

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



DIPLOMSKA NALOGA

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Ljubljana, 2023

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Diplomska naloga št.:

Graduation thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

POPRAVKI – ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

Iskrena zahvala gre mentorjema, prof. dr. Mojci Šraj in doc. dr. Nejcu Bezaku. Hvaležna sem jima za njuno predanost in zavezanost, da sta mi pomagala pri doseganju mojih ciljev. Brez njune strokovne podpore, vodstva in spodbude, ne bi bilo mogoče dokončati te diplomske naloge.

Poleg tega bi se želela zahvaliti tudi svoji družini in prijateljici Mariji, ki so mi bili vedno v oporo in mi dajali moč, da sem nadaljevala s svojim delom.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 556.12:57.012.3(043.2)
Avtor: Lana Radulović
Mentor: prof. dr. Mojca Šraj, univ. dipl. inž. grad.
Somentor: doc. dr. Nejc Bezak, univ. dipl. inž. grad.
Naslov: Vpliv prestrežanja padavin na mikrostrukturo padavin
Tip dokumenta: Diplomaska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema: 56 str., 10 pregl., 78 sl., 4 en., 2 pril., 28 vir.
Ključne besede: padavine, mikrostruktura padavin, prestrežanje padavin, erozivnost padavin, disdrometer, porazdelitev padavinskih delcev (DSD)

Izveček

Prestrežanje padavin, proces pri katerem vegetacija zadržuje padavine, v veliki meri vpliva na naravne procese (npr. erozijo tal). Pri obravnavanju padavin je pomembno upoštevati tudi njihovo mikrostrukturo, saj imajo posamezni padavinski dogodki različno število kapljic, ki se pojavljajo v različnih velikostih in padajo z različno hitrostjo.

Podatke o padavinah smo pridobili s pomočjo 1-minutnih meritev treh optičnih disdrometrov (pod krošnjo breze, pod krošnjo bora in nad krošnjama). Obravnavano obdobje (med 12. julijem 2022 in 16. februarjem 2023) smo razdelili na 48 padavinskih dogodkov in nato za posamezne dogodke izračunali čas trajanja, količino padavin, povprečno intenziteto padavin in mikrostrukturo dežnih kapljic (velikost, hitrost in število kapljic). Izračunali smo kinetično energijo (KE), maksimalno 30-minutno intenziteto (max I30) in dejavnik erozivnosti padavin (R). Vse spremenljivke smo izračunali za podatke nad krošnjama in pod njima.

Iz rezultatov je razvidno da se prestrežanje padavin s časom trajanja dogodkov zmanjšuje tako pri brezi kot pri boru. Kapljice so se pri prehodu skozi drevesne krošnje v obdobju vegetacije povečale. V obdobju mirovanja pa so se zmanjšale, vendar se je premer kapljic glede na celotno obravnavano obdobje kljub vsemu povečal (pod brezo za 46 %, pod borom za 25,5 %). Hitrost kapljic se je pod borom v povprečju zmanjšala za 38 %. Pod brezo pa se je malenkost povečala za 0,7 %, kar je posledica povečanja povprečne hitrosti pod njo v obdobju mirovanja (za 7 %). Iz dobljenih rezultatov smo ugotovili da ima prestrežanje padavin relativno velik vpliv na erozijo tal, saj se je dejavnik erozivnosti padavin (R) zaradi prestrežanja precej zmanjšal (pod brezo za 42,6 %, pod borom za 89,9 %).

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 556.12:57.012.3(043.2)
Author: Lana Radulović
Supervisor: Prof. Mojca šraj, Ph.D.
Co-supervisor: Assist. Prof. Nejc Bezak, Ph.D.
Title: The influence of precipitation interception on the microstructure of precipitation
Document type: Graduation Thesis – University studies
Notes: 56 p., 10 tab., 78 fig., 4 eq., 2 ann., 28 ref.
Keywords: rainfall, rainfall microstructure, rainfall interception, rainfall erosivity, disdrometer, drop size distribution (DSD)

Abstract

Precipitation interception, the process by which various vegetation retains precipitation, greatly affects natural processes (e.g. soil erosion). When dealing with precipitation, it is important to consider the microstructure of precipitation, since precipitation is a process consisting of a finite number of individual drops that appear in different sizes and fall at different velocities.

Precipitation data were obtained with the help of 1-minute measurements of three disdrometers (under the birch canopy, under the pine canopy and above them). The considered period (between July 12, 2022 and February 16, 2023) was divided into 48 rainfall events, and then the rainfall duration, amount of precipitation, average intensity of precipitation, and microstructure of raindrops (size, velocity, and number of drops) were calculated for individual events. Finally, we calculated kinetic energy (KE), maximum 30-minute intensity (max I30) and rainfall erosivity factor (R). All variables were calculated for data above and below both canopies.

It can be seen from the results that the interception of precipitation decreases with the duration of the events for both birch and pine tree. The size of droplets increased as they passed through the tree canopy during the vegetation season. During the leafless period, however, they decreased, but the diameter of the drops increased compared to the entire considered period (under the birch tree by 46 %, under the pine tree by 25.5 %). Droplet velocity decreased on average by 38 % under the pine tree. Under the birch tree, however, it increased by 0.7 %, which is the result of an increase in the average speed under it during the dormant period (by 7 %). From the obtained results, we found that the rainfall interception has a great influence on soil erosion, since the rainfall erosivity factor (R) was significantly reduced when raindrops passed through both tree canopies.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO

POPRAVKI – ERRATA.....	I
ZAHVALA.....	III
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	V
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VII
KAZALO SLIK.....	XI
KAZALO PREGLEDNIC	XV
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS.....	XVII
1 UVOD	1
1.1 Opis obravnavane problematike.....	1
1.2 Namen in cilj naloge.....	1
2 PODATKI IN METODE	3
2.1 Raziskovalna ploskev	3
2.1.1 Merska oprema (disdrometer OTT Parsivel)	3
2.1.2 Uporabljena programska oprema	6
2.2 Podatki	7
2.3 Teoretične osnove.....	7
2.3.1 Prestrežanje padavin	7
2.3.2 Število dežnih kapljic.....	8
2.3.3 Velikost dežnih kapljic (D50).....	8
2.3.4 Hitrost dežnih kapljic.....	8
2.3.5 Intenziteta padavin.....	9
2.3.6 Kinetična energija padavin (KE)	9
2.3.7 Erozijska tal.....	9
3 REZULTATI	11
3.1 Čas trajanja padavinskih dogodkov.....	11
3.2 Količina padavin nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze	12
3.3 Velikost dežnih kapljic nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze (D50)..	14
3.4 Povprečna hitrost kapljic nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze	18
3.5 Število kapljic nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze.....	21
3.6 Intenziteta dežnih kapljic nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze.....	25
3.7 Kinetična energija dežnih kapljic nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze	28
3.8 Maksimalna 30-minutna intenziteta padavinskih dogodkov nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze.....	31
3.9 Vrednost dejavnika erozivnosti padavin R nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze	35
4 ANALIZA REZULTATOV IN RAZPRAVA.....	39
4.1 Vpliv časa trajanja dogodka na delež prestreženih padavin.....	39
4.2 Vpliv mikrostrukture padavin na delež prestreženih padavin	39
4.3 Vpliv KE padavin na delež prestreženih padavin	42

4.4	Vpliv intenzitete padavin na delež prestreženih padavin	43
4.5	Primerjava treh različnih padavinskih dogodkov	44
4.5.1	Dogodek A	45
4.5.2	Dogodek B	46
4.5.3	Dogodek C	48
4.5.4	Glavni zaključki primerjave treh različnih dogodkov	50
5	ZAKLJUČKI.....	51
VIRI		53

KAZALO SLIK

Slika 1: Raziskovalna ploskev meritev prestrežanja padavin na Hajdrihovi 28 v Ljubljani.....	3
Slika 2: Disdrometer pod krošnjo breze.....	4
Slika 3: Disdrometer pod krošnjo bora.....	4
Slika 4: Disdrometer na strehi stavbe Oddelka za okoljsko gradbeništvo UL FGG.....	5
Slika 5: Shematični prikaz prestrežanja padavin.....	8
Slika 6: Porazdelitev časa trajanja padavinskih dogodkov glede na njihovo trajanje na prostem z uporabo t.i. violin grafa.....	11
Slika 7: Delež prestreženih padavin breze v celotnem obravnavanem obdobju.....	12
Slika 8: Delež prestreženih padavin bora v celotnem obravnavanem obdobju.....	12
Slika 9: Delež prestreženih padavin breze glede na količino padavin v celotnem obravnavanem obdobju.....	13
Slika 10: Delež prestreženih padavin bora glede na količino padavin v celotnem obravnavanem obdobju.....	13
Slika 11: Velikost kapljic (D50) na prostem in prepuščenih padavin pod krošnjama breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.....	15
Slika 12: Gostota verjetnosti velikosti kapljic (D50) na prostem in prepuščenih padavin pod krošnjama breze in bora za celotno obravnavano obdobje.....	15
Slika 13: Velikost kapljic (D50) na prostem in pod krošnjama breze in bora glede na obdobje vegetacije.....	16
Slika 14: Gostota verjetnosti pojava velikosti kapljic (D50) na prostem in prepuščenih padavin pod krošnjama breze in bora v obdobju vegetacije.....	16
Slika 15: Gostota verjetnosti pojava velikosti kapljic (D50) na prostem in prepuščenih padavin pod krošnjama breze in bora v obdobju mirovanja.....	17
Slika 16: Povprečna hitrost kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.....	18
Slika 17: Gostota verjetnosti povprečne hitrosti kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.....	19
Slika 18: Povprečna hitrost kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora glede na obdobje vegetacije.....	19
Slika 19: Gostota verjetnosti povprečne hitrosti kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje vegetacije.....	20
Slika 20: Gostota verjetnosti povprečne hitrosti kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje mirovanja.....	20
Slika 21: Število kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.....	22

Slika 22: Gostota verjetnosti števila kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.....	22
Slika 23: Število kapljic glede na obdobje vegetacije.	23
Slika 24: Gostota verjetnosti števila kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje vegetacije.	23
Slika 25: Gostota verjetnosti števila kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje mirovanja.	24
Slika 26: Intenziteta padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.	25
Slika 27: Gostota verjetnosti intenzitete padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.	26
Slika 28: Intenziteta dežnih kapljic glede na obdobje vegetacije.	26
Slika 29: Gostota verjetnosti intenzitete padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje vegetacije.	27
Slika 30: Gostota verjetnosti intenzitete padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje mirovanja.	27
Slika 31: KE padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.	28
Slika 32: Gostota verjetnosti KE padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.....	29
Slika 33: KE kapljic glede na obdobje vegetacije.	29
Slika 34: Gostota verjetnosti KE padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje vegetacije.	30
Slika 35: Gostota verjetnosti KE padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje mirovanja.	30
Slika 36: Max I30 padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.	32
Slika 37: Gostota verjetnosti max I30 padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.....	32
Slika 38: Maksimalne I30 glede na obdobje vegetacije.	33
Slika 39: Gostota verjetnosti max I30 padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje vegetacije.	33
Slika 40: Gostota verjetnosti max I30 padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje mirovanja.	34
Slika 41: Vrednosti dejavnika erozivnosti padavin R na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.	35

Slika 42: Vrednosti dejavnika erozivnosti padavin R na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.	36
Slika 43: Vrednosti dejavnika R glede na obdobje vegetacije.	36
Slika 44: Vrednosti dejavnika erozivnosti padavin R na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje vegetacije.	37
Slika 45: Vrednosti dejavnika erozivnosti padavin R na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje mirovanja.	37
Slika 46: Delež prestreženih padavin breze glede na trajanje padavinskih dogodkov.	39
Slika 47: Delež prestreženih padavin bora glede na trajanje padavinskih dogodkov.	39
Slika 48: Delež prestreženih padavin breze glede na D50.	40
Slika 49: Delež prestreženih padavin bora glede na D50.	40
Slika 50: Delež prestreženih padavin breze glede na povprečno hitrost kapljic.	41
Slika 51: Delež prestreženih padavin bora glede na povprečno hitrost kapljic.	41
Slika 52: Delež prestreženih padavin breze glede na število kapljic.	42
Slika 53: Delež prestreženih padavin bora glede na število kapljic.	42
Slika 54: Delež prestreženih padavin breze glede na KE kapljic.	43
Slika 55: Delež prestreženih padavin bora glede na KE kapljic.	43
Slika 56: Delež prestreženih padavin breze glede na povprečno intenziteto padavin.	44
Slika 57: Delež prestreženih padavin bora glede na povprečno intenziteto padavin.	44
Slika 58: Prikaz naraščanja števila kapljic v času trajanja dogodka A.	45
Slika 59: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic nad drevesnimi krošnjami pri dogodku A.	46
Slika 60: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo breze pri dogodku A.	46
Slika 61: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo bora pri dogodku A.	46
Slika 62: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic nad drevesnimi krošnjami pri dogodku A.	46
Slika 63: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo breze pri dogodku A.	46
Slika 64: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo bora pri dogodku A.	46
Slika 65: Prikaz naraščanja števila kapljic v času trajanja dogodka B.	47
Slika 66: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic nad drevesnimi krošnjami pri dogodku B.	47
Slika 67: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo breze pri dogodku B.	47
Slika 68: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo bora pri dogodku B.	47
Slika 69: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic nad drevesnimi krošnjami pri dogodku B.	48
Slika 70: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo breze pri dogodku B.	48
Slika 71: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo breze pri dogodku B.	48
Slika 72: Prikaz naraščanja števila kapljic v času trajanja dogodka C.	49
Slika 73: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic nad drevesnimi krošnjami pri dogodku C.	49
Slika 74: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo breze pri dogodku C.	49
Slika 75: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo bora pri dogodku C.	49

Slika 76: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic nad drevesnimi krošnjami pri dogodku C.	49
Slika 77: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo breze pri dogodku C.	49
Slika 78: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo bora pri dogodku C.	49

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Podatki o hitrostnih in velikostnih razredih kapljic (OTT Hydromet, 2016).	5
Preglednica 2: Minimalne, maksimalne in povprečne količine padavin in standardna deviacija na prostem in prepuščenih padavin pod krošnjo breze in pod krošnjo bora v mm.	14
Preglednica 3: Minimalni, maksimalni in povprečni D50 in standardna deviacija na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.	17
Preglednica 4: Minimalne, maksimalne in povprečne hitrosti kapljic in standardna deviacija na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.	21
Preglednica 5: Minimalno, maksimalno in povprečno število kapljic in standardna deviacija na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.	24
Preglednica 6: Maksimalne dosežene 1-minutne intenzitete.	28
Preglednica 7: Minimalne, maksimalne in povprečne dosežene vrednosti KE in standardna deviacija na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.	31
Preglednica 8: Minimalne, maksimalne in povprečne dosežene I30 in standardna deviacija na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.	34
Preglednica 9: Minimalne, maksimalne in povprečne dosežene vrednosti dejavnika R in standardna deviacija na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.	38
Preglednica 10: Primerjava treh izbranih padavinskih dogodkov.	50

»Ta stran je namenoma prazna«

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS

V tej diplomski nalogi so pogosto uporabljene okrajšave navedene spodaj.

