

UDK/UDC: 551.577.5:582.47(497.4)

Prejeto/Received: 10.12.2023

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 20.02.2024

DOI: [10.15292/acta.hydro.2023.04](https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2023.04)

Objavljeno na spletu/Published online: 29.02.2024

VPLIV VEGETACIJE NA MIKROSTRUKTURO IN EROZIVNOST PADAVIN THE INFLUENCE OF VEGETATION ON THE MICROSTRUCTURE AND EROSIVITY OF PRECIPITATION

Lana Radulović¹, Nejc Bezak¹, Mojca Šraj^{1,*}

¹ Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, Ljubljana, Slovenija

Izvleček

Proces prestrežanja padavin, pri katerem vegetacija zadržuje padavine, v veliki meri vpliva na naravne procese, kot je erozija tal. Za ovrednotenje tega vpliva so potrebne meritve mikrostrukture padavin s sodobno merilno opremo, ki omogoča spremljanje hitrosti, velikosti in števila dežnih kapljic. Podatke o mikrostrukturi padavin smo pridobili s pomočjo 1-minutnih meritev treh optičnih disdrometrov, nameščenih pod krošnjo breze, pod krošnjo črnega bora in nad krošnjami dreves. V obravnavanem obdobju med 12. julijem 2022 in 16. februarjem 2023 smo zabeležili 48 padavinskih dogodkov, za katere smo izračunali čas trajanja, količino padavin, povprečno intenziteto padavin in lastnosti dežnih kapljic, tj. velikost, hitrost in število kapljic. Dodatno smo izračunali še kinetično energijo (KE), maksimalno 30-minutno intenziteto ($\max I_{30}$) in dejavnik erozivnosti padavin (R). Vse omenjene spremenljivke smo izračunali za meritve nad krošnjami dreves in pod njimi. Rezultati kažejo, da se delež prestreženih padavin s časom trajanja dogodkov zmanjšuje tako pri brezi kot pri boru. Kapljice so se pri prehodu skozi drevesne krošnje v obdobju vegetacije v povprečju povečale, v obdobju mirovanja vegetacije pa zmanjšale. V celotnem obravnavanem obdobju se je premer kapljic v povprečju povečal pod brezo za 46 %, pod borom za 26 %. Hitrost kapljic se je pod borom v povprečju zmanjšala za 38 %, pod brezo pa povečala za 1 %, kar je posledica povečanja povprečne hitrosti pod brezo v obdobju mirovanja za 7 %. Analiza rezultatov kaže, da ima prestrežanje padavin velik vpliv na erozijo tal, saj se je npr. dejavnik erozivnosti padavin in odtoka (R) zaradi spremenjenih lastnosti kapljic zmanjšal pod brezo za 43 %, pod borom pa kar za 90 %.

Ključne besede: Prestrežanje padavin, mikrostruktura padavin, disdrometer, erozivnost padavin, breza, črni bor, Slovenija.

Abstract

The process of precipitation interception, in which vegetation retains precipitation, has a major influence on natural processes such as soil erosion. Assessing this influence requires measurements of the microstructure of precipitation using modern instruments that allow measurements of the velocity, size, and number of raindrops. The precipitation microstructure data were obtained using 1-minute measurements from three

¹ Stik / Correspondence: mojca.sraj@fgg.uni-lj.si

© Radulović, L. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0](#).

© Radulović L. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – NonCommercial – ShareAlike 4.0 Licence](#).

optical disdrometers placed under the birch canopy, under the black pine canopy and above the canopies. In the period under consideration between 12 July 2022 and 16 February 2023, 48 rainfall events were recorded, for which the duration, the amount of precipitation, the average intensity of precipitation, and the characteristics of the raindrops (size, velocity, and number of drops) were calculated. Additionally, the kinetic energy (KE), the maximum 30-minute intensity (max I_{30}), and the rainfall erosivity factor (R) were calculated. All these variables were calculated for measurements above and below the tree canopies. The results show that the proportion of intercepted precipitation decreases with the duration of the events for both birch and pine. Droplets increased on average during the leafed period, as they passed through the tree canopy, and decreased during the leafless period. During the entire period, the diameter of the droplets increased on average by 46% under birch and by 26% under black pine. The droplet velocity decreased on average by 38% under the pine, while it increased minimally under the birch by 1%, which is the result of an increase in the average velocity under the birch during the leafless period by 7%. The analysis of the results shows that the rainfall interception has a large impact on soil erosion, as, for example, the rainfall erosivity factor (R) under birch decreased by 43% and under pine by 90%.

Keywords: Rainfall interception, rainfall microstructure, disdrometer, rainfall erosivity, birch, black pine, Slovenia.

1. Uvod

Prestrežanje padavin zaradi vegetacije je pomemben del hidrološkega kroga in vpliva tudi na druge naravne procese, na primer na erozijo tal. Različne vrste vegetacije v različnih časovnih obdobjih prestrezajo padavine na različne načine in tako v veliki meri vplivajo na hidrološki in ekološki krog.

Raziskovanje prestrežanja padavin je pomembno tako v naravnem kot tudi v urbanem okolju. V zadnjem času raziskovalci čedalje več pozornosti namenjajo pomenu dreves v urbanem okolju za upravljanje s padavinskim odtokom in zmanjševanje erozije tal (Kermavnar in Vilhar, 2017; Kirnbauer et al., 2013; Zabret in Šraj, 2019, 2015; Zore et al., 2022). Posamezna drevesa in nasadi (npr. parki) v urbanih območjih predstavljajo del zelene infrastrukture, ki je glavna tematika novih nacionalnih in mednarodnih smernic in strategij ("Green Infrastructure," 2018; "Resolucija o Strategiji prostorskega razvoja Slovenije 2050," 2023; "UN Sustainable Development Goals," 2023).

Padavine ob stiku z drevesno krošnjo, podrastjo in steljo pod drevesi posledično vplivajo tudi na erozivnost padavin, saj se v procesu prestrežanja padavin bistveno spremeni mikrostruktura padavin (velikost, hitrost in število dežnih kapljic) (Alivio et al., 2023; Nanko et al., 2020; Zore et al., 2022).

Poleg zmanjševanja biodiverzitete in organskih snovi je erozija tal zaradi padavin eden izmed negativnih vplivov na tla. Erozivnost padavin ima lahko med drugim negativne vplive na poljedelstvo, kot je npr. erozija tal na najbolj rodovitnih območjih, kakovost vode in ekološke pogoje v vodotokih.

Raziskovanje vpliva prestrežanja padavin na lastnosti dežnih kapljic (imenovano tudi porazdelitev velikosti kapljic (*angl. drop size distribution, DSD*)) pod drevesno krošnjo je bilo z optičnimi disdrometri prvič izvedeno pred 30 leti (Hall in Calder, 1993). Od takrat je bilo izvedenih že relativno veliko študij (Alivio et al., 2023; Levia et al., 2017; Nanko et al., 2016, 2006; Zore et al., 2022). Ne glede na to pa raziskovalcem še ni uspelo odgovoriti na vsa odprta raziskovalna vprašanja o vplivu prestrežanja padavin na mikrostrukturo prepuščenih padavin. Razlog je verjetno v kompleksnosti procesa, študije na tem področju pa so redke. Pred kratkim so Blöschl in sodelavci (Blöschl et al., 2019) določili 23 glavnih nerešenih vprašanj v hidrologiji, med katerimi je naslovljeno tudi vprašanje vpliva sprememb rabe tal in erozije na vodo in energijo na zemeljskem površju.

Slovenija spada med države z najvišjo stopnjo erozije tal v EU (Panagos et al., 2015). Eden izmed razlogov za to je vsekakor visoka erozivnost padavin, ki je značilna za ta del Evrope (Bezák et al., 2015; Panagos et al., 2015; Petan et al., 2010).

Znanje o prestrezanju padavin bo izrednega pomena v prihodnosti, ko lahko pričakujemo pogostejše in intenzivnejše ekstremne padavinske dogodke z visoko stopnjo erozivnosti padavin (Burt et al., 2016).

Glavni cilj raziskave je ugotoviti vpliv različnih vrst dreves na mikrostrukturo prepuščenih padavin (hitrost kapljic, velikost kapljic, število kapljic) in na podlagi meritev in dobljenih rezultatov ugotoviti erozivnost posameznih padavinskih dogodkov v obdobju meritev. Dodatno smo želeli ugotoviti, kakšen je vpliv na mikrostrukturo padavin v različnih fenoloških obdobjih.

2. Podatki in metode

2.1 Raziskovalna ploskev in podatki

Raziskovalna ploskev se nahaja na Hajdrihovi 28, v Ljubljani (slika 1). Njena površina znaša približno 600 m². Območje spada v subalpsko podnebje, z morskimi in subkontinentalnimi vplivi. Povprečna letna količina padavin območja znaša 1380 mm (Zabret et al., 2018, 2017; Zabret in Šraj, 2018).



Slika 1: Raziskovalna ploskev meritev prestrezanja padavin na Hajdrihovi 28 v Ljubljani (foto: Lana Radulović, 2023).

Figure 1: Research plot of rainfall interception measurements at Hajdrihova 28 in Ljubljana (photo: Lana Radulović, 2023).

Raziskava vključuje meritve padavin in njihovih lastnosti nad in pod krošnjami dveh drevesnih

skupin, in sicer skupine navadnih brez (*Betula pendula* Roth.) in skupine črnih borov (*Pinus nigra* Arnold). Meritve so bile izvedene z optičnimi disdrometri OTT Parsivel (OTT Hydromet, 2016), enim na strehi objekta na Hajdrihovi 28 za meritve nad drevesnimi krošnjami, enim pod krošnjo breze in enim pod krošnjo bora (slika 2). Z disdrometri smo pridobili časovne nize podatkov 1-minutnih vrednosti števila kapljic, hitrosti in premera kapljic, hkrati pa tudi podatke o količini in intenziteti padavin.

Disdrometer zaznane kapljice razdeli po velikostnih in hitrostnih razredih. Kapljice so razdeljene v 32 hitrostnih in 32 velikostnih razredov (skupaj $32 \times 32 = 1024$ razredov). Srednje velikosti posameznih razredov se gibljejo med 0,062 mm (najnižji razred) in 24,5 mm (najvišji razred). Srednje hitrosti posameznih razredov pa se gibljejo med 0,05 m/s (najnižji razred) in 20,8 m/s (najvišji razred) (OTT Hydromet, 2016).

V raziskavi smo obravnavali obdobje meritev med 12. julijem 2022 in 16. februarjem 2023. V omenjenem 7-mesečnem obdobju je bilo zabeleženih 48 padavinskih dogodkov s količino padavin, večjo od 1 mm. Padavinski dogodki so bili določeni tako, da jih ločuje vsaj 4-urno suho obdobje, ki predstavlja povprečen čas, ko se krošnje posušijo (Zabret in Šraj, 2019). Za vsak padavinski dogodek smo izračunali čas trajanja, količino padavin, povprečno intenziteto padavin in lastnosti dežnih kapljic (velikost, hitrost in število kapljic). Dodatno smo izračunali še kinetično energijo (KE), maksimalno 30-minutno intenziteto ($\max I_{30}$) in dejavnik erozivnosti padavin in odtoka (R).

Celotno obravnavano obdobje smo razdelili na dve glavni fenološki fazi, in sicer obdobje vegetacije (z listjem) in obdobje mirovanja (brez listja). Datum prehoda iz ene faze v drugo smo določili glede na meritve indeksa listne površine (LAI) z instrumentom LAI2200C (LI-COR, 2023). Na tak način je bil 21. november 2022 določen za konec obdobja vegetacije in hkrati začetek obdobja mirovanja.



Slika 2: Disdrometri na raziskovalni ploskvi, nameščeni na strehi (levo), pod krošnjo breze (sredina) in pod krošnjo črnega bora (desno) (foto: Lana Radulović, 2023).

Figure 2: Disdrometers on the research plot, installed on the roof (left), under the birch canopy (middle), and under the black pine canopy (right) (photo: Lana Radulović, 2023).

2.2 Mikrostruktura padavin

Princip delovanja disdrometra OTT Parsivel temelji na laserskem senzorju, ki proizvaja vodoravni trak svetlobe. Disdrometer OTT Parsivel je sestavljen iz sprejemnika in oddajnika, ki sta integrirana v eno samo zaščitno ohišje. Senzor zazna vsako prekinitve laserskega traku. Hitrost kapljic določi iz velikosti prekinitve, premer pa iz časa prekinitve. Merilna površina disdrometra je 180×30 mm (OTT Hydromet, 2016).

