intenzitete padavin na KE prepuščenih padavin pod drevesi. Podobno so tudi Li in sodelavci (2019) v analizi rezultatov meritev kinetične energije dežnih kapljic v gozdu rdečega kitajskega bora izpostavili vpliv intenzitete padavin. Marzen in sodelavci (2015) pa so se v svoji raziskavi osredotočili na vpliv vetra in ugotovili potencialno zelo velik vpliv dežja, ki pada z vetrom, na erozijo tal. Vpliv vetra na KE prepuščenih dežnih kapljic je bil z uporabljenim modelom pod drevesi prepoznani kot zanemarljiv, je bila pa maksimalna hitrost vetra, zabeležena tekom dogodka, druga najbolj vplivna spremenljivka na KE dežnih kapljic na odprtem v celotnem analiziranem obdobju. Takšen rezultat kaže na to, da drevje zmanjšuje vpliv vetra na erozivnost dežnih kapljic.

Zaključki

Kinetična energija dežnih kapljic pomembno vpliva na erozivnost padavin, zaradi katere prihaja do degradacije visokokakovostnih tal ali drugih okoljskih težav. Vegetacija zaradi prestrezanja padavin vpliva na količino dežja, ki doseže tla, pa tudi na kinetično energijo prepuščenih dežnih kapljic. Z modelom ojačanih regresijskih dreves smo pokazali, da na kinetično energijo dežnih kapljic na prostem in pod drevesi ne glede na vegetacijsko obdobje najbolj vpliva količina padavin. Ta je povezana s številom dežnih kapljic, ki pri večjih koncentracijah vplivajo na vse širši spekter kapljic in s tem na večjo možnost pojava večjih in hitrejših dežnih kapljic z večjo kinetično energijo. Poleg tega smo z analizo rezultatov uporabljenega modela pokazali tudi, da je vpliv števila dežnih kapljic bolj izrazit v primeru prepuščenih padavin pod drevesi kot padavin na odprtem. Bistvena razlika med vplivi na kinetično energijo prepuščenih padavin po posameznih vegetacijskih obdobjih pa se kaže v tem, da je v obdobju olistanosti izredno pomemben tudi čas trajanja padavin, ki vpliva na zasičenost drevesnih krošenj in s tem na pričetek obilnejšega prepuščanja padavin.

Zahvala

Raziskava, predstavljena v prispevku, je bila finančno podprta s strani Javne agencije za raziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna v okviru raziskovalnih projektov J2-4489, N2-0313, J6-4628 in raziskovalnega programa P2-0180. Raziskava je finančno podprta tudi s strani programa Evropske unije za raziskave in inovacije Horizon Europe preko projekta SpongeScapes (Grant agreement ID 101112738).

Dodatno je bila raziskava sofinancirana s strani Ministrstva za izobraževanje, znanost in šport, Medvladnega hidrološkega programa UNESCO IHP.