DSD	Porazdelitev padavinskih delcev
I30	30-minutna intenziteta padavin
D50	Premer kapljice, za katerega velja, da je polovica volumna padavin v kapljicah z manjšim premerom, polovica pa v kapljicah z večjim premerom
KE	Kinetična energija padavin
R	Dejavnik erozivnosti padavin

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

1.1 Opis obravnavane problematike

Padavinski proces je sestavljen iz končnega števila posameznih kapljic, ki se pojavljajo v različnih velikostih in padajo z različno hitrostjo. Mikrostruktura padavin (velikost, hitrost in število dežnih kapljic) pogosto ni upoštevana pri obravnavanju padavin in z njimi povezanih hidroloških procesov, a ima velik vpliv na različne naravne procese in s tem tudi na praktične probleme (Uijlenhoet in Torres, 2006). Mikrostrukturo padavin merimo z disdrometri. Z meritvami z optičnim disdrometrom lahko dobimo 1-minutne podatke o mikrostrukturi padavin, in sicer iz porazdelitve padavinskih delcev (DSD).

Mikrostruktura padavin se lahko bistveno spremeni v procesu prestrežanja padavin. Prestrežanje padavin zaradi vegetacije je pomemben del hidrološkega kroga, saj vpliva na druge naravne procese (npr. površinski odtok, erozijo tal). Različne vrste vegetacije v različnih časovnih obdobjih prestrežajo padavine na različne načine in tako v veliki meri vplivajo na hidrološki in ekološki krog.

Proces padavinske erozije tal je sestavljen iz ločevanja posameznih delcev prsti in njihovega transporta (Carollo in sod., 2016). Kot pokazatelj erozivnega potenciala padavinskih dogodkov se pogosto uporablja kinetična energija (KE) padavin (Meshesha in sod., 2019). KE se skozi proces prestrežanja padavin spreminja, saj se spreminja mikrostruktura padavin. Erozivnost posameznega padavinskega dogodka lahko določimo, če poznamo podatke o hitrosti in velikosti posameznih kapljic (DSD) in intenziteti padavin (Carollo in sod., 2014). Če želimo ugotoviti vpliv prestrežanja padavin zaradi vegetacije na erozivnost padavin, moramo torej meriti mikrostrukturo padavin nad in pod vegetacijo.

1.2 Namen in cilj naloge

V diplomski nalogi smo podrobno analizirali 1-minutne meritve padavin in prestreženih padavin, ki so bile merjene s tremi optičnimi disdrometri, postavljenimi na Hajdrihovi 28. Merili smo padavine na prostem (disdrometer postavljen na strehi bližnjega objekta), prepuščene padavine pod krošnjo breze (*Betula pendula* Roth.) (disdrometer postavljen neposredno pod njo) in za prepuščene padavine pod krošnjo bora (*Pinus nigra* Arnold) (disdrometer postavljen neposredno pod njo).

S to raziskavo želimo potrditi že znano dejstvo, da imajo različne vrste dreves različne vplive na mikrostrukturo padavin. Dodatno želimo ugotoviti kakšen je ta vpliv na mikrostrukturo padavin (hitrost kapljic, velikost kapljic, število kapljic) za obe vrsti dreves (breza, bor) in v različnih fenoloških obdobjih. Poleg tega je cilj naloge tudi na podlagi meritev in dobljenih rezultatov ugotoviti erozivnost posameznih padavinskih dogodkov v obdobju meritev.

Definirali smo 3 glavne hipoteze, ki jih želimo dokazati oz. ovreči:

- 1) Prestrežanje padavin breze in bora v obeh glavnih fenoloških fazah zmanjšuje hitrost kapljic.
- 2) Prestrežanje padavin breze in bora v obeh glavnih fenoloških fazah zmanjšuje velikost kapljic.
- 3) Število kapljic se povečuje s preходом skozi krošnjo breze in bora v obeh glavnih fenoloških fazah.

»Ta stran je namenoma prazna«

2 PODATKI IN METODE

2.1 Raziskovalna ploskev

Raziskovalna ploskev se nahaja na Hajdrihovi 28, v Ljubljani, Slovenija (slika 1). Njena površina znaša približno 600 m². Klima na tem območju je subalpska, z morskimi in subkontinentalnimi vplivi (Zabret in Šraj, 2018; Zabret in sod., 2017; Zore, 2020). Povprečna letna količina padavin znaša 1380 mm (Zabret in Šraj, 2018; Zabret in sod., 2017; Zore, 2020).

Raziskava vključuje meritve padavin in njihovih lastnosti nad streho in pod krošnjama dveh drevesnih skupin, in sicer skupine navadnih brez (*Betula pendula* Roth.) in skupine črnih borov (*Pinus nigra* Arnold). Vse meritve so bile opravljene z optičnimi disdrometri OTT Parsivel (OTT Hydromet, 2016). Na raziskovalni ploskvi se nahajajo 3 optična disdrometra. Disdrometra, ki sta postavljena na strehi in pod krošnjo breze sta starejše verzije 1, pod krošnjo bora pa je novejša verzija 2. Z vsemi so pridobljeni 1-minutni podatki o količini intenziteti padavin, ter podatki o številu kapljic, hitrosti in premeru kapljic.



Slika 1: Raziskovalna ploskev meritev prestrežanja padavin na Hajdrihovi 28 v Ljubljani.

2.1.1 Merska oprema (disdrometer OTT Parsivel)

Meritve pod drevesno krošnjo so opravljene z optičnim disdrometrom OTT Parsivel (OTT Hydromet, 2016) pod navadno brezo (verzija 1) in pod črnim borom (verzija 2), ki sta prikazana na slikah 2 in 3. Meritve nad streho so opravljene z istim tipom in verzijo optičnega disdrometra kot pod krošnjo navadne breze (slika 4). Ta je nameščen na strehi stavbe Oddelka za okoljsko gradbeništvo UL FGG, Hajdrihova 28.

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 prekinitvev laserskega traku. Hitrost kapljic določi iz velikosti

prekinitve, premer pa iz časa prekinitve. Merilna površina disdrometra je $180 \times 30 \text{ mm}$ (OTT Hydromet, 2016).



Slika 2: Disdrometer pod krošnjo breze.



Slika 3: Disdrometer pod krošnjo bora.



Slika 4: Disdrometer na strehi stavbe Oddelka za okoljsko gradbeništvo UL FGG.

2.1.1.1 Velikostna in hitrostna porazdelitev padavinskih delcev (DSD)

Disdrometer nam poda podatke o velikosti in hitrosti kapljic, in sicer tako da zaznane kapljice razdeli po velikostnih in hitrostnih razredih. Padavine so razdeljene v 32 hitrostnih in 32 velikostnih razredov (skupaj $32 \times 32 = 1024$ razredov) (OTT Hydromet, 2016). Srednje velikosti razredov se gibljejo med 0,062 mm (najnižji razred) in 24,5 mm (najvišji razred). Srednje hitrosti razredov se gibljejo med 0,05 m/s (najnižji razred) in 20,8 m/s (najvišji razred) (preglednica 1).

Preglednica 1: Podatki o hitrostnih in velikostnih razredih kapljic (OTT Hydromet, 2016).

Razred	Premer dežnih kapljic				Hitrost dežnih kapljic			
	Razred D dežnih kapljic [mm]	D_a spodnja meja [mm]	D_i srednja velikost [mm]	D_b zgornja meja [mm]	Razred V dežnih kapljic [m/s]	V_a spodnja meja [m/s]	V_i srednja hitrost [m/s]	V_b zgornja meja [m/s]
1	0,125	0,000	0,062	0,125	0,100	0,000	0,050	0,100
2	0,125	0,125	0,187	0,250	0,100	0,100	0,150	0,200
3	0,125	0,250	0,312	0,375	0,100	0,200	0,250	0,300
4	0,125	0,375	0,437	0,500	0,100	0,300	0,350	0,400
5	0,125	0,500	0,562	0,625	0,100	0,400	0,450	0,500
6	0,125	0,625	0,687	0,750	0,100	0,500	0,550	0,600
7	0,125	0,750	0,812	0,875	0,100	0,600	0,650	0,700

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 1

8	0,125	0,875	0,937	1,000	0,100	0,700	0,750	0,800
9	0,125	1,000	1,062	1,125	0,100	0,800	0,850	0,900
10	0,125	1,125	1,187	1,250	0,100	0,900	0,950	1,000
11	0,250	1,250	1,375	1,500	0,200	1,000	1,100	1,200
12	0,250	1,500	1,625	1,750	0,200	1,200	1,300	1,400
13	0,250	1,750	1,875	2,000	0,200	1,400	1,500	1,600
14	0,250	2,000	2,125	2,250	0,200	1,600	1,700	1,800
15	0,250	2,250	2,375	2,500	0,200	1,800	1,900	2,000
16	0,500	2,500	2,750	3,000	0,400	2,000	2,200	2,400
17	0,500	3,000	3,250	3,500	0,400	2,400	2,600	2,800
18	0,500	3,500	3,750	4,000	0,400	2,800	3,000	3,200
19	0,500	4,000	4,250	4,500	0,400	3,200	3,400	3,600
20	0,500	4,500	4,750	5,000	0,400	3,600	3,800	4,000
21	1,000	5,000	5,500	6,000	0,800	4,000	4,400	4,800
22	1,000	6,000	6,500	7,000	0,800	4,800	5,200	5,600
23	1,000	7,000	7,500	8,000	0,800	5,600	6,000	6,400
24	1,000	8,000	8,500	9,000	0,800	6,400	6,800	7,200
25	1,000	9,000	9,500	10,000	0,800	7,200	7,600	8,000
26	2,000	10,000	11,000	12,000	1,600	8,000	8,800	9,600
27	2,000	12,000	13,000	14,000	1,600	9,600	10,400	11,200
28	2,000	14,000	15,000	16,000	1,600	11,200	12,000	12,800
29	2,000	16,000	17,000	18,000	1,600	12,800	13,600	14,400
30	2,000	18,000	19,000	20,000	1,600	14,400	15,200	16,000
31	3,000	20,000	21,500	23,000	3,200	16,000	17,600	19,200
32	3,000	23,000	24,500	26,000	3,200	19,200	20,800	22,400

2.1.2 Uporabljena programska oprema

Za pripravo in analizo podatkov smo uporabili programsko orodje R (R core team, 2023) in tudi Microsoft Excel. Podatki so prikazani grafično, z uporabo več vrst grafov, in sicer »*violin plot*«, »*density plot*« in »*level plot*«.

»*Violin plot*« ima 5 značilnih točk (min, 25 % vrednost, mediano, 75 % vrednost, max). Pri »*violin plot*«-u stranice niso ravne, ampak dodatno prikazujejo gostoto verjetnosti spremenljivke. »*Density plot*« je graf gostote, ki prikazuje porazdelitev numerične spremenljivke. »*Level plot*« ustvari konturni izris z območji med konturami zapolnjenimi s polno barvo.

Paketi, ki smo jih uporabili v programskem orodju R za grafičen prikaz rezultatov so »*lattice*« (Sarkar, 2008), »*ggplot2*« (Wickham, 2016) in »*dplyr*« (Wickham in sod., 2023).

2.2 Podatki

V diplomski nalogi so bili obravnavani padavinski dogodki v obdobju med 12. julijem 2022 in 16. februarjem 2023. V tem 7 mesečnem obdobju je bilo zabeleženih 48 padavinskih dogodkov s skupno količino padavin večjo od 1 mm. Dogodki so razdeljeni tako, da jih je ločevalo vsaj 4-urno suho obdobje, ki predstavlja povprečen čas, ko se krošnje posušijo. Za vsak padavinski dogodek smo obravnavali podatke o količini in intenziteti padavin, ter podatke o mikrostrukturi padavin (število, hitrost in velikost kapljic).

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

2.3 Teoretične osnove

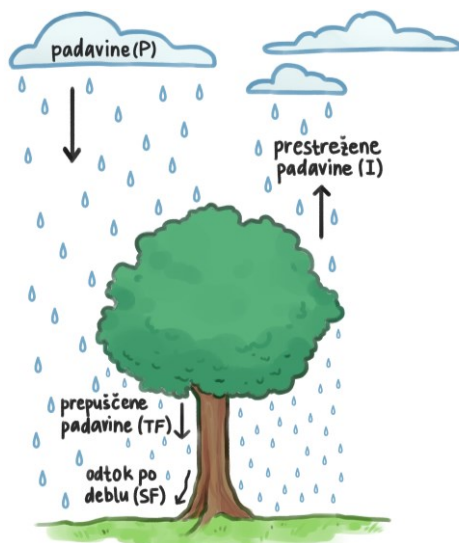
2.3.1 Prestrežanje padavin

Prestrežanje padavin je proces, do katerega pride med padavinskimi dogodki v primeru, ko so tla porasla s vegetacijo. Na rastlinah ostane del padavin, ki nikoli ne doseže tal, saj med ali takoj po dogodku izhlapi nazaj v ozračje (Brilly in Šraj, 2014). Delež prestreženih oz. prepuščenih padavin je odvisen od različnih meteoroloških in vegetacijskih parametrov (Zabret in sod., 2016).