Pri analizi velikosti kapljic smo namesto povprečnega premera kapljic upoštevali mediano volumskega premera (D_{50}), za katerega velja, da je polovica volumna padavin v kapljicah z manjšim premerom, polovica pa v kapljicah z večjim premerom. D_{50} (angl. *median-volume drop diameter, MVD*) smo izračunali za vsak padavinski dogodek posebej po enačbi 1 (Nanko et al., 2016) iz podatkov, ki smo jih pridobili z optičnimi disdrometri.

$$D_{50} = b_i + \left(\frac{0,5 - cum_{i-1}}{pro_i} \right) * (b_{i+1} - b_i), \quad (1)$$

kjer je D_{50} [mm] premer kapljice, b_i [mm] mejne vrednosti velikostnih razredov, pro_i [-] delež spektra vsebnosti vode v razredu, cum_{i-1} [-] kumulativni delež spektra v razredu, pri čemer je trenutni razred označen z i .

Hitrost dežne kapljice je odvisna od premera kapljice. Pri kapljicah večjih od 0,3 mm je hitrost odvisna od njihovega kvadratnega korena, pri kapljicah manjših od 0,3 mm pa je hitrost linearno odvisna od premera (Zabret et al., 2017).

2.3 Erozivnost padavin

Za ocenjevanje erozije tal se pogosto uporablja metodologija RUSLE (Petan et al., 2010; Renard et al., 1997). V enačbi RUSLE nastopa tudi pomemben dejavnik erozivnosti padavin in odtoka (R). R lahko izračunamo po enačbi 2 (Renard et al., 1997):

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

kjer je R [$\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$] dejavnik erozivnosti padavin in odtoka, E [MJ/ha] letno povprečje vsote produktov KE padavin (glej enačbo 3), I_{30} [mm/h] maksimalna 30-minutna intenziteta padavin (razlaga v nadaljevanju), N [-] število let, v katerih so padavinski dogodki nastopili.

Maksimalna 30-minutna intenziteta (I_{30}) je največja intenziteta padavin v času 30 minut. Vrednost I_{30} je pomembna, ker zagotavlja merilo največje količine padavin, ki se lahko pojavi v kratkem časovnem obdobju. Če so padavine zelo močne kratak čas, lahko povzročijo površinski odtok in erozijo tal.

Zato je razumevanje I_{30} ključnega pomena pri upravljanju in preprečevanju erozije tal na določenem območju.

Kinetična energija (KE) padavin je odvisna od hitrosti kapljic. KE lahko izračunamo s pomočjo empiričnih enačb na podlagi intenzitete padavin ali

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

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 velikostnega 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, v_i [m/s] hitrost padanja kapljic znotraj i -tega hitrostnega razreda.

3. Rezultati

3.1. Osnovne lastnosti padavinskih dogodkov in prestrežene padavine

Čas trajanja posameznih padavinskih dogodkov smo določili glede na meritve padavin nad krošnjami z disdrometrom, postavljenim na strehi objekta. Časovni razmik med dogodki je bil glede na pretekle izkušnje minimalno 4 ure. Najkrajši dogodek v obravnavanem obdobju je trajal 1 uro in 25 min (24. 01. 2023), najdaljši pa je trajal 110 ur in 42 min (15.–19. 01. 2023). Mediana trajanja vseh 48 padavinskih dogodkov je 13 ur.

Vsota količine padavin nad krošnjami za obravnavane padavinske dogodke je znašala 1252,5 mm (na podlagi meritev disdrometra na strehi objekta). Količina padavin pod krošnjama breze in bora je bila zaradi prestrežanja padavin precej manjša. Pod krošnjo breze je bilo izmerjenih 862,7 mm prepuščenih padavin, kar pomeni, da je breza prestregla v povprečju 31 % skupne količine padavin in ta delež je v večji meri izhlapel v ozračje. Bor je v obravnavanem obdobju zadržal precej

iz porazdelitve padavinskih delcev (DSD) (Petan et al., 2010). V raziskavi je $KE(dsd)$ [J m⁻² h⁻¹] izračunana iz porazdelitve padavinskih delcev. Izračun je narejen za vse obravnavane padavinske dogodke s podatki meritev z disdrometrom z uporabo enačbe 3 (Petan, 2010):

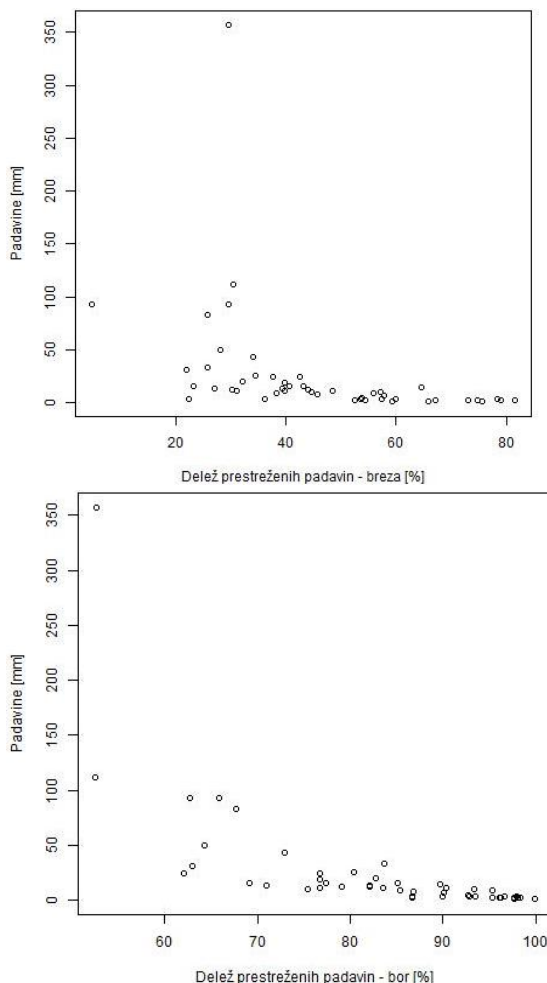
večjo količino padavin, in sicer v povprečju 66 % skupne količine padavin, saj je bilo pod borom izmerjenih 427,1 mm prepuščenih padavin. V preglednici 1 so prikazane minimalne, povprečne in maksimalne količine padavin nad krošnjami ter prepuščenih padavin pod krošnjama breze in bora v celotnem obravnavanem obdobju ter ločeno v obdobjih vegetacije in mirovanja. Deleži prestreženih padavin po posameznih dogodkih in za obe obravnavani drevesi so prikazani na sliki 3.

Preglednica 1: Količina padavin obravnavanih padavinskih dogodkov nad krošnjami in prepuščenih padavin pod krošnjama breze in bora.

Table 1: The amount of precipitation of the considered precipitation events above the canopies and the amount of throughfall under the canopies of birch and black pine.

Količina padavin [mm]	Celotno obdobje [mm]	Obdobje vegetacije [mm]	Obdobje mirovanja [mm]
Nad krošnjami			
min	1,0	1,0	1,1
povprečje ± st. dev.	26,1 ± 54,5	25,0 ± 61,9	28,8 ± 29,8
maks	356,5	356,5	93,1
skupaj	1252,5	849,7	402,8
Pod krošnjo breze			
min	0,3	0,3	0,5
povprečje ± st. dev.	18,0 ± 39,5	16,6 ± 43,9	21,2 ± 25,3
maks	251,2	251,2	88,3
skupaj	862,7	565,3	297,4

Pod krošnjo bora			
min	0,0	0,0	0,0
Povprečje ± st. dev.	8,9 ± 25,5	8,8 ± 29,5	9,1 ± 11,2
maks	168,8	168,8	34,5
skupaj	427,1	300,2	126,9



Slika 3: Delež prestreženih padavin breze in bora glede na količino padavin nad krošnjami za vse obravnavane dogodke (Radulović, 2023).

Figure 3: The proportion of intercepted precipitation for birch and black pine in relation to the precipitation above the canopy for all precipitation events (Radulović, 2023).

3.2. Število dežnih kapljic

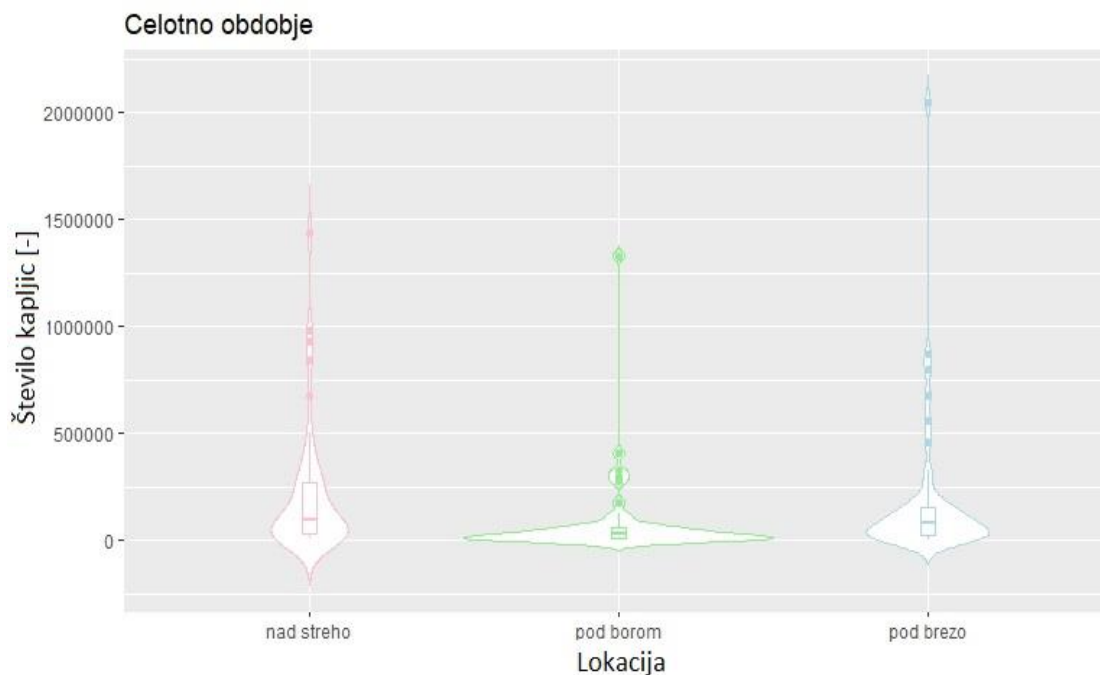
V celotnem obdobju opazovanja je nad krošnjami dreves v obravnavanih padavinskih dogodkih padlo skupaj 10.283.097 kapljic, povprečno 214.231 kapljic na dogodek. V istem obdobju je pod krošnjo breze padlo skupaj 8.722.023, povprečno 181.709 kapljic na dogodek, pod krošnjo bora pa 4.012.797 kapljic, povprečno 83.600 kapljic na dogodek.

Iz rezultatov je razvidno, da je pod brezo padlo za približno 15 % manj kapljic kot nad njeno krošnjo. Pod krošnjo bora pa je bilo število kapljic kar za 61 % manjše kot nad njo in za 54 % manjše kot pod krošnjo breze (sliki 4 in 5).

Če celotno obdobje razdelimo na obdobje vegetacije in obdobje mirovanja, dobimo še dinamiko vpliva prisotnosti listja na število kapljic (slika 6). V obdobju vegetacije je nad krošnjami padlo skupaj 4.962.044 kapljic, povprečno 103.376 kapljic na dogodek. V istem obdobju je pod krošnjo breze padlo skupaj 5.099.716, povprečno 106.244 kapljic na dogodek, pod krošnjo bora pa 2.746.970 kapljic oz. povprečno 57.229 kapljic na dogodek. V obdobju, ko je bila breza olistana, se je število kapljic pod njeno krošnjo povečalo za 3 % glede na število kapljic nad njo. Pod borom pa se je v tem obdobju število kapljic zmanjšalo za 45 %.

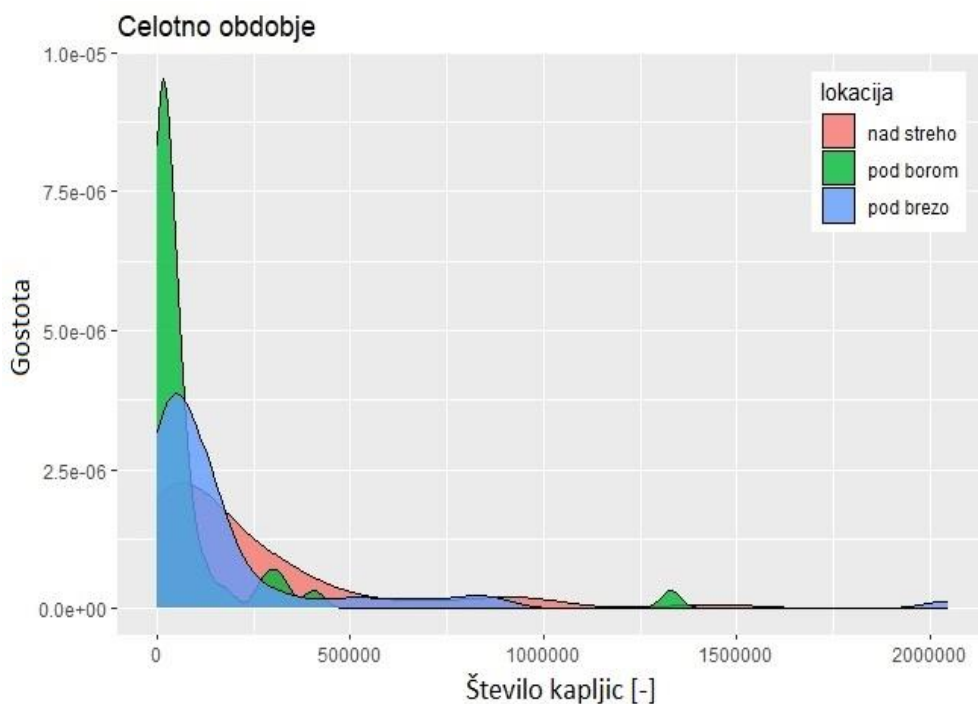
3.3. Velikost dežnih kapljic

Premer kapljic (D50) obravnavanih padavinskih dogodkov je v celotnem obravnavanem obdobju nad krošnjami v povprečju znašal 2,20 mm, pod krošnjo breze 3,21 mm, pod krošnjo bora pa 2,75 mm. D50 pod drevesnimi krošnjami se je v povprečju glede na celotno obravnavano obdobje povečal. Pod krošnjo breze se je povečal za 46 %, pod krošnjo bora pa za 26 %.