Reference

- Alivio, M.B., Bezak, N., Mikoš, M. (2023). The size distribution metrics and kinetic energy of raindrops above and below an isolated tree canopy in urban environment. *Urban Forestry & Urban Greening* 85, 127971.
- Angulo-Martínez, M., Beguería, S., Navas, A., Machín, J. (2012). Splash erosion under natural rainfall on three soil types in NE Spain. *Geomorphology* 175-176, 38-44.
- Beczek, M., Mazur, R., Ryżak, M., Sochan, A., Polakowski, C., Beczek, T., Bieganski, A. (2022). How much raindrop energy is used for transportation of the two-phase splashed material? *Geoderma* 425, 116034.
- Bezak, N., Petan, S., Mikoš, M. (2021). Spatial and Temporal Variability in Rainfall Erosivity Under Alpine Climate: A Slovenian Case Study Using Optical Disdrometer Data. *Frontiers in Environmental Science* 9.
- Brasil, J.B., Andrade, E.M., Araújo de Queiroz Palácio, H., Fernández-Raga, M., Carvalho Ribeiro Filho, J., Medeiros, P.H.A., Guerreiro, M.S. (2022). Canopy Effects on Rainfall Partition and Throughfall Drop Size Distribution in a Tropical Dry Forest. *Atmosphere* 13, 1126.
- Fernández-Raga, M., Palencia, C., Keesstra, S., Jordán, A., Fraile, R., Angulo-Martínez, M., Cerdà, A. (2017). Splash erosion: A review with unanswered questions. *Earth-Science Reviews* 171, 463-477.
- Ghahramani, A., Ishikawa, Y., Gomi, T., Shiraki, K., Miyata, S. (2011). Effect of ground cover on splash and sheetwash erosion over a steep forested hillslope: A plot-scale study. *CATENA* 85, 34-47.
- Geißler, C., Nadrowski, K., Kühn, P., Baruffol, M., Bruelheide, H., Schmid, B., Scholten, T. (2013). Kinetic energy of throughfall in subtropical forests of SE China - effects of tree canopy structure, functional traits, and biodiversity. *PloS One* 8, e49618.
- Goebes, P., Seitz, S., Geißler, C., Lassu, T., Peters, P., Seeger, M., Nadrowski, K., Scholten, T. (2014). Momentum or kinetic energy – How do substrate properties influence the calculation of rainfall erosivity? *Journal of Hydrology* 517, 310-316.
- Greenwell, B., Boehmke, B., Cunningham, J. (2022). Package 'gbm'. Dostopno na: <https://cran.r-project.org/web/packages/gbm/gbm.pdf>
- Jomaa, S., Barry, D.A., Brovelli, A., Heng, B.C.P., Sander, G.C., Parlange, J.Y., Rose, C.W. (2012). Rain splash soil erosion estimation in the presence of rock fragments. *CATENA* 92, 38-48.
- Komac, B., Zorn, M. (2005). Soil erosion on agricultural land in Slovenia – measurements of rill erosion in the Besnica valley. *Acta geographica Slovenica* 45, 53-86.
- Lazarević, R. (1981). Erozija zemljišta u Jugoslaviji. *Geographica Iugoslavica* 3, 7-17.
- Li, G, Wan, L., Cui, M., Wu, B., Zhou, J. (2019). Influence of Canopy Interception and Rainfall Kinetic Energy on Soil Erosion under Forests. *Forests* 10, 509.
- Lüpke, M., Leuchner, M., Levia, D., Nanko, K., Iida, S., Menzel, A. (2019). Characterization of differential throughfall drop size distributions beneath European beech and Norway spruce. *Hydrological Processes* 33, 3391-3406.
- Lv, L., Li, Y., Zhou, C. (2023). Mechanistic analysis of splash erosion on loess by single raindrop impact: Interaction of soil compaction, water content, and raindrop energy. *Biosystems Engineering* 236, 238-247.

- Mao, W., Zhang, W., Kou, M. (2023). Statistical characteristics of raindrop size distribution during rainy seasons in complicated mountain terrain. *Hydrology and Earth System Sciences* 27, 3895-3910.
- Marzen, M., Iserloh, T., Casper, M.C., Ries, J.B. (2015). Quantification of particle detachment by rain splash and wind-driven rain splash. *CATENA* 127, 135-141.
- Petan, S., Rusjan, S., Vidmar, A., Mikoš, M. (2010). The rainfall kinetic energy–intensity relationship for rainfall erosivity estimation in the mediterranean part of Slovenia. *Journal of Hydrology* 391, 314-321.
- Radulović, L. (2023): Vpliv prestrežanja padavin na mikrostrukturo padavin. Diplomska naloga. Univerza v Ljubljani, FGG, 56 pp.
- Ryżak, M., Beczek, M., Mazur, R., Sochan, A., Gibała, K., Polakowski, C., Bieganski, A. (2023). The splash of a single water drop on selected coniferous plants. *Forest Ecology and Management* 541, 121065.
- Siegert, C.M., Levia, D.F. (2014). Seasonal and meteorological effects on differential stemflow funneling ratios for two deciduous tree species. *Journal of Hydrology* 519, 446-454.
- Staelens, J., De Schrijver, A., Verheyen, K., Verhoest, N.E.C. (2008). Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrological Processes* 22, 33-45.
- Šraj, M., Brilly, M., Mikoš, M. (2008). Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. *Agricultural Forest Meteorology* 148, 121-134.
- Zabret, K., Rakovec, J., Mikoš, M., Šraj, M. (2017). Influence of Raindrop Size Distribution on Throughfall Dynamics under Pine and Birch Trees at the Rainfall Event Level. *Atmosphere* 8, 240.
- Zabret, K., Rakovec, J., Šraj, M. (2018). Influence of meteorological variables on rainfall partitioning for deciduous and coniferous tree species in urban area. *Journal of Hydrology* 558, 29-41.
- Zabret K., Šraj M. (2021). Relation of influencing variables and weather conditions on rainfall partitioning by birch and pine trees. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 69, 456-466.
- Zambon, N., Lolk Johannsen, L., Strauss, P., Dostal, T., Zumr, D., Cochrane, T.A., Klik, A. (2021). Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall. *CATENA* 196, 104827.
- Zore, A., Bezak, N., Šraj, M. (2022). The influence of rainfall interception on the erosive power of raindrops under the birch tree. *Journal of Hydrology* 613, 128478.