Skupne padavine v padavinskem dogodku (P), ki pridejo v stik z drevesno krošnjo, se razdelijo na tiste, ki padejo na tla neposredno (ang. *throughfall*, TF) in tiste, ki se zadržijo na krošnji. Del teh padavin, ki jih zadržijo drevesne krošnje in ne izhlapijo nazaj v ozračje (I), pa lahko doseže tla posredno na dva načina, in sicer s kapljanjem z listja ali vej (prepuščene padavine) ali pa z odtokom po steblu (ang. *stemflow*, SF) (npr. Brilly in Šraj, 2014; Zabret, 2018; Zore, 2020; Levia in sod., 2017; Brandt, 1989) (slika 5).

Količino prestreženih padavin lahko določimo z enostavno bilančno enačbo, in sicer od skupnih padavin (P) odštejemo prepuščene padavine (TF) in odtok po deblu (SF), kot je prikazano v enačbi 1 (povzeto po Zabret, 2018).

$$I = P - TF - SF \tag{1}$$



Slika 5: Shematični prikaz prestrežanja padavin.

2.3.2 Število dežnih kapljic

Število dežnih kapljic je izmerjeno s pomočjo disdrometra, na podlagi principa njegovega delovanja. Disdrometer zazna kapljice kot prekinitve svetlobnih trakov (OTT Hydromet, 2016).

2.3.3 Velikost dežnih kapljic (D50)

Velikost dežnih kapljic je predstavljena s premerom kapljice, za katerega velja, da je polovica volumna padavin v kapljicah z manjšim premerom, polovica pa v kapljicah z večjim premerom (D50).

D50 (ang. *median-volume drop diameter, MVD*) je izračunan za vsak padavinski dogodek posebej, po enačbi 2 (npr. Zabret, 2018; Nanko in sod., 2016) glede na podatke pridobljene z optičnim disdrometrom.

$$D_{50} = b_i + \left(\frac{0,5 - cum_{i-1}}{pro_i} \right) * (b_{i+1} - b_i) \quad (2)$$

V enačbi 2 D_{50} [mm] predstavlja premer kapljice, b_i [mm] predstavljajo mejne vrednosti velikostnih razredov, pro_i [-] predstavlja delež spektra vsebnosti vode v razredu, cum_{i-1} [-] predstavlja kumulativni delež spektra v razredu, pri čemer je trenutni razred označen z i .

2.3.4 Hitrost dežnih kapljic

Eden od glavnih dejavnikov, ki vplivajo na kinetično energijo padavin je končna hitrost dežnih kapljic (njihova hitrost, ko dosežejo tla). Gibanje dežnih kapljic je definirano kot medsebojno delovanje gravitacijske in vzgonske sile, ter sile upora (Giráldez in sod., 2022).

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 (npr. Gunn in Kinzer, 1949; Zabret in sod, 2017).

2.3.5 Intenziteta padavin

Intenziteta padavin predstavlja jakost padavin in se spreminja tekom dogodka. V nalogi so izračunane povprečne intenzitete in maksimalne 1-min intenzitete za vse posamezne dogodke.

2.3.5.1 Maksimalna 30-minutna intenziteta

Maksimalna 30-minutna intenziteta ali I30 je največja intenziteta padavin v obdobju 30 minut. Vrednost I30 je pomembna, ker zagotavlja merilo največje količine padavin, ki se lahko pojavi v kratkem časovnem obdobju. Če so padavine zelo močne za kratek čas, lahko povzročijo površinski odtok in erozijo tal. Zato je razumevanje I30 ključnega pomena pri upravljanju in preprečevanju erozije tal na določenem območju.

2.3.6 Kinetična energija padavin (KE)

Kinetična energija (KE) padavin je odvisna od hitrosti kapljic. KE lahko izračunamo s pomočjo empiričnih enačb na podlagi intenzitete padavin ali iz porazdelitve padavinskih delcev (DSD) (npr. Petan, 2010; Zore, 2020).

V diplomski nalogi je $KE(dsd)$ [$J\ m^{-2}\ h^{-1}$] izračunana iz porazdelitve padavinskih delcev. Izračun je narejen za vse obravnavane padavinske dogodke s pomočjo podatkov merjenih z disdrometrom z uporabo enačbe 3 (Petan, 2010):

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

V enačbi 3 ρ [kg/m^3] predstavlja gostoto vode, F [mm] predstavlja merilno površino disdrometra, Δt [$1/60\ h$] predstavlja interval trajanja, n_i [-] predstavlja število zaznanih kapljic znotraj i-tega velikostnega razreda, $D_{a,i}$ [mm] predstavlja spodnjo mejo premera kapljic znotraj i-tega velikostnega razreda, $D_{b,i}$ [mm] predstavlja zgornjo mejo premera kapljic znotraj i-tega velikostnega razreda, D_i [mm] predstavlja premer kapljic znotraj i-tega razreda, $v_{a,i}$ [m/s] predstavlja spodnjo mejo hitrosti padanj kapljic znotraj i-tega hitrostnega razreda, $v_{b,i}$ [m/s] predstavlja zgornjo mejo hitrosti padanj kapljic znotraj i-tega hitrostnega razreda, v_i [m/s] predstavlja hitrost padanja kapljic znotraj i-tega razreda.

2.3.7 Erozijska tal

Erozijo tal povzročajo tako naravni dejavniki (padavine, veter, ledeniki, ipd.), kot tudi živali in ljudje. Erozijska pomeni vsako odstranjevanje delcev tal, ki je intenzivnejše od njegovega nastajanja (Komac in Zorn, 2005).

Za ocenjevanje erozije tal se pogosto uporablja metodologija RUSLE (Renard in sod., 1997). V enačbi nastopa tudi pomemben dejavnik erozivnosti padavin in odtoka (R). R lahko izračunamo po enačbi 4 (Renard in sod., 1997):

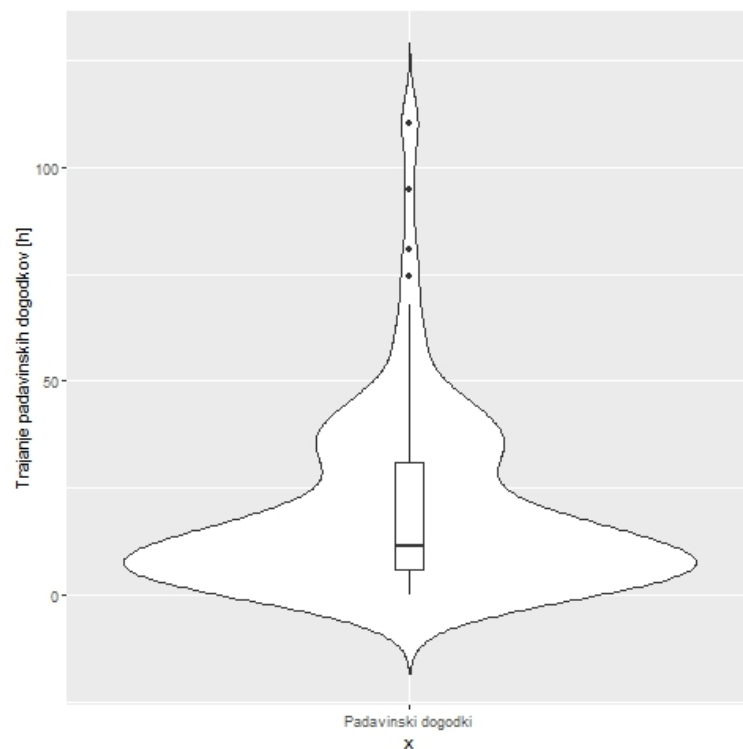
$$R = \frac{\Sigma_{ed} * E * I_{30}}{N} \quad (4)$$

V enačbi 4 $R[\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}]$ predstavlja dejavnik erozivnosti padavin in odtoka, $E[\text{MJ/ha}]$ predstavlja letno povprečje vsote produktov KE padavin, $I_{30}[\text{mm/h}]$ predstavlja maksimalno 30-minutno intenziteto padavin, $N[-]$ predstavlja število letih v katerim so padavinski dogodki nastopili.

3 REZULTATI

3.1 Čas trajanja padavinskih dogodkov

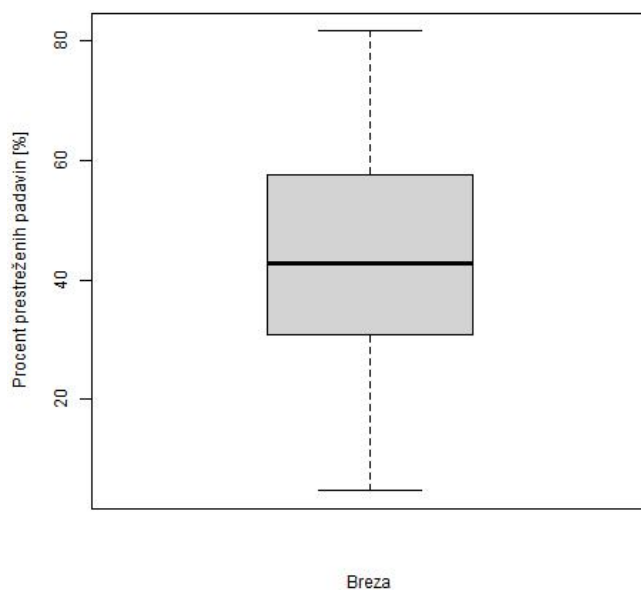
Čas trajanja posameznih padavinskih dogodkov je opredeljen glede na njihovo trajanje na prostem (glede na meritve disdrometra, ki je postavljen na strehi). Časovni razmik med dogodki je minimalno 4 ure. Najkrajši dogodek v obravnavanem obdobju je trajal 1 uro in 25 min (24. 01. 2023), najdaljši pa je trajal 110 ur in 42 min (15-19. 01. 2023). Mediana trajanja vseh 48 padavinskih dogodkov je 13h. Porazdelitev časa trajanja dogodkov je predstavljena na sliki 6.



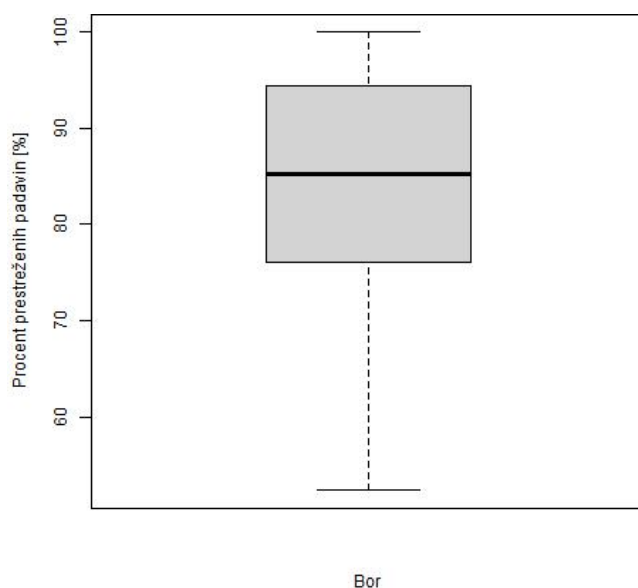
Slika 6: Porazdelitev časa trajanja padavinskih dogodkov glede na njihovo trajanje na prostem z uporabo t.i. violin grafa.

3.2 Količina padavin nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze

Vsota količine padavin, ki so padle na prostem v obravnavanem obdobju, na podlagi podatkov z disdrometra znaša 1252,5 mm. Skupna količina padavin pod brezo in borom je precej manjša zaradi prestrežanja padavin, do katerega je prišlo pri vseh 48-ih dogodkih. Pod krošnjo breze je bilo izmerjenih 862,7 mm prepuščenih padavin (slika 7), kar pomeni da je na njeni krošnji v povprečju ostalo 31,1 % skupne količine padavin, ki je izhlapela v ozračje. Bor je v obravnavanem obdobju zadržal precej večjo količino padavin, in sicer v povprečju 66,0 % skupne količine padavin, saj je bilo pod borom izmerjenih 427,07 mm prepuščenih padavin (slika 8).

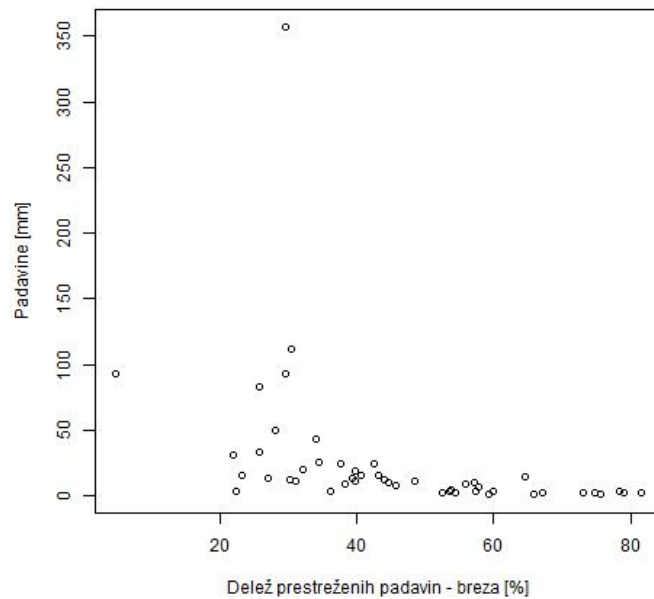


Slika 7: Delež prestreženih padavin breze v celotnem obravnavanem obdobju.

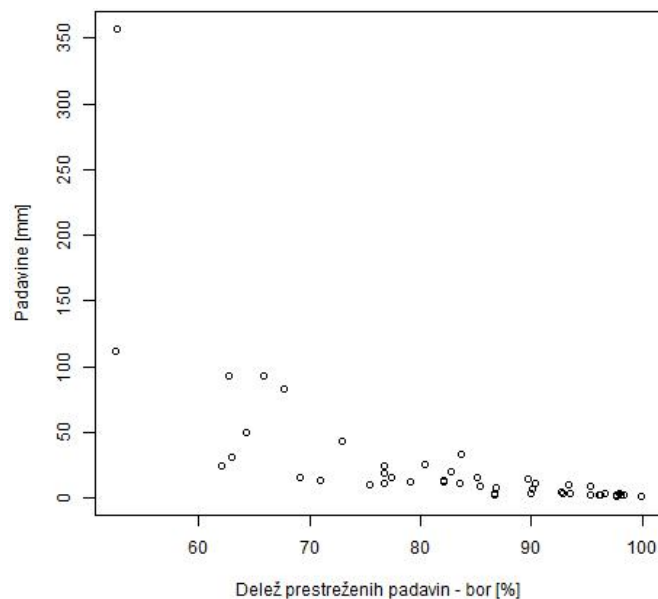


Slika 8: Delež prestreženih padavin bora v celotnem obravnavanem obdobju.