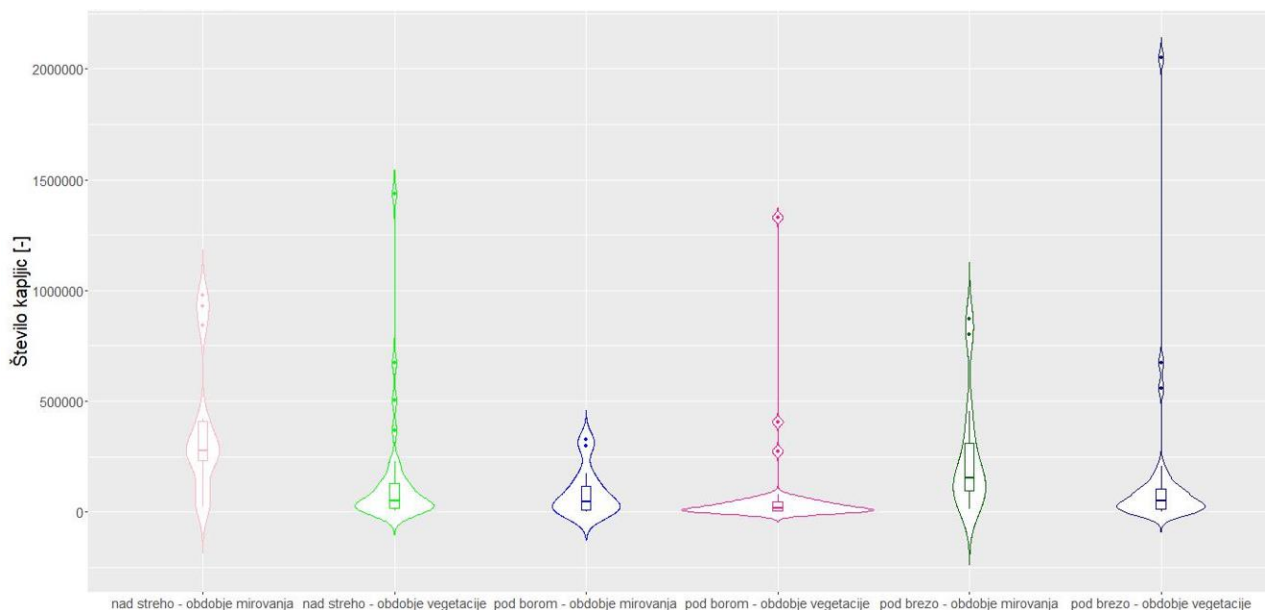
Slika 4: Število kapljic nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora za celotno obravnavano obdobje (Radulović, 2023).

Figure 4: The number of drops above the canopies and below the birch and pine canopies for the entire considered period (Radulović, 2023).



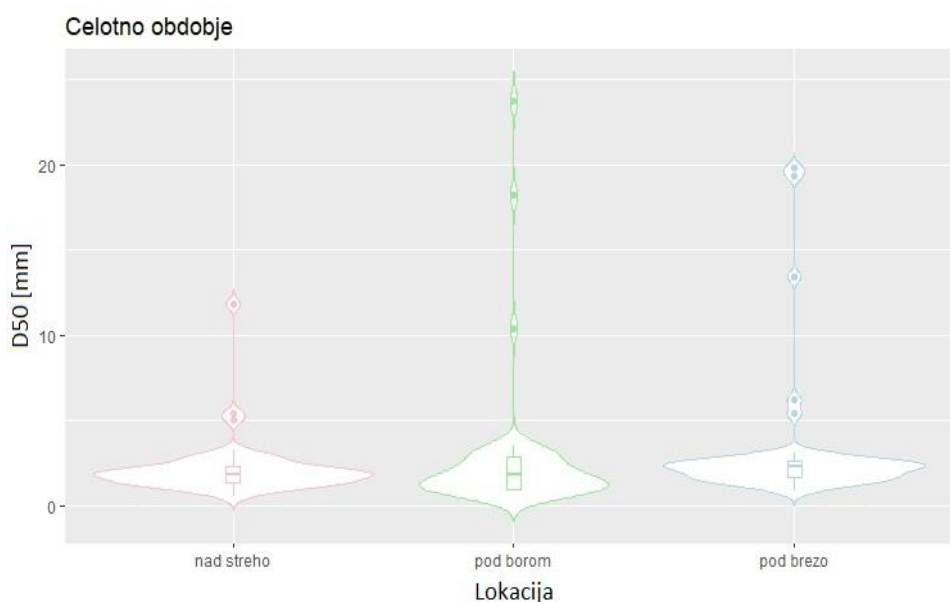
Slika 5: Gostota verjetnosti števila kapljic nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora za celotno obravnavano obdobje (Radulović, 2023).

Figure 5: Probability density of the number of drops above the canopies and below the birch and pine canopies for the entire considered period (Radulović, 2023).



Slika 6: Število kapljic nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora ločeno za obdobje vegetacije in obdobje mirovanja (Radulović, 2023).

Figure 6: The number of drops above the canopies and below the birch and pine canopies according to the leafed and leafless periods (Radulović, 2023).



Slika 7: Premer kapljic (D50) nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora za celotno obravnavano obdobje (Radulović, 2023).

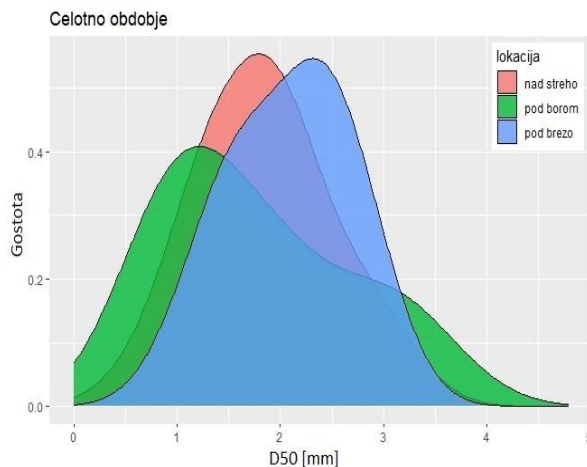
Figure 7: Droplet diameter (D50) above the canopies and below the birch and pine canopies for the entire considered period (Radulović, 2023).

D50 se je nad krošnjami večinoma gibal med 0,5 mm in 5 mm, z izjemo enega dogodka, ko je bil D50 večji od 5 mm (slika 7). Pri tem moramo opozoriti na dejstvo, da izmerjeni podatki niso bili filtrirani. Kot je razvidno iz osamelcev na sliki 7, je bilo z

disdrometri izmerjenih tudi nekaj vrednosti, ki so izstopale in bi jih bilo v nadaljnjih raziskavah smiselno natančneje analizirati in poiskati njihov vzrok, saj bi lahko bile precenjene.

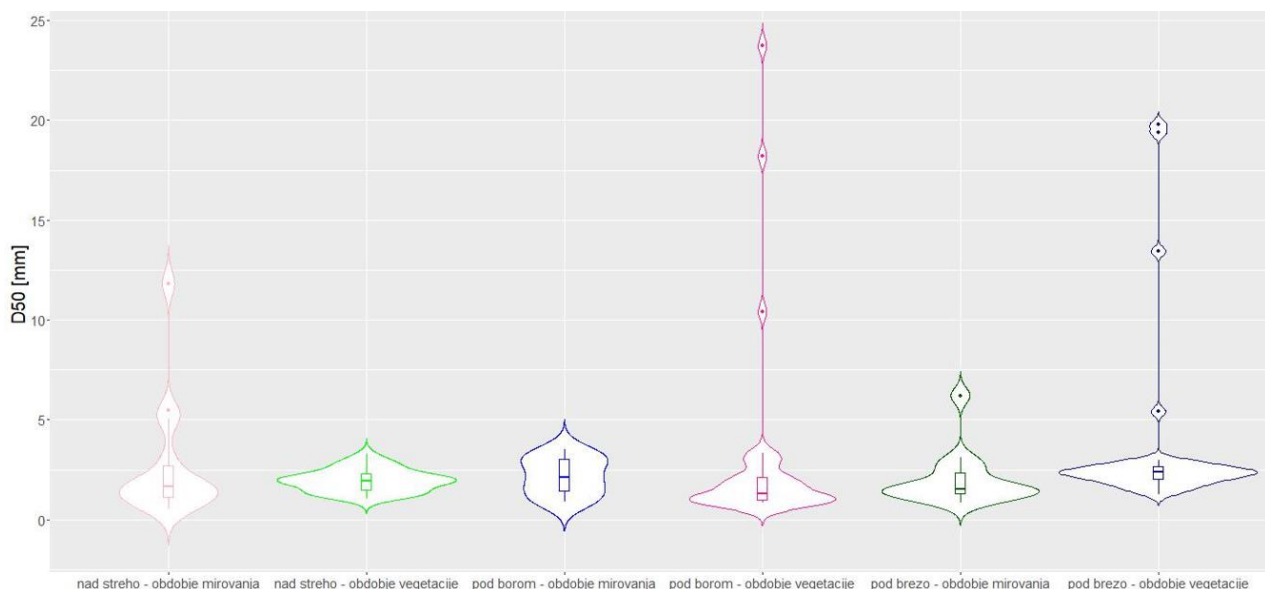
D50 pod drevesnimi krošnjami se po pogostosti pojavljanja ne ujemajo z D50 nad njimi (slika 8), kar potrjuje znaten vpliv drevesnih krošenj na velikost dežnih kapljic.

V obdobju vegetacije (slika 9) je D50 kapljice nad streho znašal 1,97 mm, pod krošnjo breze 3,69 mm, pod krošnjo bora pa 2,99 mm. V primerjavi s premerom nad drevesnimi krošnjami se je D50 pod krošnjo breze povečal za 87 %, pod krošnjo bora pa za 52 %. V obdobju mirovanja (slika 9) je povprečni premer kapljice nad streho znašal 2,74 mm, pod krošnjo breze 2,03 mm, pod krošnjo bora pa 2,18 mm. Iz rezultatov vidimo, da se je v obdobju mirovanja premer pod obema drevesnima krošnjama zmanjšal glede na premer kapljic nad krošnjama. Pod brezo se je zmanjšal za 26 %, pod borom pa za 20 %. Dobljeni rezultati kažejo, da se v obdobju vegetacije poveča D50 pod drevesno krošnjo v primeru obeh obravnavanih drevesnih vrst.



Slika 8: Gostota verjetnosti premera kapljic (D50) nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora za celotno obravnavano obdobje (Radulović, 2023).

Figure 8: Probability density of the droplet diameter (D50) above the canopies and below the birch and pine canopies for the entire considered period (Radulović, 2023).