Na slikah 9 in 10 je grafično prikazan delež prestreženih padavin za obe drevesi glede na skupno količino padlih padavin.



Slika 9: Delež prestreženih padavin breze glede na količino padavin v celotnem obravnavanem obdobju.



Slika 10: Delež prestreženih padavin bora glede na količino padavin v celotnem obravnavanem obdobju.

V preglednici 2 so prikazane minimalne in maksimalne količine padavin na prostem (P) ter prepuščenih padavin (Tf), pod krošnjo breze in pod krošnjo bora v celotnem obravnavanem obdobju.

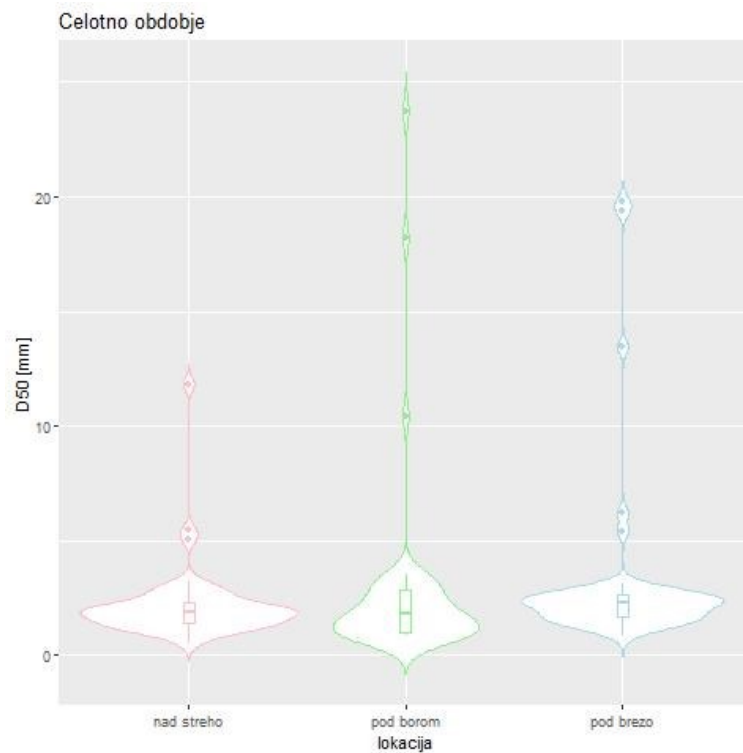
Preglednica 2: Minimalne, maksimalne in povprečne količine padavin in standardna deviacija na prostem in prepuščenih padavin pod krošnjo breze in pod krošnjo bora v mm.

Količina padavin [mm]	Celotno obdobje	Obdobje vegetacije	Obdobje mirovanja
	Streha		
Min.	1,01	1,01	1,14
Povprečno	26,09	24,99	28,77
Maks.	356,52	356,52	93,12
St. deviacija	54,52	61,86	29,84
	Breza		
Min.	0,25	0,25	0,46
Povprečno	17,97	16,63	21,24
Maks.	251,24	251,24	88,29
St. deviacija	39,47	43,92	25,32
	Bor		
Min.	0,00	0,00	0,00
Povprečno	8,90	8,83	9,06
Maks.	168,76	168,76	34,51
St. deviacija	25,54	29,49	11,17

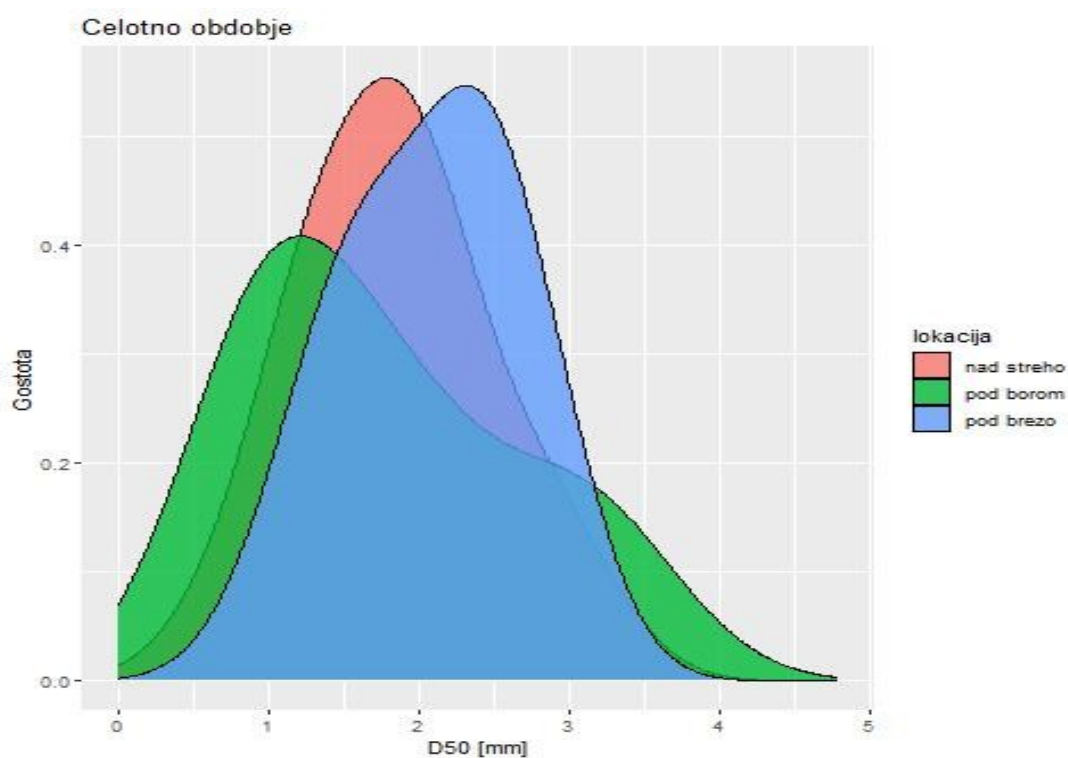
3.3 Velikost dežnih kapljic nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze (D50)

Povprečni premer kapljic v celotnem obravnavanem obdobju nad streho je znašal 2,20 mm, pod krošnjo breze je znašal 3,21 mm, pod krošnjo bora pa 2,75 mm. Vidimo, da se je premer pod drevesnim krošnjami v povprečju, glede na celotno obdobje povečal. Pod krošnjo breze se je povečal za 46,0 %, pod krošnjo bora pa za 25,5 %.

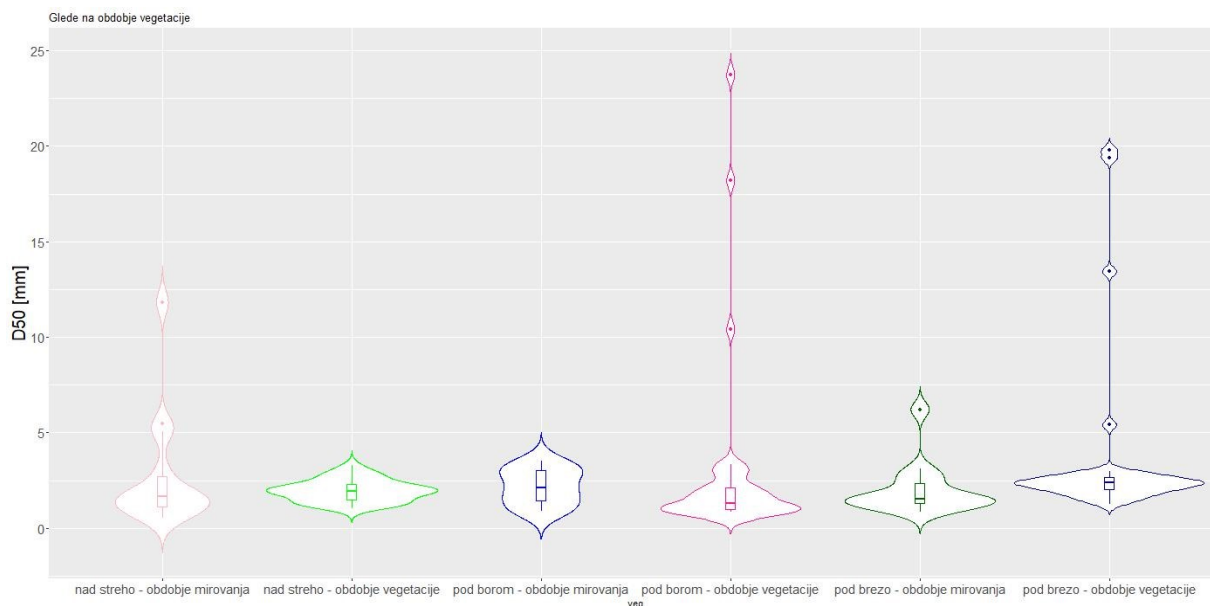
D50 se je na prostem večinoma gibal med 0.5 mm in 5 mm, razen v enem dogodku, ko je ta premer znašal 11,83 mm. Ugotovili smo, da ta največji premer ustreza dogodku, ki se je zgodil v sredini januarja leta 2023, ko so bile padavine obilne in je tudi snežilo. Največji premeri pod drevesnim krošnjam se časovno ne ujemajo z največjimi premeri nad njimi (sliki 11 in 12).



Slika 11: Velikost kapljic (D50) na prostem in prepuščenih padavin pod krošnjama breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.

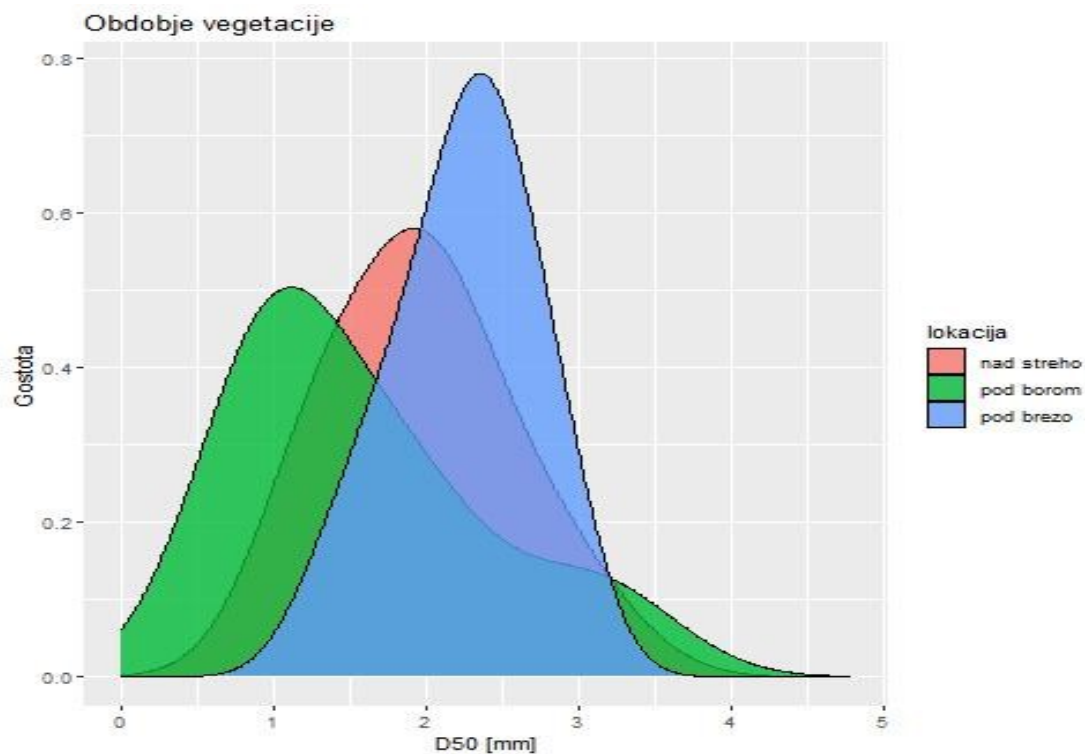


Slika 12: Gostota verjetnosti velikosti kapljic (D50) na prostem in prepuščenih padavin pod krošnjam breze in bora za celotno obravnavano obdobje.



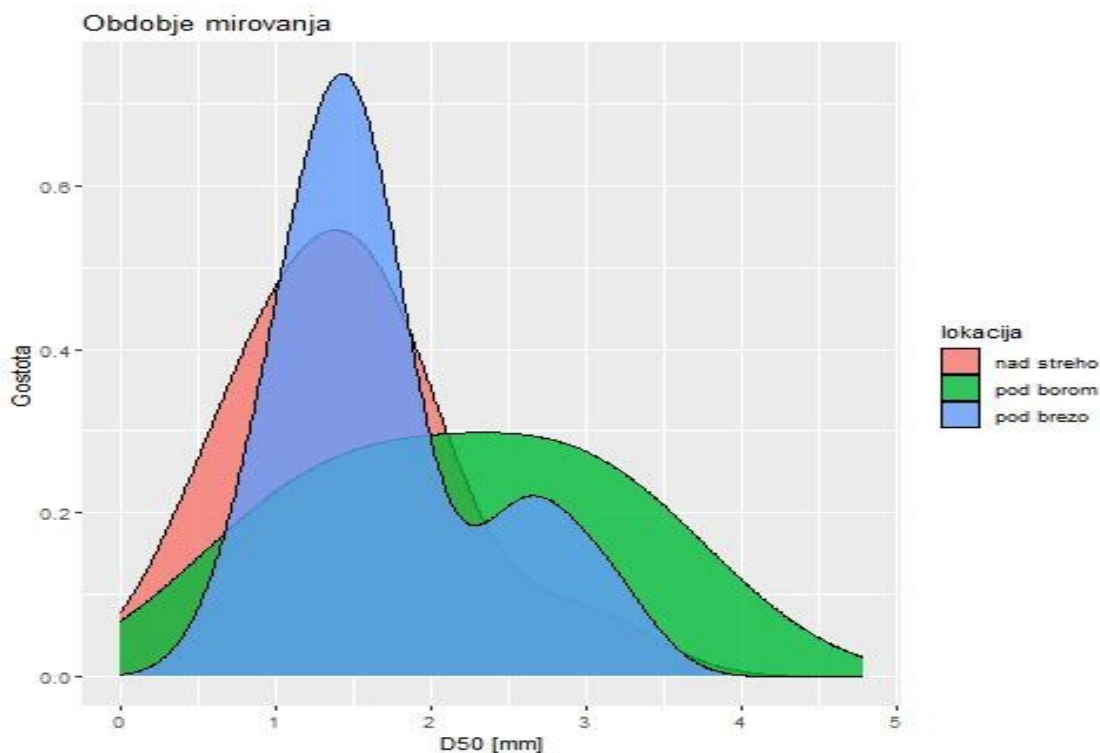
Slika 13: Velikost kaplic (D50) na prostem in pod krošnjama breze in bora glede na obdobje vegetacije.