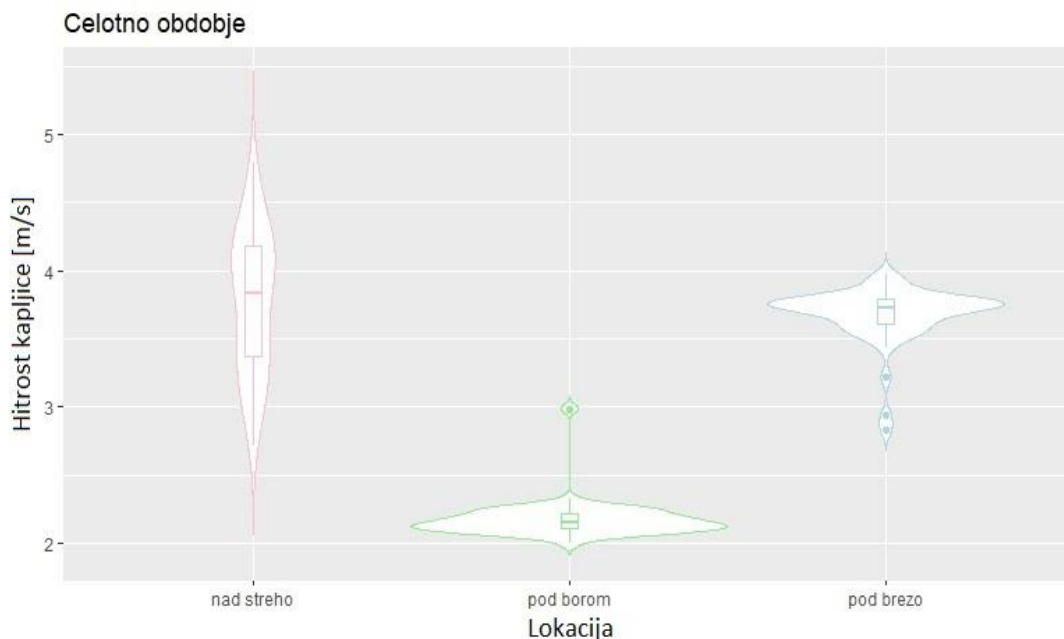
Slika 9: Premer kapljic (D50) nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora ločeno za obdobje vegetacije in obdobje mirovanja (Radulović, 2023).

Figure 9: Droplet diameter (D50) above the canopies and below the birch and pine canopies according to the leafed and leafless periods (Radulović, 2023).

3.4. Hitrost dežnih kapljic

Povprečna hitrost dežnih kapljic obravnavanih padavinskih dogodkov (na območju senzorja) nad krošnjami se je v obravnavanem obdobju gibala med 2,72 m/s in 4,80 m/s, v poprečju pa je znašala

3,52 m/s. Pod krošnjo breze so kapljice dosegale povprečne hitrosti v razponu od 2,83 m/s do 3,97 m/s, v povprečju pa so padale s hitrostjo 3,54 m/s. Pod krošnjo bora se je povprečna hitrost gibala med 1,99 m/s in 2,99 m/s, v povprečju pa je znašala 2,18 m/s (slika 10).



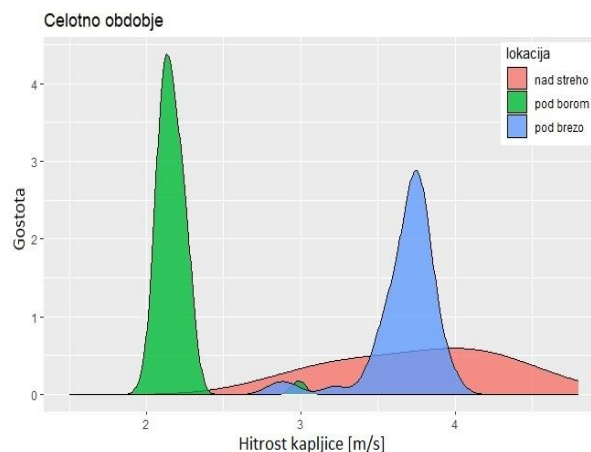
Slika 10: Hitrost dežnih kapljic nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora za celotno obravnavano obdobje (Radulović, 2023).

Figure 10: Velocity of raindrops above the canopies and below the birch and pine canopies for the entire considered period (Radulović, 2023).

Povprečna hitrost kapljic pod krošnjo breze se je v primerjavi s povprečno hitrostjo nad krošnjami povečala za 1 %, kar je posledica povečanja povprečne hitrosti pod krošnjo v obdobju mirovanja. Pod krošnjo bora pa se je povprečna hitrost zmanjšala za 38 % upoštevajoč celotno obdobje meritev (slika 11). Zmanjšanje povprečne hitrosti ni bilo pričakovano glede na to, da se je D50 pod borom v istem obdobju povečal. To bi lahko razložili z višino spodnjih vej krošenj, ki je v primeru bora bistveno manjša od breze (slika 2), posledično hitrost kapljic na tako kratki razdalji ne more doseči končne hitrosti. To pomeni, da razmerje med premerom kapljic in njihovo hitrostjo pod krošnjami dreves ni nujno premo sorazmerno.

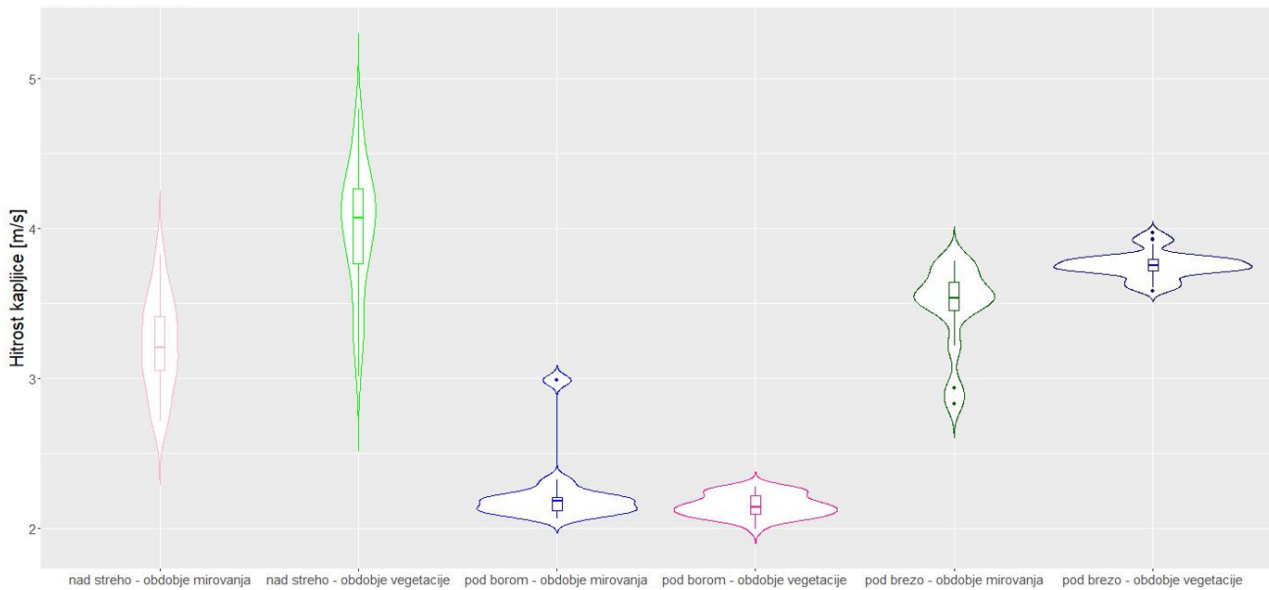
V obdobju vegetacije (slika 12) so kapljice nad krošnjami v povprečju padale s hitrostjo 3,94 m/s, pod krošnjo breze s hitrostjo 3,75 m/s in pod krošnjo bora s hitrostjo 2,19 m/s. Ugotovimo lahko, da se je v obdobju vegetacije, ko je bila breza olistana, povprečna hitrost kapljic pod njo zmanjšala za 5 %, pod borom pa za 44 % glede na povprečno hitrost kapljic nad krošnjami. V obdobju mirovanja (slika 12) so kapljice nad krošnjami padale v povprečju s

hitrostjo 3,13 m/s. Pod brezo je hitrost znašala 2,91 m/s, kar je za 7 % manj, pod borom pa je hitrost znašala 2,17, kar je za 31 % manj.



Slika 11: Gostota verjetnosti hitrosti dežnih kapljic nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora za celotno obravnavano obdobje (Radulović, 2023).

Figure 11: Probability density of the droplet velocity above the canopies and below the birch and pine canopies for the entire considered period (Radulović, 2023).



Slika 12: Hitrost dežnih kapljic nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora ločeno za obdobje vegetacije in obdobje mirovanja (Radulović, 2023).

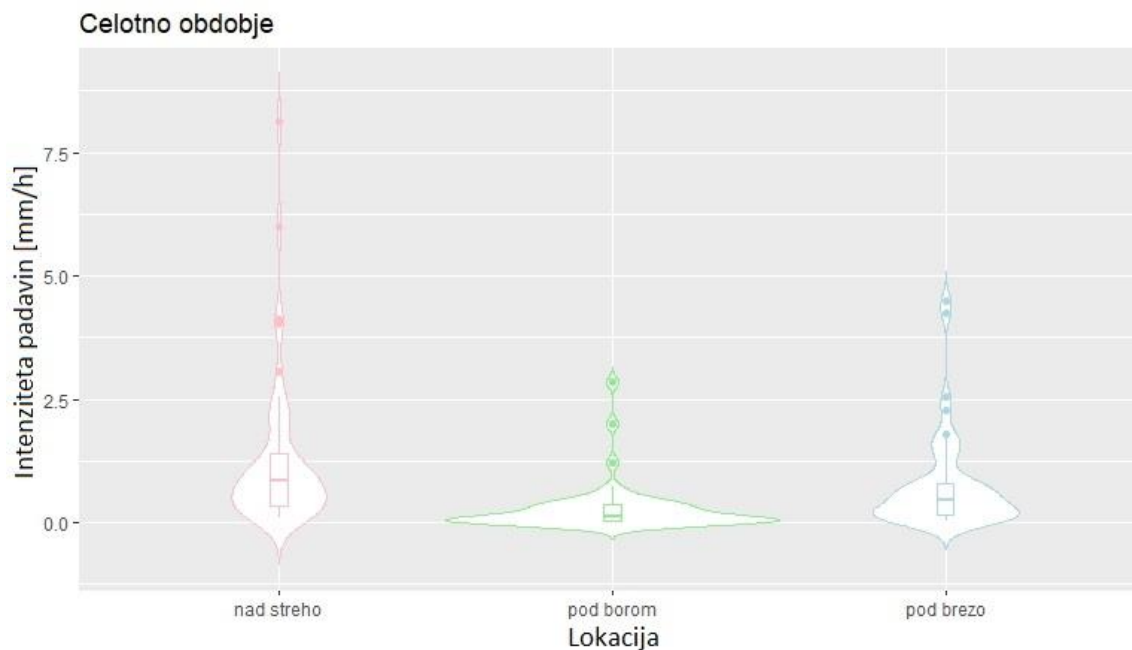
Figure 12: Velocity of raindrops above the canopies and below the birch and pine canopies according to the leafed and leafless periods (Radulović, 2023).

3.5. Intenziteta dežnih kapljic

V celotnem opazovanem obdobju je povprečna intenziteta padavin obravnavanih padavinskih dogodkov nad drevesno krošnjo znašala 1,20 mm/h. Pod drevesno krošnjo breze je ta vrednost znašala 0,84 mm/h, pod krošnjo bora pa 0,47 mm/h. Iz rezultatov je razvidno, da se povprečna intenziteta padavin pri prehodu skozi krošnjo breze zmanjša za 30 %, pri prehodu skozi krošnjo bora za 61 % (sliki 13 in 14).

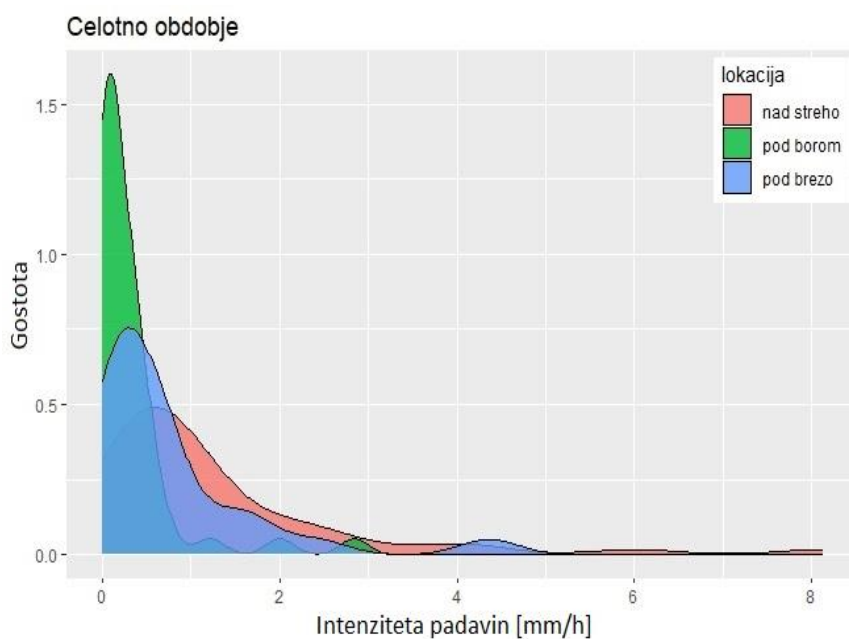
V obdobju vegetacije je povprečna intenziteta padavin nad drevesno krošnjo znašala 1,72 mm/h,

pod krošnjo breze 1,18 mm/h, pod krošnjo bora pa 0,71 mm/h (slika 15). Povprečna intenziteta se je pod krošnjo v primerjavi s povprečno intenziteto nad njo v obdobju vegetacije pod brezo zmanjšala za 32 % in pod borom za 59 %. V obdobju mirovanja (slika 15) je povprečna intenziteta padavin nad drevesno krošnjo znašala 0,73 mm/h, pod krošnjo breze 0,54 mm/h, pod krošnjo bora pa 0,25 mm/h. Iz tega sledi, da se je povprečna intenziteta padavin pod krošnjo bora v primerjavi s povprečno intenziteto nad njo v obdobju mirovanja zmanjšala pod brezo za 25 % in pod borom za 66 %.