V obdobju vegetacije (sliki 13 in 14) je povprečni premer kapljice nad streho znašal 1,97 mm, pod krošnjo breze je znašal 3,69 mm, pod krošnjo bora pa 2,99 mm. Glede na premer nad drevesnimi krošnjami se je premer pod krošnjo breze povečal za 87,3 %, pod krošnjo bora pa za 51,8 %.



Slika 14: Gostota verjetnosti pojava velikosti kapljic (D50) na prostem in prepuščenih padavin pod krošnjama breze in bora v obdobju vegetacije.

V obdobju mirovanja (slika 13 in 15) je povprečni premer kapljice nad streho znašal 2,74 mm, pod krošnjo breze je znašal 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 streho. Pod brezo se je zmanjšal za 26 %, pod borom pa za 20,4 %.



Slika 15: Gostota verjetnosti pojava velikosti kapljic (D50) na prostem in prepuščenih padavin pod krošnjama breze in bora v obdobju mirovanja.

Iz dobljenih rezultatov lahko ugotovimo, da prisotnost listov vpliva na povečanje povprečnega premera kapljic pod drevesno krošnjo v primeru obeh obravnavanih drevesnih vrst.

V preglednici 3 so prikazani minimalni in maksimalni doseženi D50 na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.

Preglednica 3: Minimalni, maksimalni in povprečni D50 in standardna deviacija na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.

D50 [mm]	Celotno obdobje	Obdobje vegetacije	Obdobje mirovanja
Streha			
Min.	0,53	1,02	0,53
Povprečno	2,20	1,97	2,74
Maks.	11,83	3,29	11,83
St. deviacija	1,67	0,56	2,90
Breza			
Min.	0,85	1,28	0,85
Povprečno	3,21	3,69	2,03

se nadaljuje ...

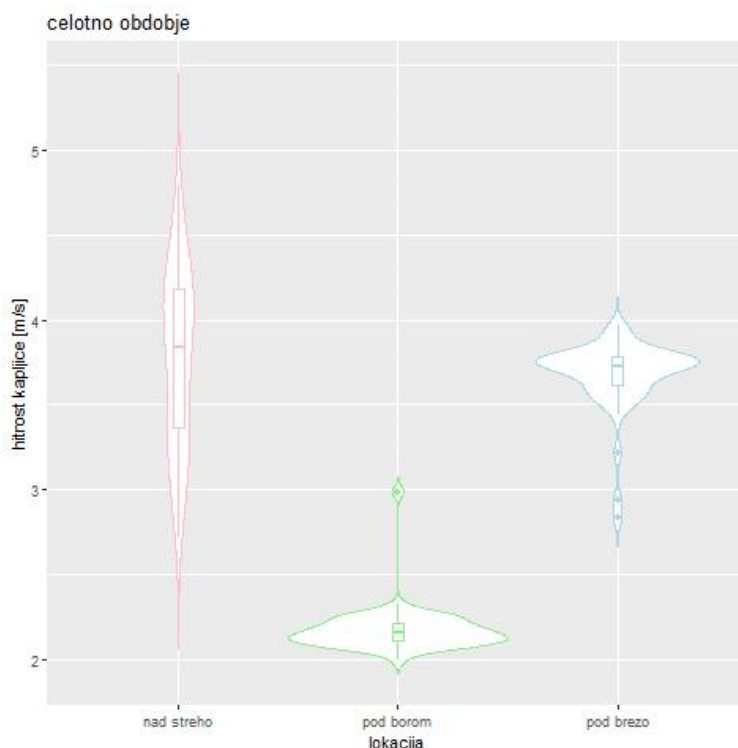
... nadaljevanje Preglednice 3

Maks.	19,81	19,81	6,21
St. deviacija	3,88	4,44	1,31
Bor			
Min.	0,85	0,85	0,92
Povprečno	2,75	2,99	2,18
Maks.	23,73	23,73	3,54
St. deviacija	4,12	4,84	0,90

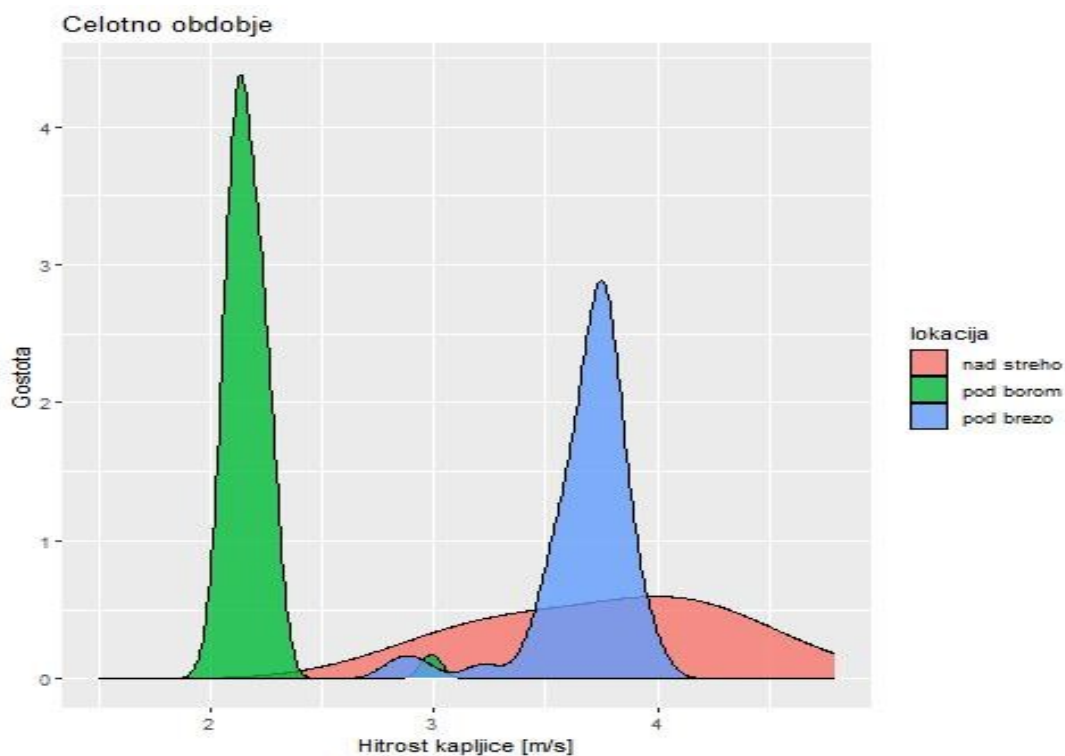
3.4 Povprečna hitrost kapljic nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze

Glede na celotno obdobje opazovanja se je povprečna hitrost kapljic nad streho 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 padale v razponu povprečnih hitrosti od 2,83 m/s in 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.

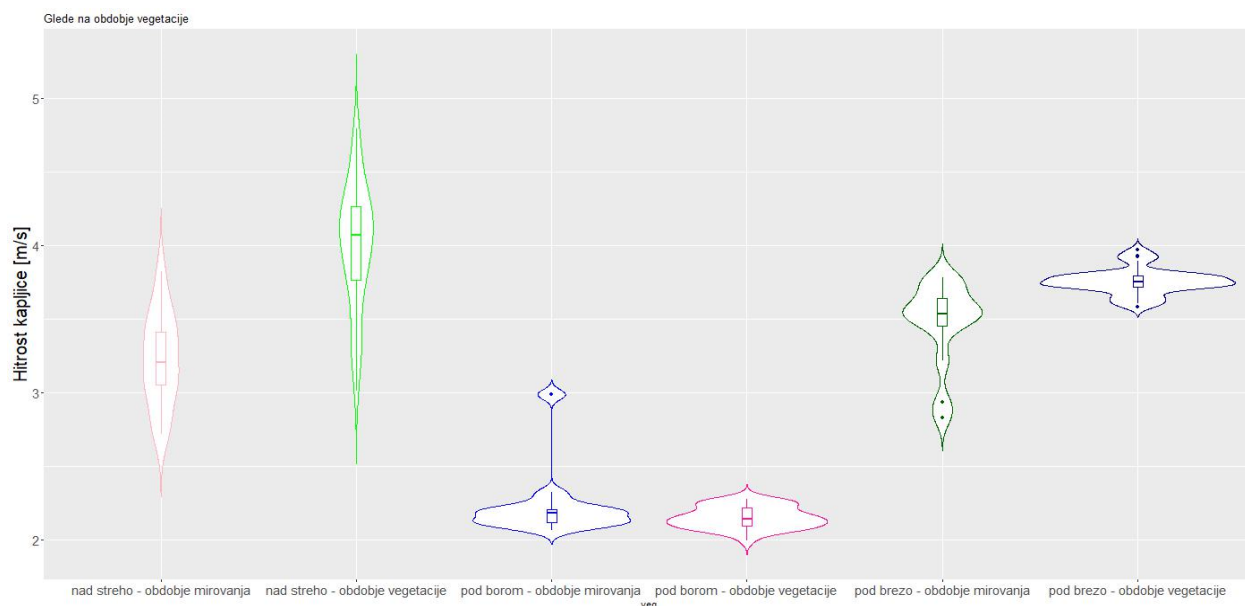
Glede na povprečno hitrost nad streho se je povprečna hitrost pod krošnjo breze povečala za 0,7 %, kar je posledica povečanja povprečne hitrosti pod krošnjo, ko na njej ni bilo listja. Pod krošnjo bora pa se je povprečna hitrost zmanjšala za 38 % glede na celotno obdobje meritev (sliki 16 in 17).



Slika 16: Povprečna hitrost kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.



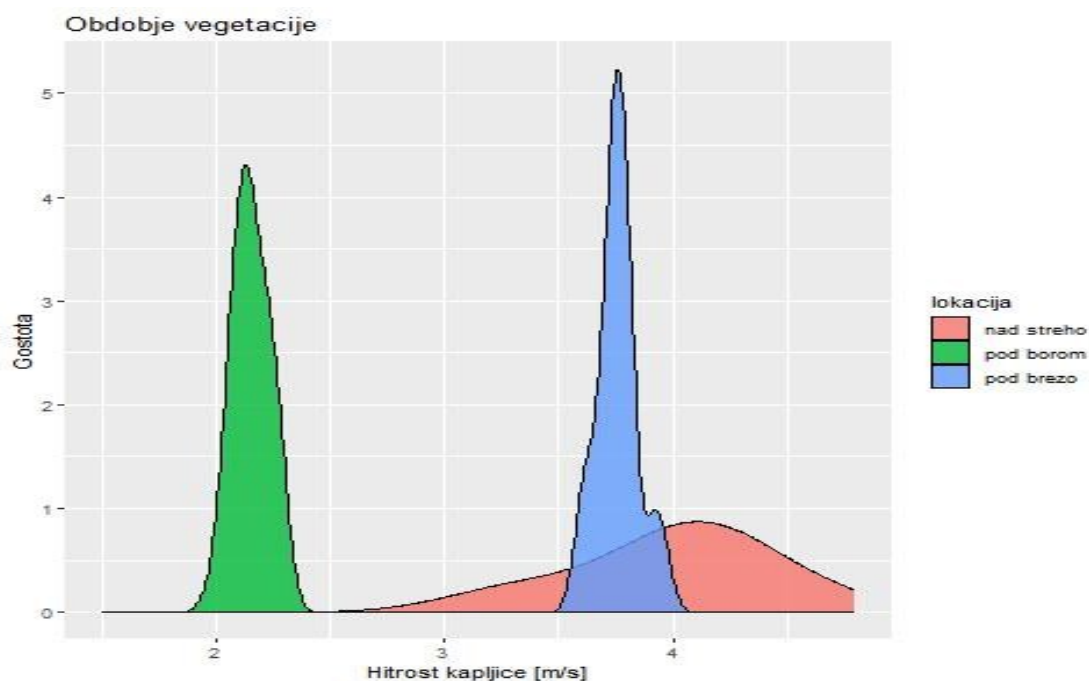
Slika 17: Gostota verjetnosti povprečne hitrosti kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.



Slika 18: Povprečna hitrost kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora glede na obdobje vegetacije.

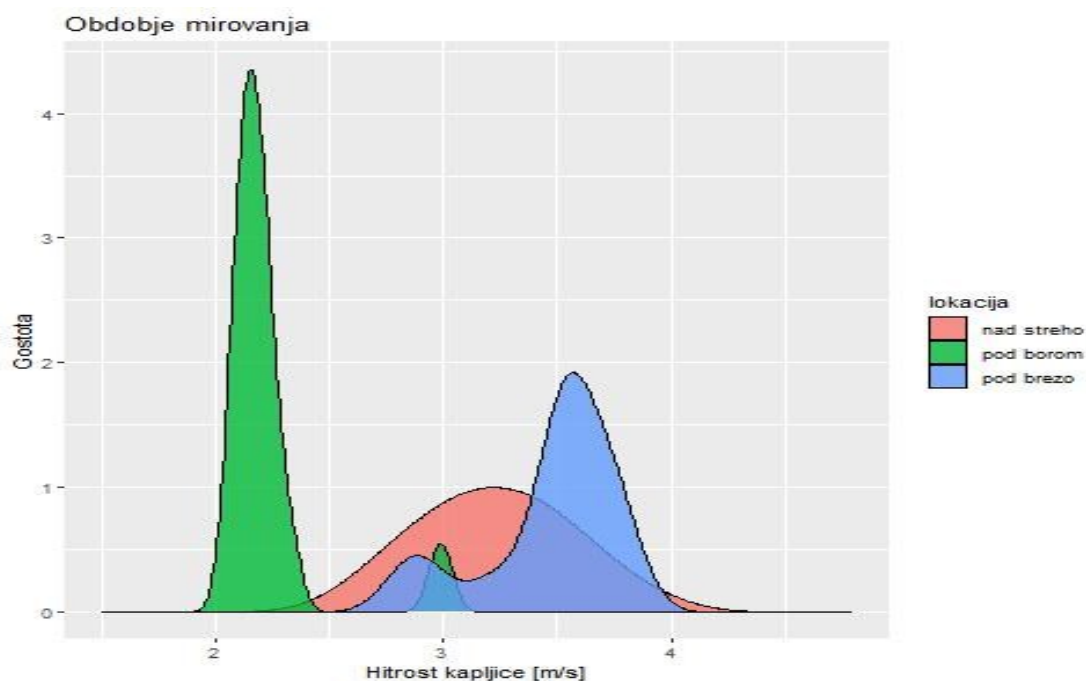
V obdobju vegetacije (sliki 18 in 19) so kapljice nad streho v povprečju padale s hitrostjo 3,94 m/s, pod krošnjo breze s hitrostjo 3,75 m/s in pod krošnjo bora s hitrostjo 2,19 m/s.

Ugotovimo, da se je v obdobju vegetacije, ko je listje na krošnji breze bilo v večji meri prisotno, povprečna hitrost pod njo zmanjšala za 5 % glede na povprečno hitrost nad njo.



Slika 19: Gostota verjetnosti povprečne hitrosti kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje vegetacije.

V obdobju mirovanja (sliki 18 in 20) so kapljice nad streho v povprečju padale s hitrostjo 3,13 m/s, kar je za 7 % manjše od povprečne hitrosti kapljic izmerjenih pod krošnjo breze. Pod krošnjo bora pa se je povprečna hitrost kapljic glede na povprečno hitrost kapljic nad njo zmanjšala, in to za 30,6 %.



Slika 20: Gostota verjetnosti povprečne hitrosti kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje mirovanja.

V preglednici 4 so prikazane minimalne in maksimalne dosežene povprečne hitrosti padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.

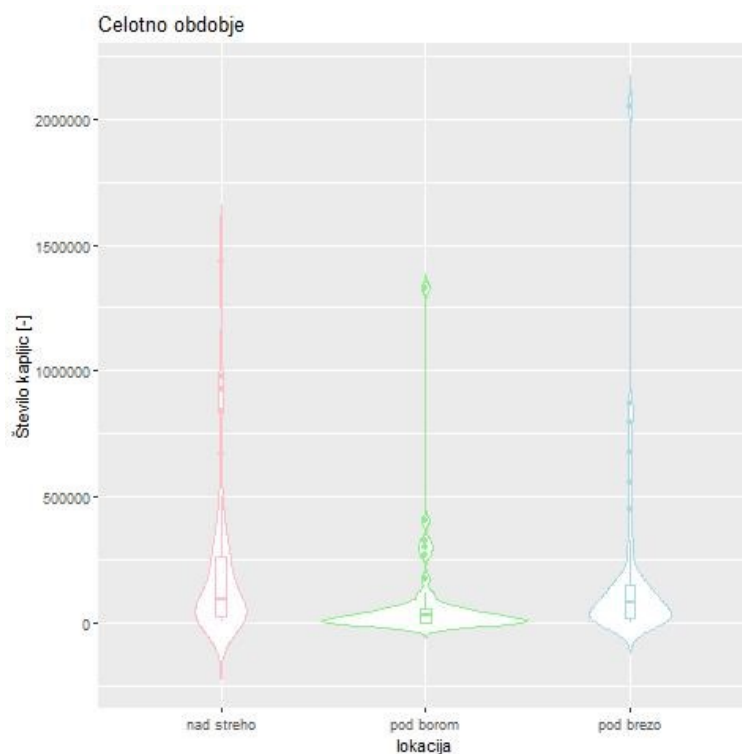
Preglednica 4: Minimalne, maksimalne in povprečne hitrosti kapljic in standardna deviacija na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.

Povprečna hitrost [m/s]	Celotno obdobje	Obdobje vegetacije	Obdobje mirovanja
	Streha		
Min.	2,20	3,01	2,72
Povprečno	3,52	3,94	3,13
Maks.	4,80	4,80	3,82
St. deviacija	0,53	0,42	0,31
	Breza		
Min.	2,83	3,58	2,83
Povprečno	3,54	3,75	2,91
Maks.	3,97	3,97	3,78
St. deviacija	0,21	0,09	0,28
	Bor		
Min.	2,00	2,00	2,07
Povprečno	2,18	2,19	2,17
Maks.	2,99	2,28	3,54
St. deviacija	0,14	0,07	0,22

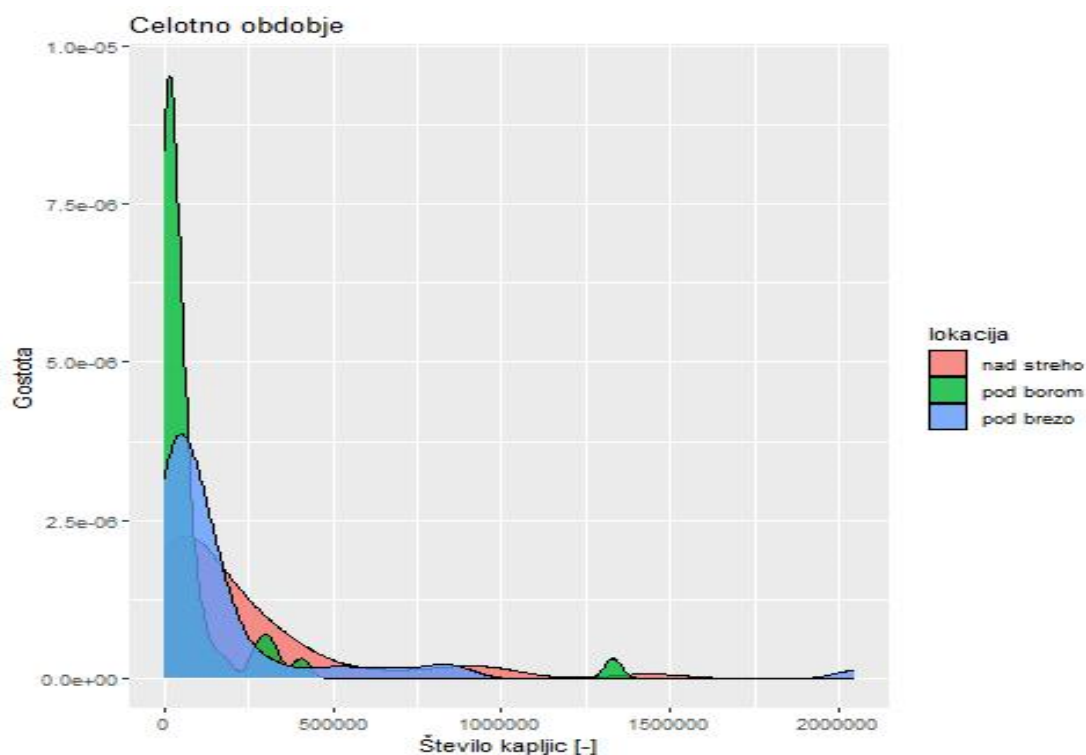
3.5 Število kapljic nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze

V celotnem obdobju opazovanja je nad streho padlo skupaj 10.283.097 kapljic (povprečno 214.231 kapljic po dogodku). V istem obdobju je pod krošnjo breze padlo skupaj 8.722.023 (povprečno 181.709 kapljic po dogodku), pod krošnjo bora pa 4.012.797 kapljic (povprečno 83.600 kapljic po dogodku).

Iz dobljenih rezultatov je razvidno da je pod brezo padlo za približno 15,2 % manj kapljic kot nad krošnjo. Pod krošnjo bora je bilo število kapljic za 61 % manjše kot nad njo in za 54 % manjše kot pod krošnjo breze (sliki 21 in 22).

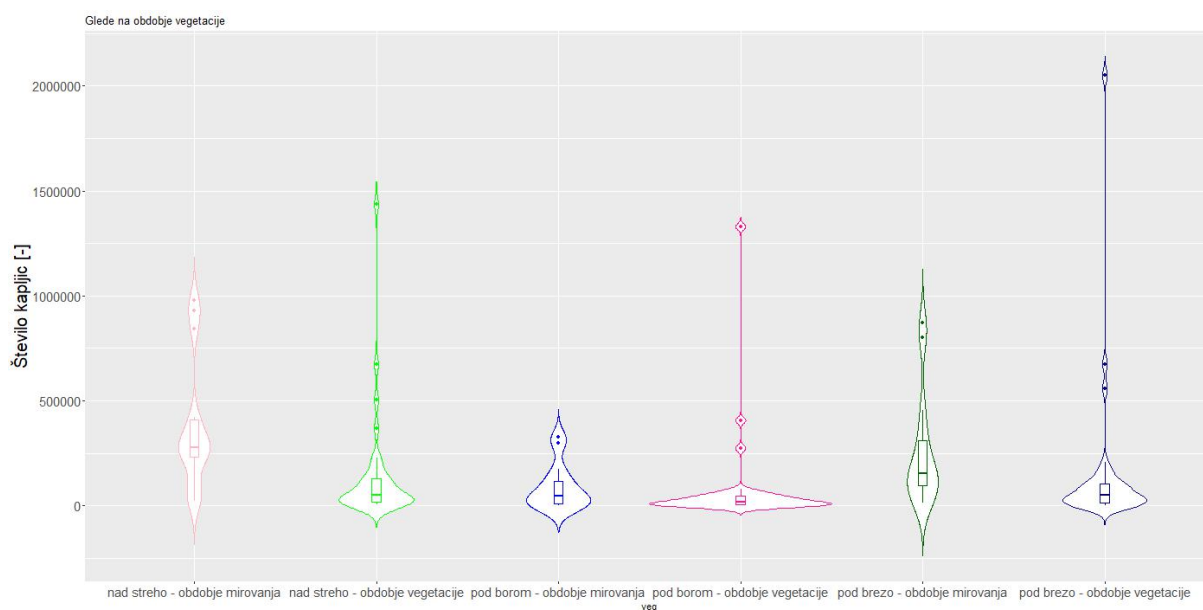


Slika 21: Število kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.



Slika 22: Gostota verjetnosti števila kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.

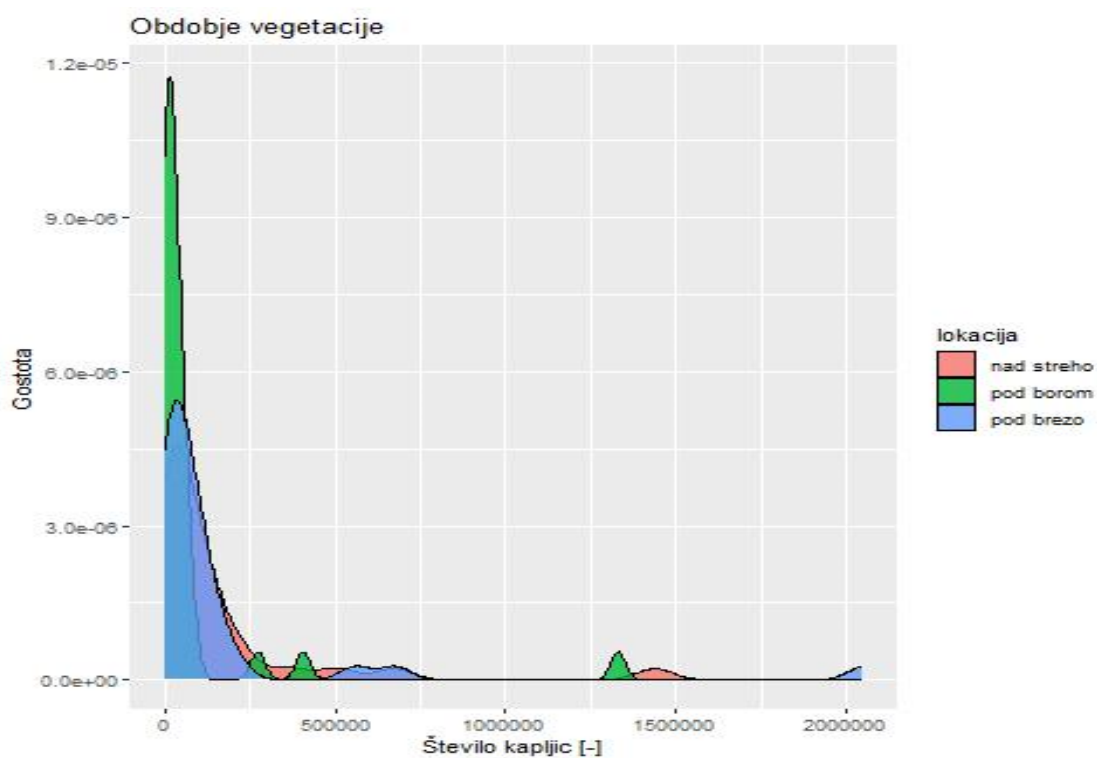
Ko celotno obdobje razdelimo na obdobje vegetacije in obdobje mirovanja, lahko lažje ugotovimo kako prisotnost listja vpliva na število kapljic (sliki 23 in 24).



Slika 23: Število kapljic glede na obdobje vegetacije.

V obdobju vegetacije (sliki 23 in 24) je nad streho padlo skupaj 4.962.044 kapljic (povprečno 103.376 kapljic po dogodku). V istem obdobju je pod krošnjo breze padlo skupaj 5.099.716 (povprečno 106.244 kapljic po dogodku), pod krošnjo bora pa 2.746.970 kapljic (povprečno 57.229 kapljic po dogodku).