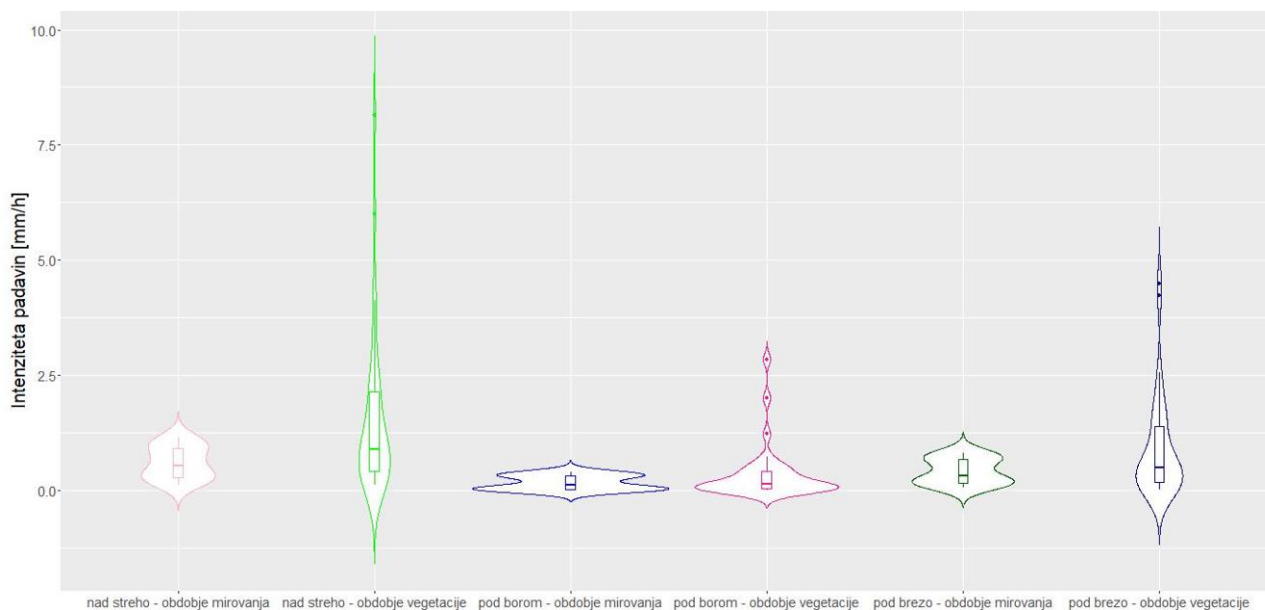
Slika 13: Intenziteta padavin nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora za celotno obravnavano obdobje (Radulović, 2023).

Figure 13: Rainfall intensity above the canopies and below the birch and pine canopies for the entire considered period (Radulović, 2023).



Slika 14: Gostota verjetnosti intenzitete padavin nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora za celotno obravnavano obdobje (Radulović, 2023).

Figure 14: Probability density of rainfall intensity above the canopies and below the birch and pine canopies for the entire considered period (Radulović, 2023).



Slika 15: Intenziteta dežnih kapljic nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora ločeno za obdobje vegetacije in obdobje mirovanja (Radulović, 2023).

Figure 15: Rainfall intensity above the canopies and below the birch and pine canopies according to the leafed and leafless periods (Radulović, 2023).

3.6. Maksimalna 30-minutna intenziteta padavin padavinskih dogodkov

Maksimalno 30-minutno intenziteto (I_{30}) padavinskih dogodkov smo izračunali za potrebe določitve dejavnika erozivnosti padavin (R). Izračunane vrednosti so prikazane v preglednici 2.

Iz rezultatov je razvidno, da je pod krošnjo breze v obravnavanem obdobju vrednost I_{30} za 34 % manjša od intenzitete nad krošnjo. Pri boru pa se je ta vrednost zmanjšala kar za 71 % (preglednica 2). Iz dobljenih rezultatov je razvidno, da se je vrednost I_{30} spremenila bolj v obdobju vegetacije (za 35 % pod brezo, za 72 % pod borom) kot v obdobju mirovanja (za 26 % pod brezo, za 64 % pod borom), kar je bilo tudi pričakovano.

Preglednica 2: Maksimalna 30-minutna intenziteta padavinskih dogodkov nad krošnjami in prepuščenih padavin pod krošnjama breze in bora.

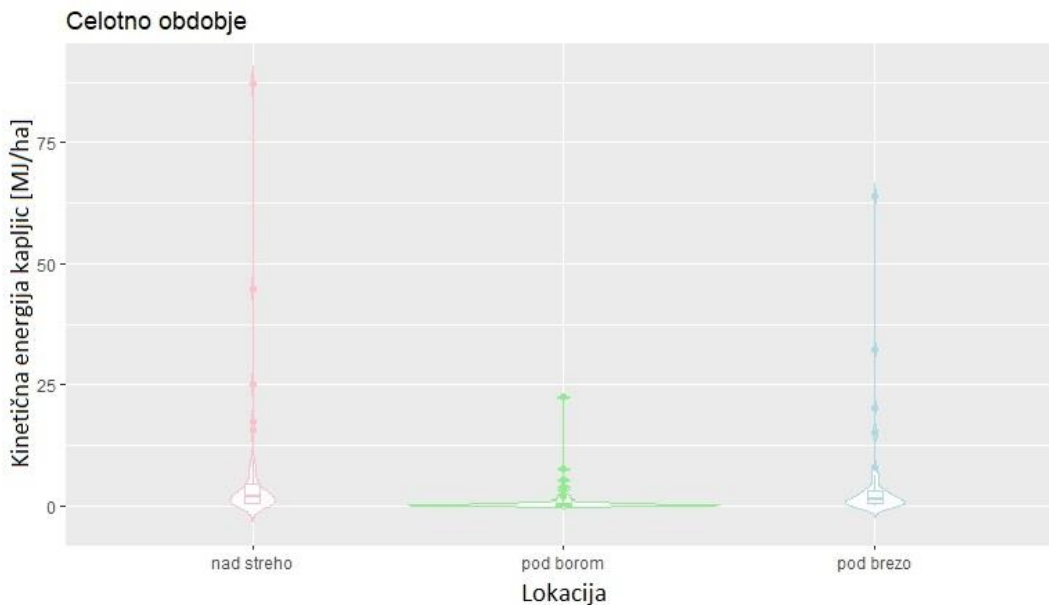
Table 2: Maximum 30-minute intensity of rainfall events above the canopies and the amount of throughfall under the canopies of birch and black pine.

I_{30} [mm/h]	Celotno obdobje [mm/h]	Obdobje vegetacije [mm/h]	Obdobje mirovanja [mm/h]
Nad krošnjami			
min	0,38	0,95	0,38
povprečje ± st. dev.	9,00 ± 11,74	10,53 ± 13,39	5,29 ± 4,19
maks	71,56	71,56	14,20
Pod krošnjo breze			
min	0,18	0,18	0,18
povprečje ± st. dev.	5,97 ± 8,92	6,82 ± 10,27	3,91 ± 3,25
maks	55,61	55,61	10,17
Pod krošnjo bora			
min	0,0	0,0	0,0
Povprečje ± st. dev.	2,63 ± 5,04	2,92 ± 5,81	1,93 ± 2,10
maks	30,10	30,10	6,07

3.7. Kinetična energija dežnih kapljic

V celotnem obravnavanem obdobju je povprečna KE obravnavanih padavinskih dogodkov nad drevesnimi krošnjami znašala 6 MJ/ha. Vrednosti so se večinoma gibale med 0,1 MJ/ha in 25 MJ/ha (slika 16).

Pod krošnjo breze je povprečna vrednost KE znašala 4,59 MJ/ha, kar je glede na vrednost nad krošnjo manjše za 24 %. Povprečna KE pod krošnjo bora je znašala 1,18 MJ/ha, kar je glede na vrednost nad krošnjo manjše kar za 81 % (sliki 16 in 17).

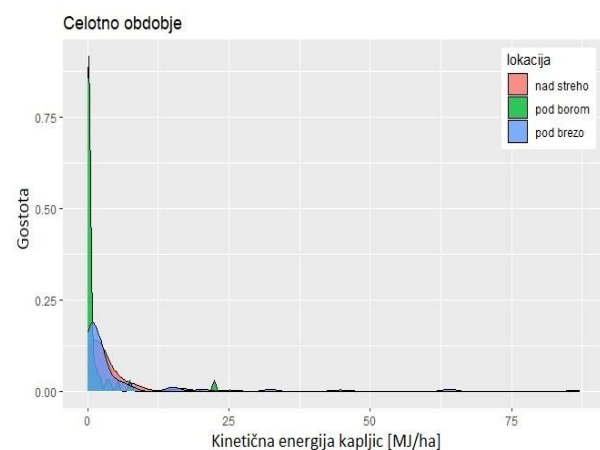


Slika 16: Kinetična energija (KE) padavinskih dogodkov nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora za celotno obravnavano obdobje (Radulović, 2023).

Figure 16: Kinetic Energy (KE) of rainfall events above the canopies and below the birch and pine canopies for the entire considered period (Radulović, 2023).

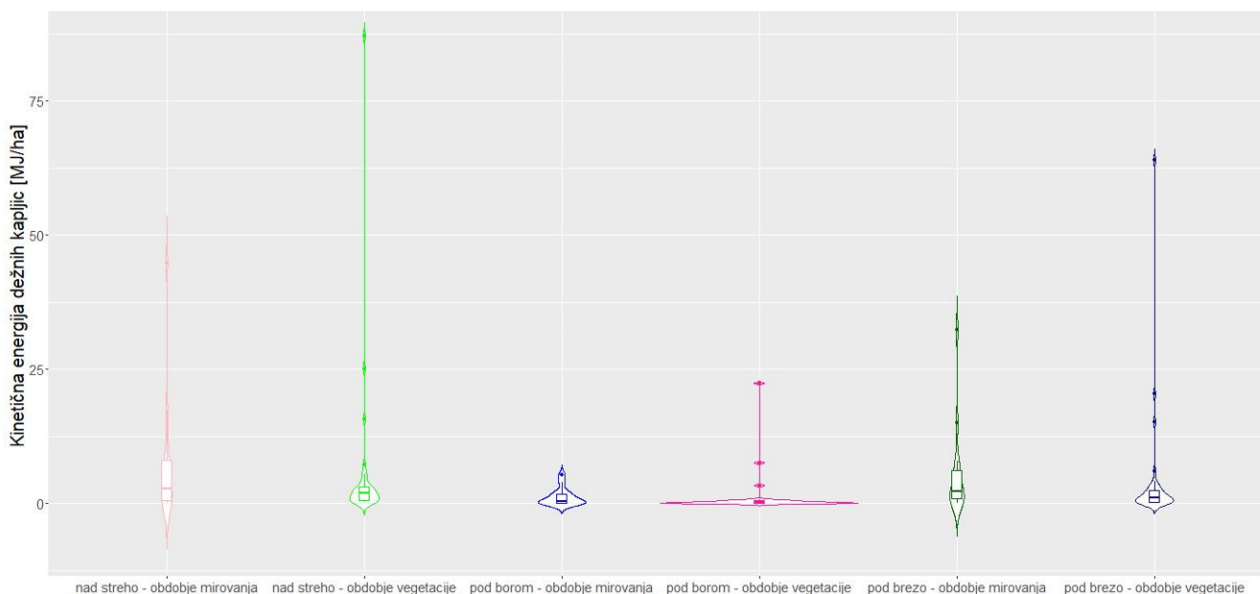
V obravnavanem obdobju sta se zgodila dva večja padavinska dogodka z obilnimi padavinami, prvi sredi septembra 2022 in drugi sredi januarja 2023. Njuna KE je znašala 87 MJ/ha in 45 MJ/ha (slika 16). Oba dogodka sta bila ekstremna in sta od ostalih odstopala po izjemnih padavinah. Oba dogodka sta tudi uradno zabeležena kot izredna dogodka (ARSO, 2023, 2022).

V obdobju vegetacije so povprečne vrednosti KE znašale 5,58 MJ/ha nad krošnjami, 4,15 MJ/ha pod krošnjo breze in 1,16 MJ/ha pod krošnjo bora (slika 18). Vrednosti pod krošnjami so glede na vrednost nad njimi v obdobju vegetacije manjše za 26 % za brezo in 79 % za bor. V obdobju mirovanja (slika 18) so povprečne vrednosti KE znašale 7,21 MJ/ha nad krošnjami, 5,65 MJ/ha pod krošnjo breze in 1,21 MJ/ha pod krošnjo bora. Vrednosti pod krošnjami so bile glede na vrednosti nad njimi v obdobju mirovanja manjše za 22 % za brezo in 83 % za bor.



Slika 17: Gostota verjetnosti kinetične energije (KE) padavinskih dogodkov nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora za celotno obravnavano obdobje (Radulović, 2023).

Figure 17: Probability density of kinetic energy (KE) of rainfall events above the canopies and below the birch and pine canopies for the entire considered period (Radulović, 2023).



Slika 18: Kinetična energija (KE) dežnih kapljic nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora ločeno za obdobje vegetacije in obdobje mirovanja (Radulović, 2023).

Figure 18: Kinetic Energy (KE) above the canopies and below the birch and pine canopies according to the leafed and leafless periods (Radulović, 2023).

3.8. Dejavnik erozivnosti padavin in odtoka (R)

Vrednost dejavnika erozivnosti padavin in odtoka (R) nad krošnjami dreves se je za obravnavane padavinske dogodke večinoma gibala med $0,03 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in $935,6 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, razen pri izjemnem dogodku sredi septembra 2022, ko je ta vrednost znašala nekaj več kot $6200 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Povprečna vrednost R je nad krošnjami dreves znašala $189,7 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, pod krošnjo breze $108,8 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, pod krošnjo bora pa $19,2 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Pod krošnjami obeh vrst dreves je R zaradi prestrežanja padavin manjši kot nad njimi, in sicer pod brezo za 43 % in pod borom za 90 % (slika 19).

V obdobju vegetacije je povprečna vrednost R nad krošnjami znašala $240,7 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Ta vrednost se je pod krošnjo breze zmanjšala za 44 % ($135,5 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), pod krošnjo bora pa za 90 % ($25 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) (preglednica 3). V obdobju mirovanja je povprečna vrednost dejavnika erozivnosti padavin R nad streho znašala $66,1 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Pod krošnjo breze je ta vrednost znašala $44 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (33 % manj), pod borom pa $5,2 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (92 % manj) (preglednica 3).

4. Analiza in razprava

Za podrobnejšo analizo smo izbrali tri različne padavinske dogodke, ki se razlikujejo po trajanju, količini in intenziteti padavin. Vsi trije izbrani dogodki so se zgodili septembra 2022. V nadaljevanju bomo najprej prikazali najmanjši dogodek (dogodek A), srednji dogodek (dogodek B) in največji dogodek (dogodek C) od treh izbranih.

4.1. Padavinski dogodek A

Prvi dogodek, najmanjši od obravnavanih treh, se je zgodil 10. septembra 2022 in je trajal 1,5 ure, s skupno količino padavin 3,6 mm in 19.463 kapljic nad drevesno krošnjo (v območju merilnika). Skupno število kapljic pod krošnjo breze je bilo na koncu dogodka 16.922 (13 % manj), pod borom pa 8.259 (58 % manj).

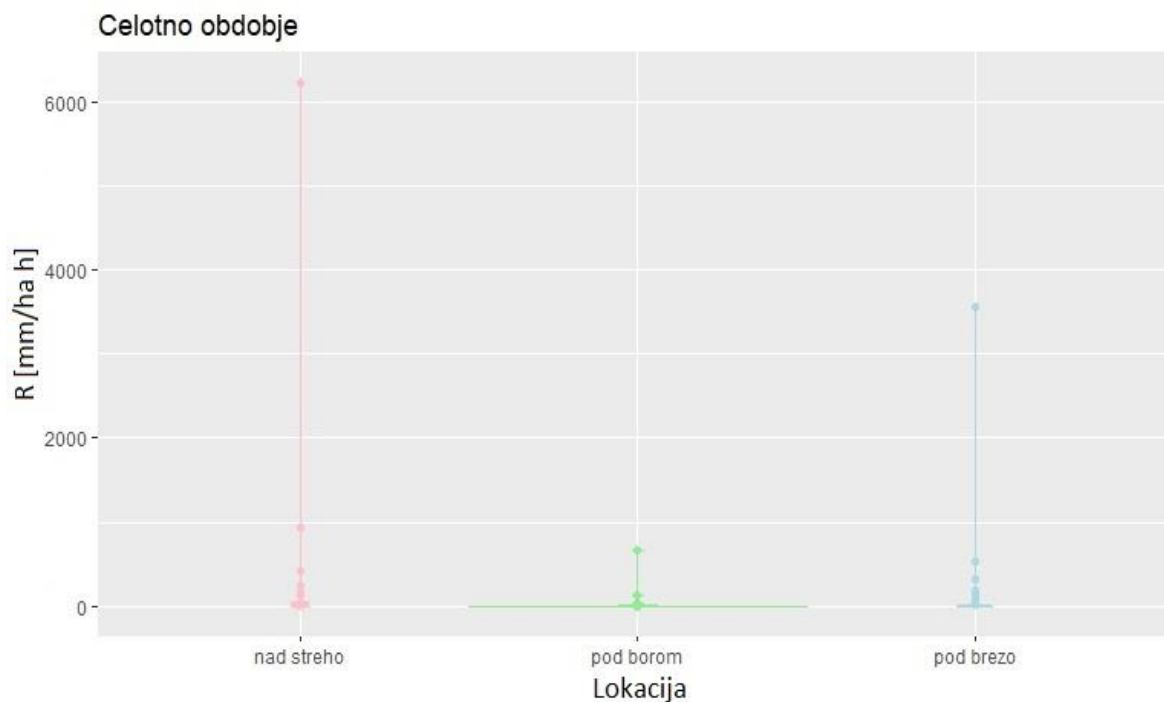
Iz slik 20–22 je razvidno, da je večina kapljic, približno 70 %, padla v drugi polovici dogodka. Intenziteta je prvih 15 minut naraščala, potem padala in nato po 30. minuti spet narašla. Intenzivno je deževalo vse do 80. minute, ko je intenziteta padavin začela hitro padati.

Preglednica 3: Vrednosti dejavnika erozivnosti padavin R nad krošnjami in prepuščenih padavin pod krošnjama breze in bora.

Table 3: The values of the rainfall erosivity factor R above the canopies and the amount of throughfall under the canopies of birch and black pine.

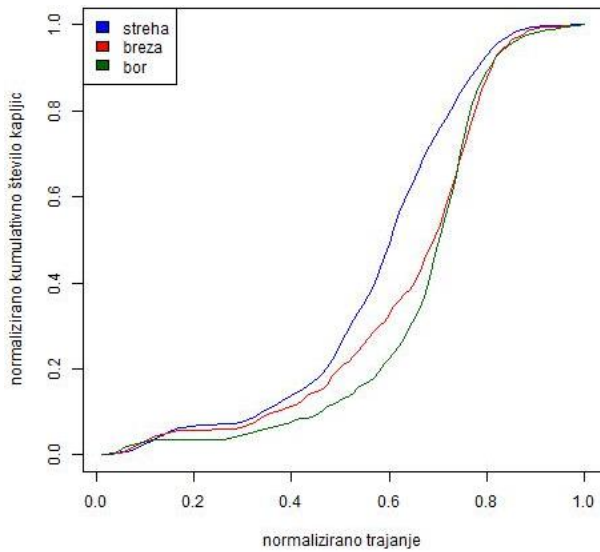
R [MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹]	Celotno obdobje [MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹]	Obdobje vegetacije [MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹]	Obdobje mirovanja [MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹]
Nad krošnjami			
min	0,03	0,12	0,03
povprečje ± st. dev.	189,7 ± 894,9	240,7 ± 1056,5	66,0 ± 117,3
maks	6238,2	6238,2	421,3

Pod krošnjo breze			
min	0,01	0,01	0,01
povprečje ± st. dev.	108,8 ± 511,3	135,4 ± 602,9	44,0 ± 87,2
maks	3557,8	3557,8	328,8
Pod krošnjo bora			
min	0,00	0,00	0,00
Povprečje ± st. dev.	19,2 ± 97,6	25,0 ± 115,4	5,2 ± 9,0
maks	674,1	674,1	32,3



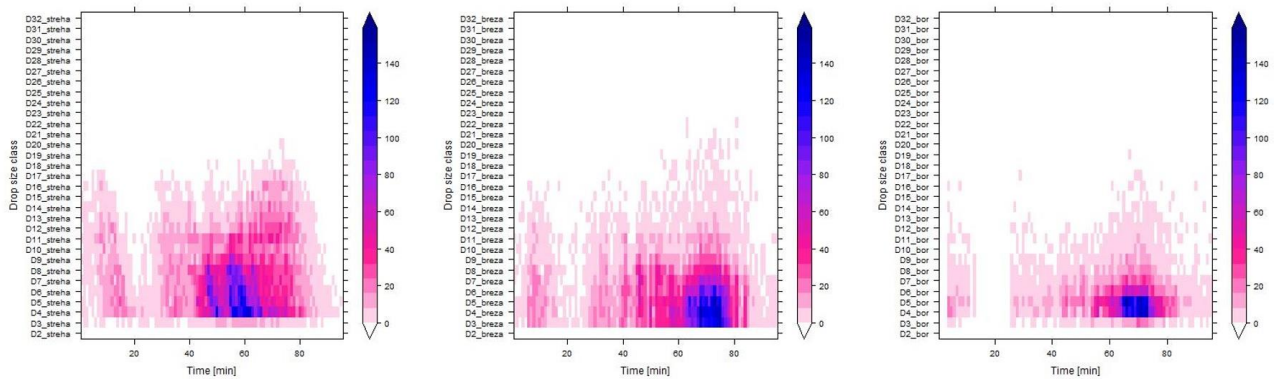
Slika 19: Dejavnik erozivnosti padavin in odtoka (R) nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora za celotno obravnavano obdobje (Radulović, 2023).

Figure 19: The rainfall erosivity factor (R) above the canopies and below the birch and pine canopies for the entire considered period (Radulović, 2023).



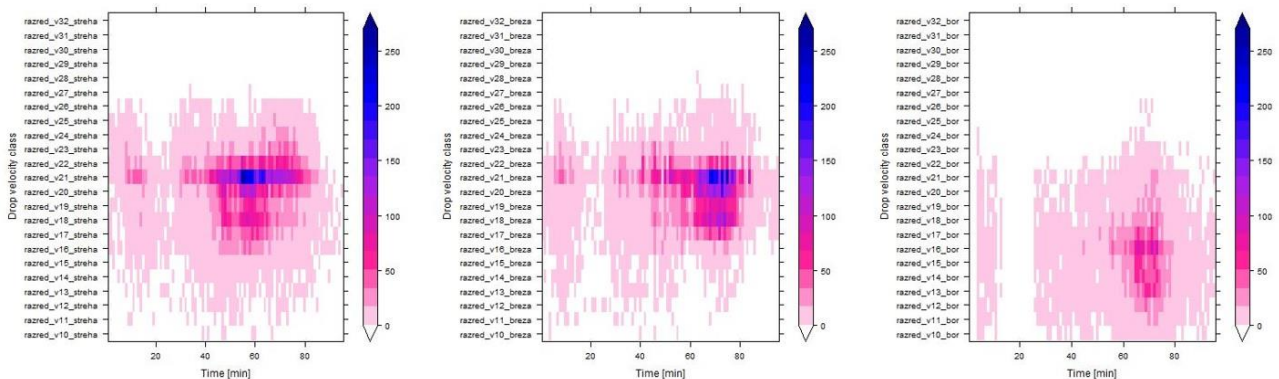
Slika 20: Kumulativno število kapljic v odvisnosti od trajanja dogodka nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora za padavinski dogodek A (Radulović, 2023).

Figure 20: Cumulative number of drops depending on the duration of the event above the canopies and below the birch and pine canopies for rainfall event A (Radulović, 2023).



Slika 21: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic padavinskega dogodka A nad drevesnimi krošnjami (levo) in pod krošnjama breze (sredina) in bora (desno) (Radulović, 2023). Barvna skala predstavlja število kapljic.

Figure 21: Size distribution of raindrops of rainfall event A above the tree canopy (left) and below the birch (middle) and pine (right) canopies (Radulović, 2023); Colours represent the number of drops.



Slika 22: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic padavinskega dogodka A nad drevesnimi krošnjami (levo) in pod krošnjama breze (sredina) in bora (desno) (Radulović, 2023). Barvna skala predstavlja število kapljic.

Figure 22: Velocity distribution of raindrops of rainfall event A above the tree canopy (left) and below the birch (middle) and pine (right) canopies (Radulović, 2023); Colours represent the number of drops.

Največji premer kapljice na prostem je bil zaznan med 70. in 75. minuto, pod krošnjo breze med 65. in 80. minuto, pod krošnjo bora pa okrog 70. minute (slika 21). Pod krošnjo breze je vrednost D50 znašala približno 1,7 mm, pod borom pa 1,0 mm. Iz slike 21 je tudi razvidno, da je največje število kapljic pod obema drevesoma prepuščeno med 50. in 80. minuto, kar je pričakovano zaradi največje intenzitete padavin v tem času.