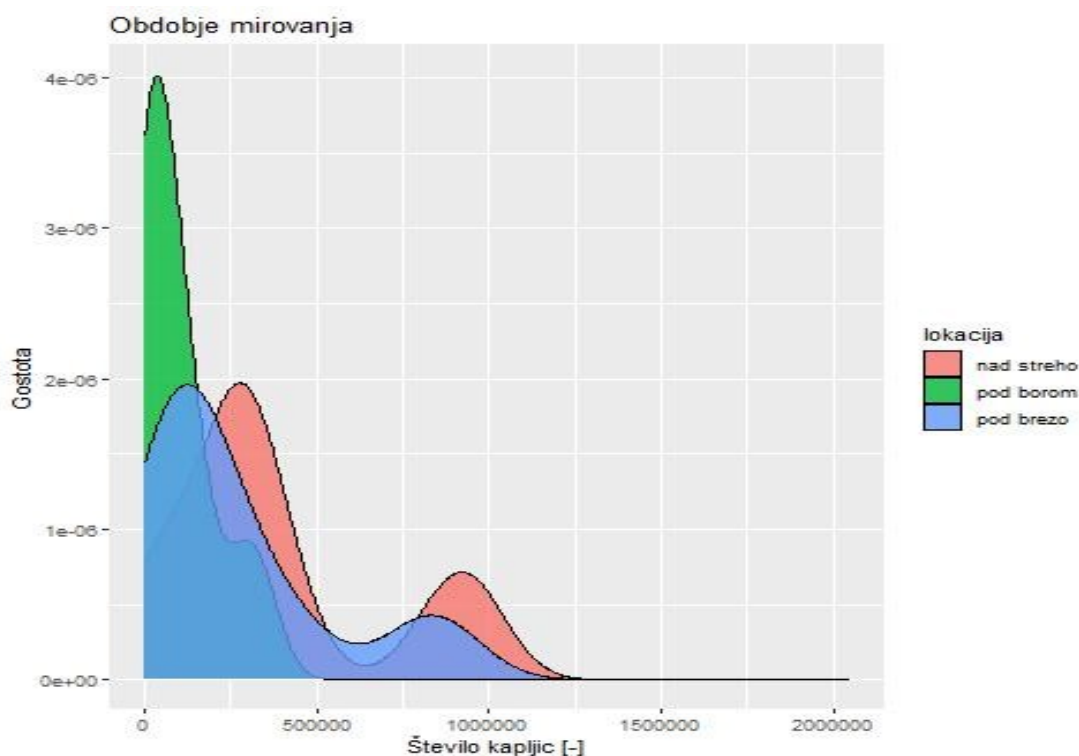
V obdobju, ko je na brezi bilo prisotno listje, se je število kapljic pod njeno krošnjo povečalo za 2,8 % glede na število kapljic nad njo. Pod borom pa se je število kapljic zmanjšalo za 44,6 %.



Slika 24: Gostota verjetnosti števila kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje vegetacije.

V obdobju mirovanja (slika 23 in 25) je nad streho padlo skupaj 5.321.053 kapljic (povprečno 110.855 kapljic na dogodek). V istem obdobju je pod krošnjo breze padlo skupaj 3.622.307 (povprečno 75.465 kapljic na dogodek), pod krošnjo bora pa 1.265.827 kapljic (povprečno 26.371 kapljic na dogodek).

V obdobju mirovanja se je število kapljic pod krošnjo breze zmanjšalo za 32 % glede na število kapljic nad njo, pod borom pa se je število kapljic zmanjšalo za 76,2 %.



Slika 25: Gostota verjetnosti števila kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje mirovanja.

V preglednici 5 je prikazano minimalno in maksimalno število kapljic na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.

Preglednica 5: Minimalno, maksimalno in povprečno število kapljic in standardna deviacija na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.

Število kapljic [-]	Celotno obdobje	Obdobje vegetacije	Obdobje mirovanja
Streha			
Min.	6.339	6.339	21.142
Povprečno	214.231	145.942	380.075
Maks.	1.435.716	1.435.716	977.922
St. deviacija	297.500	267.273	301.886
Breza			
Min.	3.383	3.383	14.795
Povprečno	181.709	149.992	258.736
Maks.	2.048.417	2.048.417	870.558
St. deviacija	337.901	359.516	263.043

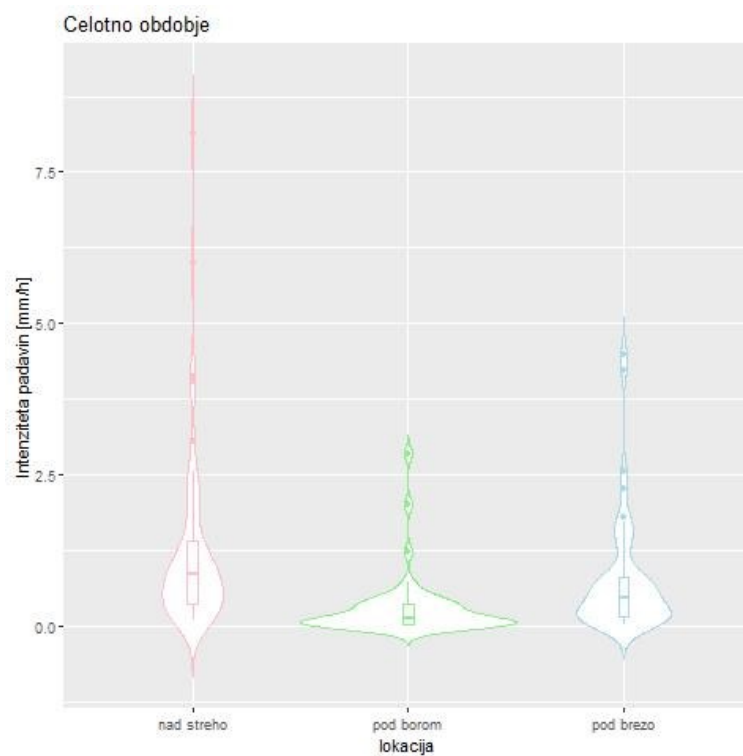
se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 5

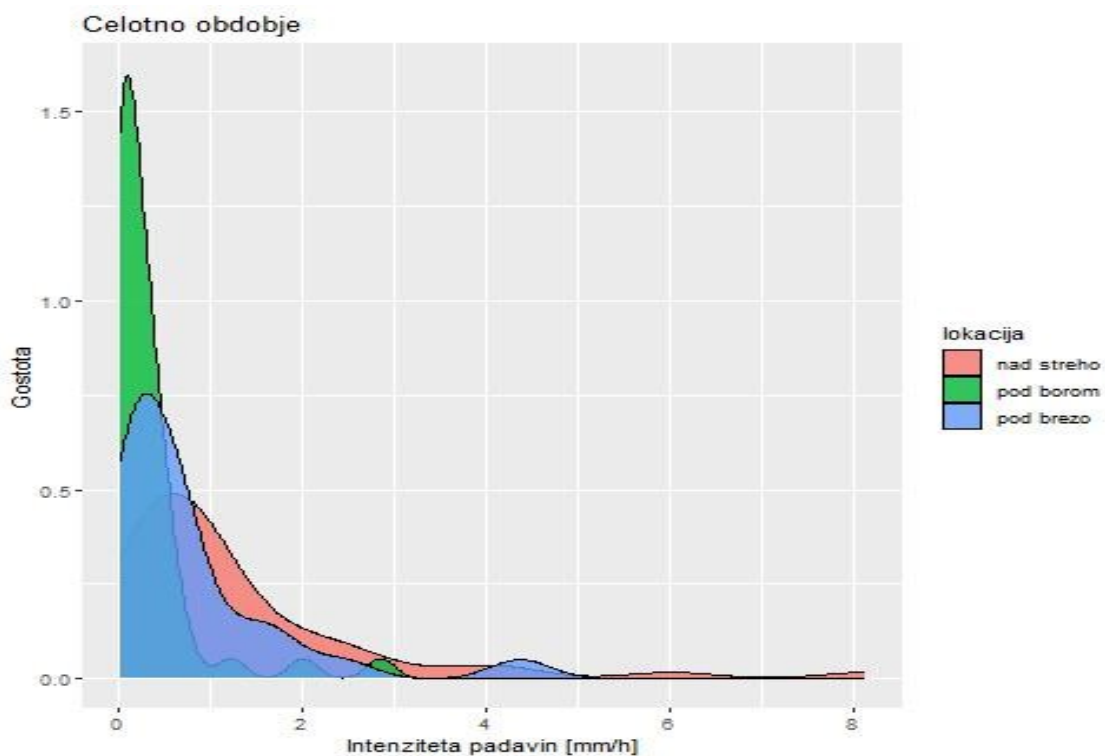
	Bor		
Min.	12	34	12
Povprečno	83.600	80.793	90.416
Maks.	1.329.566	1.329.566	326.958
St. deviacija	202.772	231.354	104.484

3.6 Intenziteta dežnih kapljic nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze

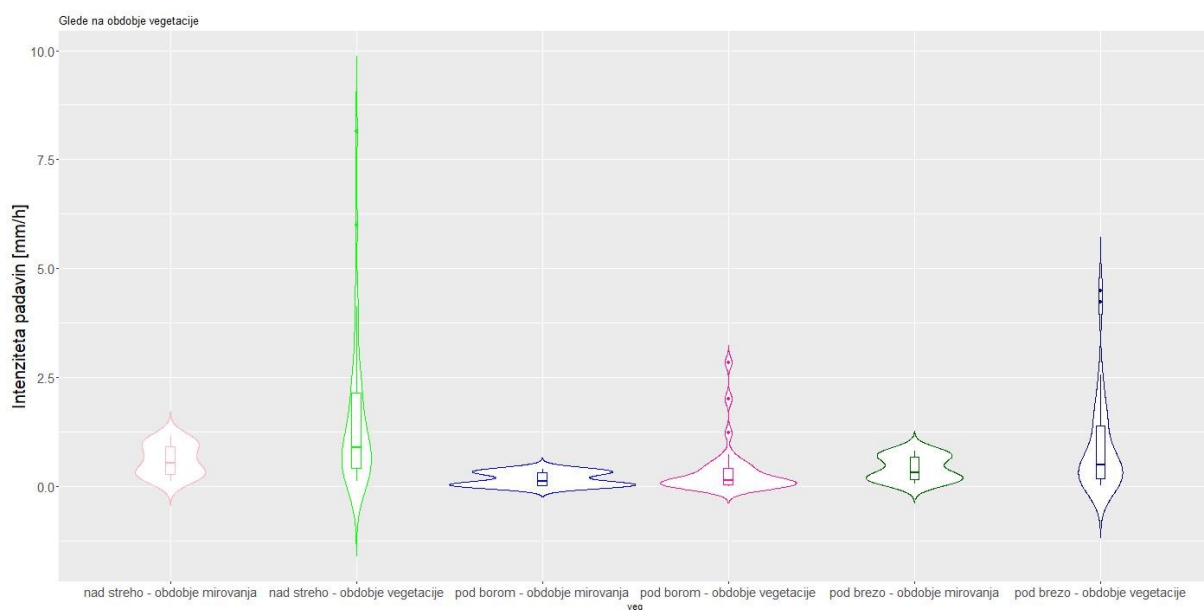
V celotnem opazovanem obdobju je povprečna intenziteta padavin nad drevesno krošnjo znašala 1,20 mm/h. Pod drevesno krošnjo breze je ta vrednost znašala 0,84 mm/h, pod krošnjo bora pa je znašala 0,47 mm/h. Iz rezultatov vidimo da se povprečna intenziteta padavin pri prehodu skozi krošnjo breze zmanjša za 30 %, pri prehodu skozi krošnjo bora za 61 % (sliki 26 in 27).



Slika 26: Intenziteta padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.

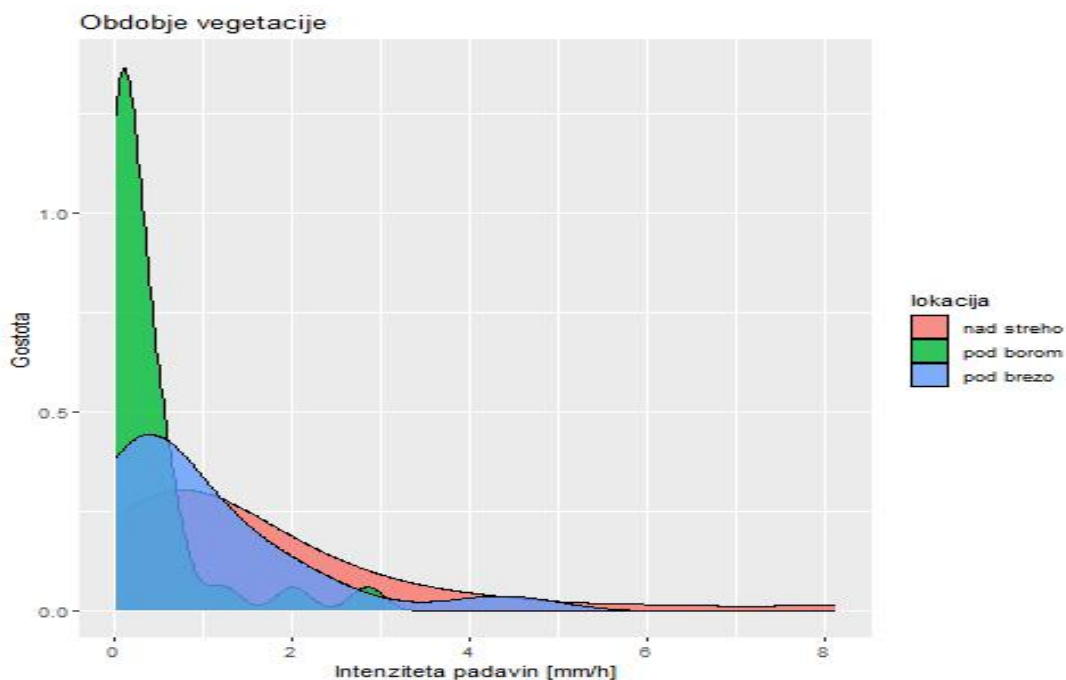


Slika 27: Gostota verjetnosti intenzitete padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.