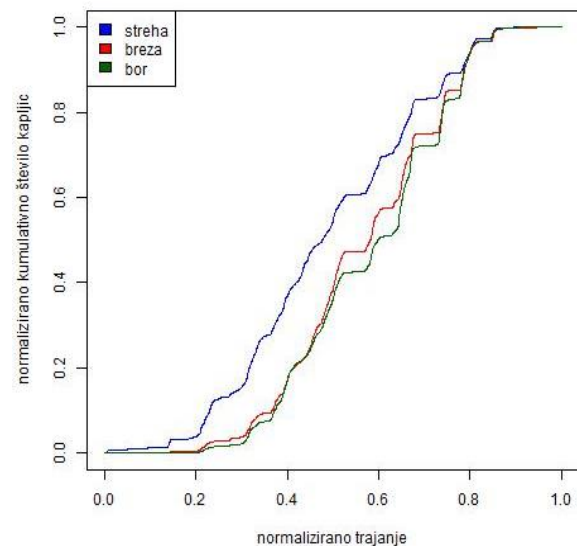
Povprečna hitrost (slika 22) nad drevesno krošnjo je znašala 4,1 m/s. Pod krošnjo breze je bila povprečna hitrost 3,9 m/s, pod krošnjo bora pa 2,2 m/s.

4.2. Padavinski dogodek B

Drugi dogodek (slike 23–25) se je zgodil med 24. in 26. septembrom 2022 in je trajal 33,2 ure, s skupno količino padavin 83 mm in 672.624 kapljic nad drevesno krošnjo. Skupno število kapljic pod krošnjo breze je bilo na koncu dogodka 559.185 (17 % manj), pod borom pa 274.075 (41 % manj od skupnega števila nad krošnjo). Prepuščanje padavin pod drevesnimi krošnjami se je začelo šele po sedmih urah od začetka dogodka, ko je intenziteta padavin na prostem začela naraščati. Pod brezo je bila manjša količina prepuščenih kapljic zaznana tudi pred tem. Kapljanje pod borom ni presegló trajanja dogodka, pod brezo pa je bilo zaznano kapljanje še štiri ure po dogodku.

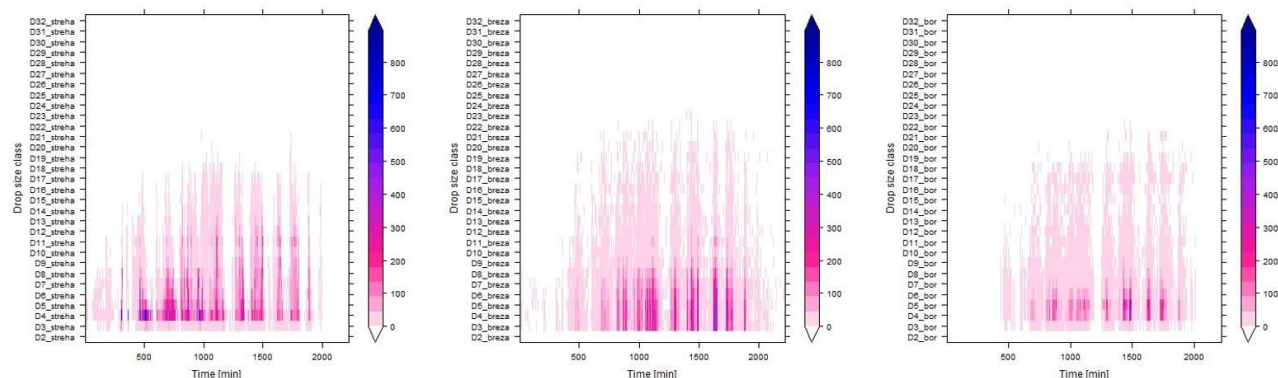
Premer kapljice D50 nad drevesnimi krošnjami je znašal 1,8 mm, pod krošnjo breze 2,5 mm, pod krošnjo bora pa 3,1 mm (slika 24).

Povprečna hitrost pri padavinskem dogodku B je nad drevesnimi krošnjami znašala 3,8 m/s (slika 25). Pod krošnjo breze je povprečna hitrost znašala 3,7 m/s in pod krošnjo bora 2,2 m/s.



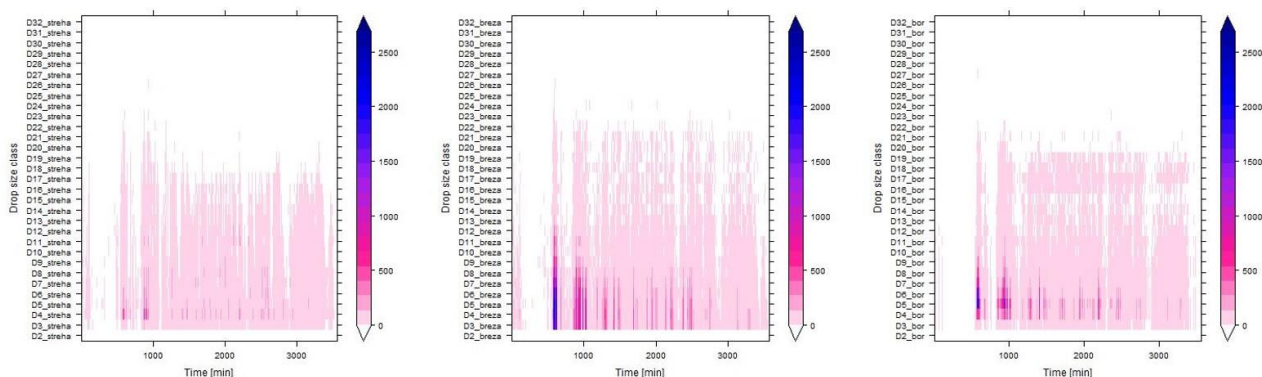
Slika 23: Kumulativno število kapljic v odvisnosti od trajanja dogodka nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora za padavinski dogodek B (Radulović, 2023).

Figure 23: Cumulative number of drops depending on the duration of the event above the canopies and below the birch and pine canopies for rainfall event B (Radulović, 2023).



Slika 24: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic padavinskega dogodka B nad drevesnimi krošnjami (levo) in pod krošnjama breze (sredina) in bora (desno) (Radulović, 2023). Barvna skala predstavlja število kapljic.

Figure 24: Size distribution of raindrops of rainfall event B above the tree canopy (left) and below the birch (middle) and pine (right) canopies (Radulović, 2023); Colours represent the number of drops.



Slika 25: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic padavinskega dogodka B nad drevesnimi krošnjami (levo) in pod krošnjama breze (sredina) in bora (desno) (Radulović, 2023). Barvna skala predstavlja število kapljic.

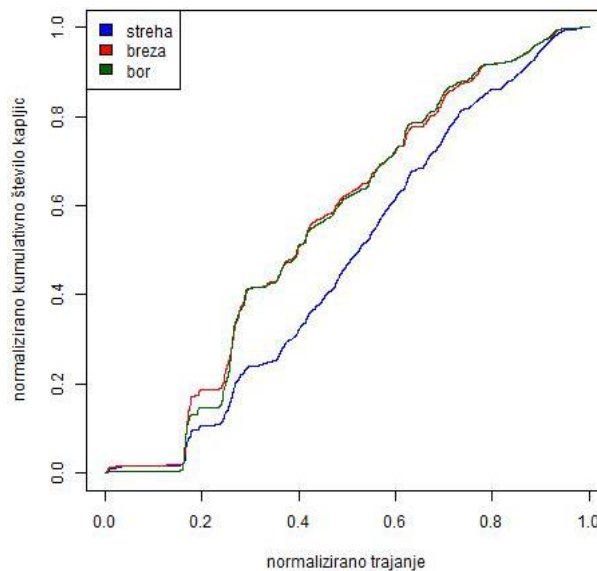
Figure 25: Velocity distribution of raindrops of rainfall event B above the tree canopy (left) and below the birch (middle) and pine (right) canopies (Radulović, 2023); Colours represent the number of drops.

4.3. Padavinski dogodek C

Tretji dogodek (slike 26–28), največji od treh izbranih, se je zgodil med 15. in 17. septembrom 2022 in je trajal 58,6 ur, s skupno količino padavin 356,5 mm in 1.435.716 kapljic nad drevesno krošnjo. Dogodek je bil kot izredni dogodek zabeležen tudi s strani ARSO (ARSO, 2022). Skupno število kapljic pod krošnjo breze je bilo na koncu dogodka 2.048.417 (povečalo se je za 43 %), pod borom pa 1.329.566 (zmanjšalo se je za 7 %). V tem dogodku so bile kapljice nad drevesno krošnjo precej enakomerno razporejene po velikostnih razredih (slika 27). Pod obema drevesoma je največji del padavin prepuščen v času trajanja dogodka med 4. in 16. uro.

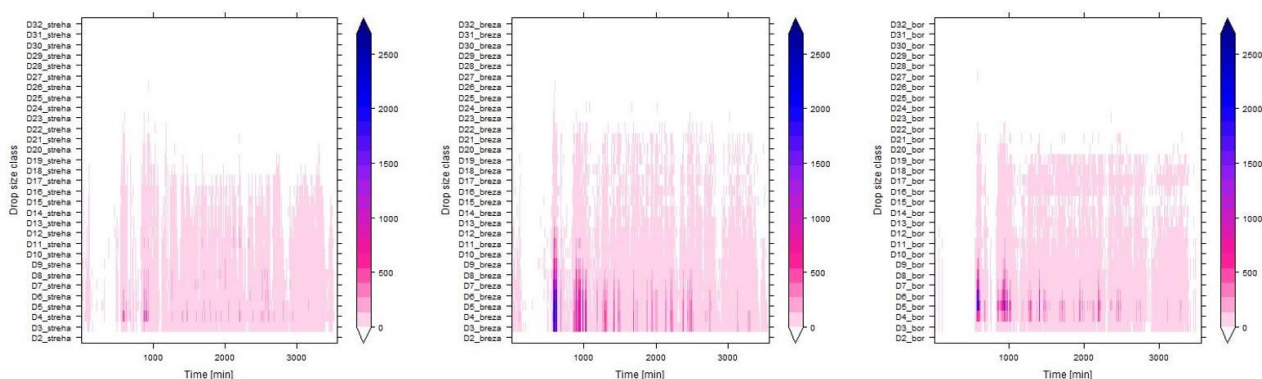
Premer kapljice D50 nad drevesnimi krošnjami je znašal 2,3 mm (slika 27), pod krošnjo breze 2,7 mm in pod borom 3,3 mm.

Nad drevesnimi krošnjami je povprečna hitrost kapljice med padavinskim dogodkom C znašala približno 4,2 m/s, pod krošnjo breze je ta vrednost znašala približno 3,8 m/s, pod krošnjo bora pa približno 2,3 m/s.



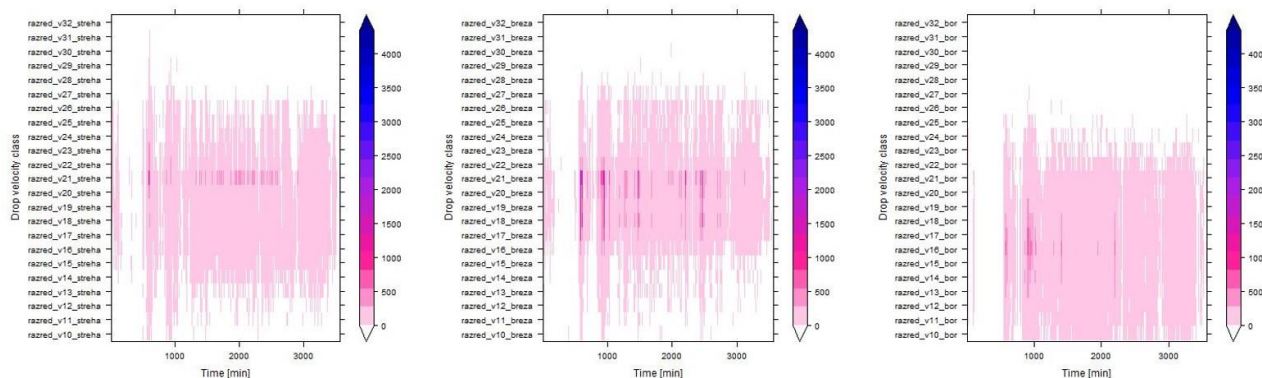
Slika 26: Kumulativno število kapljic v odvisnosti od trajanja dogodka nad krošnjami in pod krošnjama breze in bora za padavinski dogodek C (Radulović, 2023).

Figure 26: Cumulative number of drops depending on the duration of the event above the canopies and below the birch and pine canopies for rainfall event C (Radulović, 2023).



Slika 27: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic padavinskega dogodka C nad drevesnimi krošnjami (levo) in pod krošnjama breze (sredina) in bora (desno) (Radulović, 2023). Barvna skala predstavlja število kapljic.

Figure 27: Size distribution of raindrops of rainfall event C above the tree canopy (left) and below the birch (middle) and pine (right) canopies (Radulović, 2023); Colours represent the number of drops.



Slika 28: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic padavinskega dogodka C nad drevesnimi krošnjami (levo) in pod krošnjama breze (sredina) in bora (desno) (Radulović, 2023). Barvna skala predstavlja število kapljic.

Figure 28: Velocity distribution of raindrops of rainfall event C above the tree canopy (left) and below the birch (middle) and pine (right) canopies (Radulović, 2023); Colours represent the number of drops.

4.4. Primerjava treh izbranih padavinskih dogodkov

Pri najmanjšem dogodku A je delež prestreženih padavin, tako pri brezi kot pri boru, največji in znaša 60 % za brezo in 90 % za bor (preglednica 4). Pri obeh večjih dogodkih B in C je delež prestreženih padavin bistveno manjši, pri brezi med 25 in 29 %, pri boru pa med 53 in 68 %.

Povprečne intenzitete padavin med dogodkoma A in B so bile približno enake, čeprav je zaradi daljšega trajanja dogodka B delež prestreženih padavin pri tem dogodku manjši pri obeh vrstah dreves. Pri dogodku C, ki ima največjo povprečno intenziteto padavin in je trajal najdlje, pa je delež prestreženih padavin najmanjši. Zaključimo lahko,

da z daljšim časom trajanja dogodka obravnavana drevesa prestrežejo manjši delež padavin, kar so ugotovili tudi nekateri drugi avtorji (Zabret et al., 2017; Zore et al., 2022).

Primerjava premerov kapljic D50 kaže, da ta narašča z velikostjo dogodka (preglednica 4). Podrobnejša analiza velikostne porazdelitve padavinskih delcev dogodkov A in C kaže, da sta tako breza kot bor zadržala najmanj padavin, ko je bil premer kapljic padavin nad krošnjami največji. Z izjemo dogodka A se pri obeh ostalih obravnavanih dogodkih D50 pod krošnjami poveča. Podobni rezultati so tudi pri povprečnih vrednostih vseh dogodkov v obdobju vegetacije (poglavje 3.3). Podobno tudi nekateri drugi raziskovalci (Frasson

in Krajewski, 2011; Nanko et al., 2020) ugotavljajo, da je običajno kapljic pod krošnjami manj, a so te večje kot nad njimi. Pri zelo majhnih dogodkih pa je očitno vpliv prestrežanja obraten in se kapljice pod krošnjami obeh drevesnih vrst zmanjšajo. Rezultati so lahko odvisni tudi od mikrolokacije merilnega instrumenta pod krošnjama obeh dreves.

Analiza hitrostne porazdelitve padavinskih delcev kaže nekoliko bolj enakomerno razporeditev po dogodkih. Največja povprečna hitrost kapljic je bila izmerjena med dogodkom C (preglednica 4). Se je pa hitrost dežnih kapljic po stiku s krošnjami zmanjšala v primeru vseh treh dogodkov in obeh drevesnih vrst. Do podobnih ugotovitev smo prišli tudi pri analizi povprečnih vrednosti vseh dogodkov v obdobju vegetacije (poglavje 3.4).

Pričakovano največjo KE kapljic izkazuje največji dogodek C, ki je imel tudi največjo povprečno hitrost in premer kapljic (preglednica 4). Za vse tri obravnavane dogodke pa velja, da se je KE po prehodu kapljic skozi krošnje bistveno zmanjšala, kar velja za obe drevesni vrsti, je pa zmanjšanje večje pri boru. Podobni rezultati so tudi pri povprečnih vrednostih vseh dogodkov v poglavju 3.7. Temu sledijo tudi vrednosti dejavnika erozivnosti in odtoka R, kar se ujema z rezultati v poglavju 3.8. Zmanjšanje KE po prehodu kapljic skozi krošnje breze v obdobju z listjem so pokazale tudi nekatere predhodne raziskave (Zore et al., 2022).

Preglednica 4: Primerjava treh izbranih padavinskih dogodkov.

Table 4: Comparison of three selected precipitation events.

	Dogodek A 10. 9. 2022	Dogodek B 24.–26. 9. 2022	Dogodek C 15.–17. 9. 2022
Nad krošnjami			
Trajanje [h]	1,5	33,2	58,6
Količina padavin [mm]	3,6	83,0	356,5
Intenziteta [mm/h]	2,27	2,24	6,01
Povprečna hitrost [m/s]	4,13	3,82	4,23

D50 [mm]	1,90	1,81	2,33
KE [MJ/ha]	0,68	15,68	87,18
R [MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹]	3,5	248,5	6238,2
Pod krošnjo breze			
Delež prestreženih padavin [%]	60,0	25,7	29,5
Povprečna hitrost [m/s]	3,93	3,74	3,78
D50 [mm]	1,71	2,50	2,70
KE [MJ/ha]	0,32	15,1	64,0
R [MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹]	0,7	182,0	3557,8
Pod krošnjo bora			
Delež prestreženih padavin [%]	89,9	67,7	52,7
Povprečna hitrost [m/s]	2,16	2,18	2,28
D50 [mm]	1,03	3,10	3,25
KE [MJ/ha]	0,03	3,3	22,4
R [MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹]	0,02	20,0	674,1

5. Zaključki

Iz rezultatov raziskave je razvidno, da bor v splošnem prestreže več padavin kot breza, da pa obdobje vegetacije vpliva na delež prestreženih padavin pri brezi bolj kot pri boru. Takšen rezultat je bil pričakovan, saj je breza listavec z izrazitim spreminjanjem fenoloških faz, bor pa je iglavec, za katerega je prehod med fenološkimi fazami manj izrazit.

Rezultati analize po posameznih fenoloških fazah kažejo, da se je hitrost kapljic zaradi prestrežanja padavin v obdobju vegetacije zmanjšala tako pri brezi kot pri boru. V obdobju mirovanja pa se je to zgodilo samo pri boru, povprečna hitrost kapljic pod krošnjo breze se je v tem obdobju povečala za 5 %.

Rezultati so pokazali, da se je v celotnem obravnavanem obdobju premer D50 pri prehodu kapljic skozi krošnje pri obeh vrstah dreves precej povečal. Rezultati po vegetacijskih obdobjih pa

kažejo, da se je v obdobju mirovanja D50 nekoliko zmanjšal, se je pa v obdobju vegetacije precej povečal. Rezultati študije nakazujejo, da listje pri brezi povečuje premer kapljic v večji meri kot iglice pri boru, je pa za dokaz te trditve potrebno daljše obdobje meritev.

Študija je pokazala, da ima proces prestrežanja padavin obeh obravnavanih drevesnih vrst velik vpliv na kinetično energijo kapljic in s tem njihovo erozivnost. Tako KE kot dejavnik erozivnosti padavin in odtoka R sta se po prehodu kapljic skozi krošnje bistveno zmanjšala, kar velja za obe drevesni vrsti, je pa ta pozitiven vpliv precej večji pri boru.

Zahvala

Zahvaljujemo se Marku Bryanu Aliviu za vzdrževanje raziskovalne ploskve in posredovane podatke z disdrometrov. Raziskavo je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije v okviru raziskovalnih projektov J2-4489, N2-0313 in raziskovalnega programa P2-0180. Raziskava je deloma finančno podprta tudi s strani programa Evropske unije za raziskave in inovacije Obzorje Evropa preko projekta SpongeScapes (Grant agreement ID 101112738).

Viri

Alivio, M. B., Šraj, M., Bezak, N. (2023). Investigating the reduction of rainfall intensity beneath an urban deciduous tree canopy. *Agric For Meteorol* **342**. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109727>.

ARSO (2023). Sneg in obilne padavine med 15. in 20. januarjem 2023. Ljubljana.

ARSO (2022). Obilne padavine in neurja med 15. in 17. septembrom 2022. Ljubljana.

Bezak, N., Rusjan, S., Petan, S., Sodnik, J., Mikoš, M. (2015). Estimation of soil loss by the WATEM/SEDEM model using an automatic parameter estimation procedure. *Environ Earth Sci* **74**(6), 5245–5261. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4534-0>.

Blöschl, G. et al. (2019). Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)—a community perspective.

Hydrological Sciences Journal **64**(10), 1141–1158. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507>.

Burt, T., Boardman, J., Foster, I., Howden, N. (2016). More rain, less soil: Long-term changes in rainfall intensity with climate change. *Earth Surf Process Landf* **41**(4), 563–566. <https://doi.org/10.1002/esp.3868>.

Frasson, R. P. de M., Krajewski, W. F. (2011). Characterization of the drop-size distribution and velocity-diameter relation of the throughfall under the maize canopy. *Agric For Meteorol* **151**(9), 1244–1251. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.05.001>.

Green Infrastructure [WWW Document] (2018). https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/green-infrastructure_en.

Hall, R. L., Calder, I. R. (1993). Drop size modification by forest canopies: Measurements using a disdrometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **98**(D10), 18465–18470. <https://doi.org/10.1029/93JD01498>.

Kermavnar, J., Vilhar, U. (2017). Canopy precipitation interception in urban forests in relation to stand structure. *Urban Ecosyst* **20**(6), 1373–1387. <https://doi.org/10.1007/s11252-017-0689-7>.

Kirnbauer, M. C., Baetz, B. W., Kenney, W. A. (2013). Estimating the stormwater attenuation benefits derived from planting four monoculture species of deciduous trees on vacant and underutilized urban land parcels. *Urban For Urban Green* **12**(3), 401–407. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2013.03.003>.

Levia, D. F., Hudson, S. A., Llorens, P., Nanko, K. (2017). Throughfall drop size distributions: a review and prospectus for future research. *WIREs Water* **4**(4). <https://doi.org/10.1002/wat2.1225>.

LI-COR (2023). LI-2200C Plant Canopy Analyzer [WWW Document]. https://www.licor.com/env/products/leaf_area/LAI-2200C/instrument.

Nanko, K., Hotta, N., Suzuki, M. (2006). Evaluating the influence of canopy species and meteorological factors on throughfall drop size distribution. *J Hydrol (Amst)* **329**(3–4), 422–431. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.036>.

Nanko, K., Hudson, S. A., Levia, D. F. (2016). Differences in throughfall drop size distributions in the presence and absence of foliage. *Hydrological Sciences Journal* **61**(3), 620–627. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1052454>.

Nanko, K., Tanaka, N., Leuchner, M., Levia, D. F. (2020). Throughfall Erosivity in Relation to Drop Size and Crown Position: A Case Study from a Teak

- Plantation in Thailand, in: Levia, D. F., Carlyle-Moses, D. E., Iida, S., Michalzik, B., Nanko, Kazuki (Eds.), *Forest-Water Interactions*. Springer Nature Switzerland, 279–298. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26086-6_12.
- OTT Hydromet (2016). Operating Instructions. Present weather sensor OTT Parsivel. [WWW Document]. URL http://www.ott.com/en-us/products/download/operating-instructions-present-weather-sensor-ott_parsivel2/ (accessed 12.19.23).
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environ Sci Policy* **54**, 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>.
- 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. *J Hydrol (Amst)* **391(3–4)**, 314–321. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2010.07.031>.
- Radulović, L. (2023). Vpliv prestrezanja padavin na mikrostrukturo padavin. Univerza v Ljubljani, Ljubljana.
- 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), Agricultural Handbook. U.S. Department of Agriculture, Washington.
- Resolucija o Strategiji prostorskega razvoja Slovenije 2050 [WWW Document] (2023). . <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2023-01-2295/resolucija-o-strategiji-prostorskega-razvoja-slovenije-2050-respr50>.
- UN Sustainable Development Goals [WWW Document] (2023). . <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>.
- 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 (Basel)* **8(12)**, 240. <https://doi.org/10.3390/atmos8120240>.
- Zabret, K., Rakovec, J., Šraj, M. (2018). Influence of meteorological variables on rainfall partitioning for deciduous and coniferous tree species in urban area. *J Hydrol (Amst)* **558**, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.025>.
- Zabret, K., Šraj, M. (2019). Rainfall Interception by Urban Trees and Their Impact on Potential Surface Runoff. *Clean (Weinh)* **47(8)**, 1800327. <https://doi.org/10.1002/clen.201800327>.
- Zabret, K., Šraj, M. (2018). Spatial variability of throughfall under single birch and pine tree canopies. *Acta hydrotechnica* **31(54)**, 1–20. <https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2018.01>.
- Zabret, K., Šraj, M. (2015). Can Urban Trees Reduce the Impact of Climate Change on Storm Runoff? *Urbani izziv* **26(Supplement)**, S165–S178. <https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2015-26-supplement-011>.
- Zore, A., Bezak, N., Šraj, M. (2022). The influence of rainfall interception on the erosive power of raindrops under the birch tree. *J Hydrol (Amst)* **613**. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128478>.