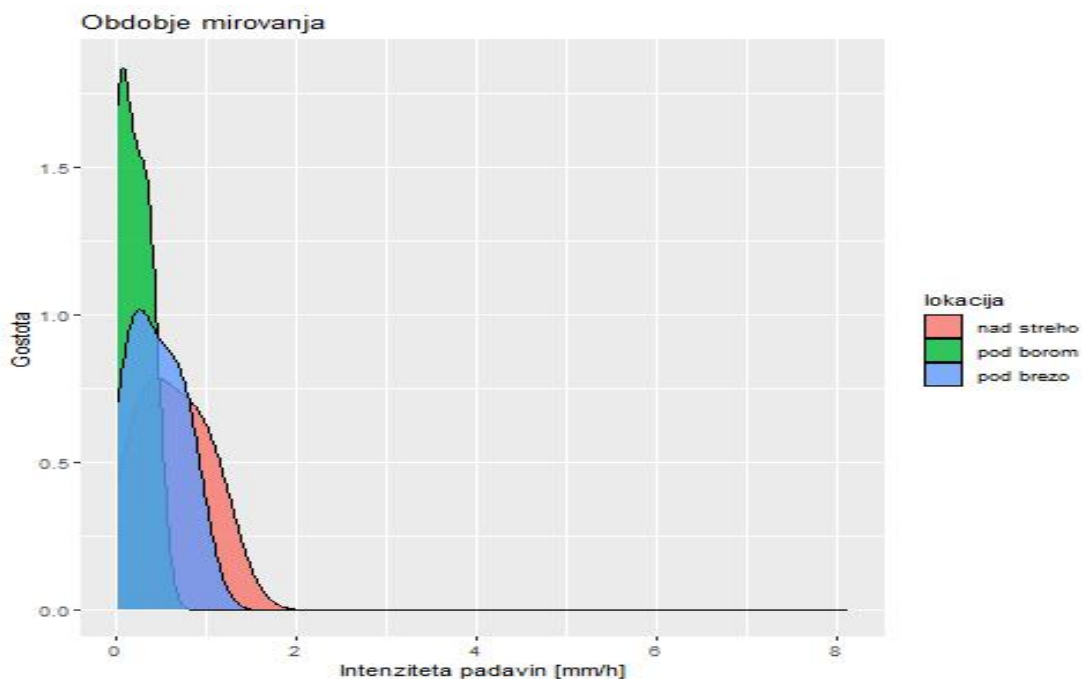
Slika 28: Intenziteta dežnih kapljic glede na obdobje vegetacije.

V obdobju vegetacije (sliki 28 in 29) 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. Zaključimo lahko, da se je povprečna intenziteta pod krošnjo glede na povprečno intenziteto nad njo v obdobju vegetacije zmanjšala pod brezo (za 31,7 %) in pod borom (za 58,8 %).



Slika 29: Gostota verjetnosti intenzitete padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje vegetacije.

V obdobju mirovanja (sliki 28 in 30) 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. Zaključimo lahko, da se je povprečna intenziteta pod krošnjo glede na povprečno intenziteto nad njo v obdobju mirovanja zmanjšala pod brezo (za 25 %) in pod borom (za 66 %).



Slika 30: Gostota verjetnosti intenzitete padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje mirovanja.

V preglednici 6 so prikazane maksimalne dosežene 1-minutne intenzitete na prostem in pod krošnjami za obe vrsti dreves. Vidimo, da so se maksimalne vrednosti 1-minutne intenzitete padavin na prostem in tudi pod krošnjami zgodile v obdobju vegetacije.

Preglednica 6: Maksimalne dosežene 1-minutne intenzitete.

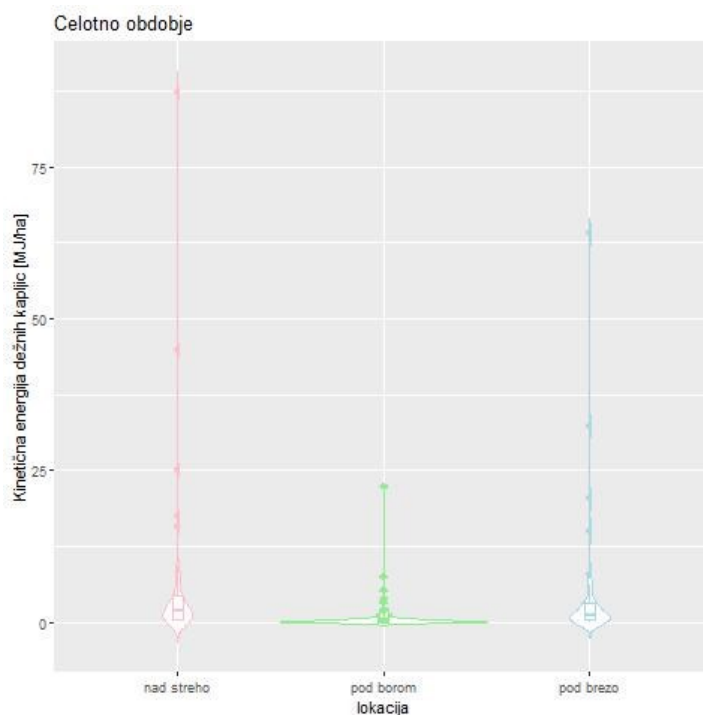
Maks. 1-min intenziteta [mm/h]	Celotno obdobje	Vegetacija	Mirovanje
Streha	248,03	248,03	39,72
Breza	152,81	152,81	92,62
Bor	83,00	83,00	21,17

3.7 Kinetična energija dežnih kapljic nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze

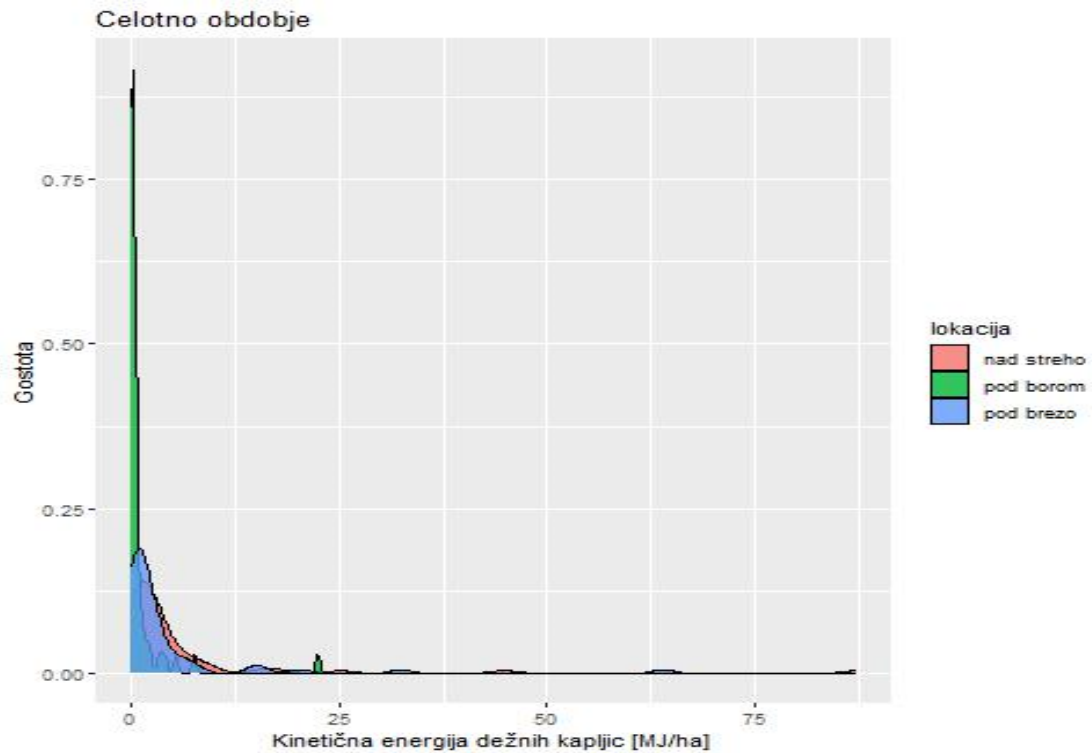
V celotnem obravnavanem obdobju je povprečna KE nad drevesno krošnjo znašala 6 MJ/ha. Vrednosti so se večinoma gibale med 0,1 MJ/ha in 25 MJ/ha.

V obravnavanem obdobju sta se zgodila 2 večja dogodka (sredina septembra 2022 in sredina januarja 2023) z zelo veliko količino padavin. Njuna KE je znašala 87 MJ/ha in 45 MJ/ha. Ugotovimo lahko, da sta bila oba dogodka ekstremna in sta od ostalih odstopala po izjemno obilnih padavinah in pri drugem dogodku (januar 2023) tudi sneženja. Oba dogodka sta tudi uradno zabeležena kot izredna dogodka (ARSO, 2023).

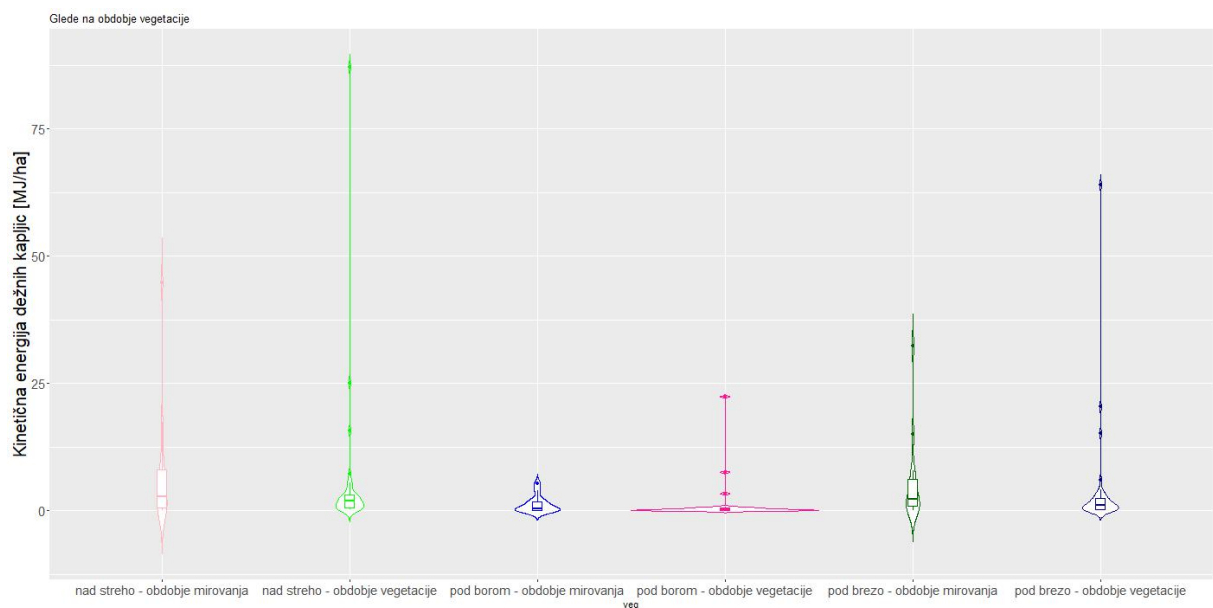
Pod krošnjo breze je povprečna vrednost KE znašala 4,59 MJ/ha, kar je glede na vrednost nad krošnjo manjše za 24,2 %. Povprečna KE pod krošnjo bora je znašala 1,18 MJ/ha, kar je glede na vrednost nad krošnjo manjše za 80,5 % (sliki 31 in 32).



Slika 31: KE padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.

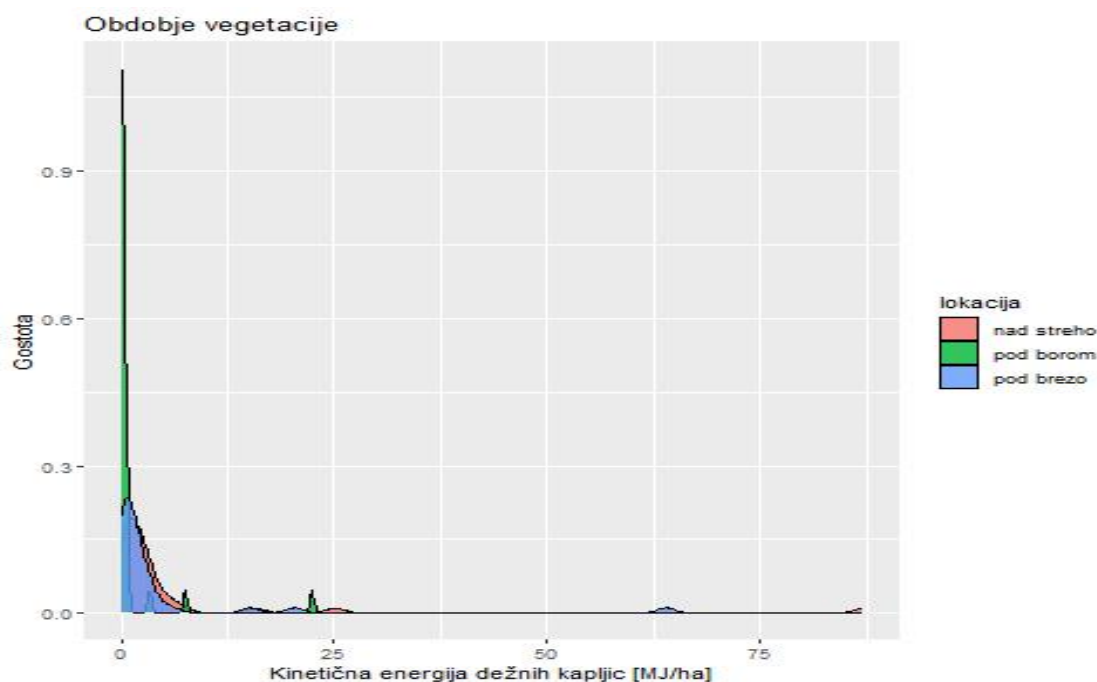


Slika 32: Gostota verjetnosti KE padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.



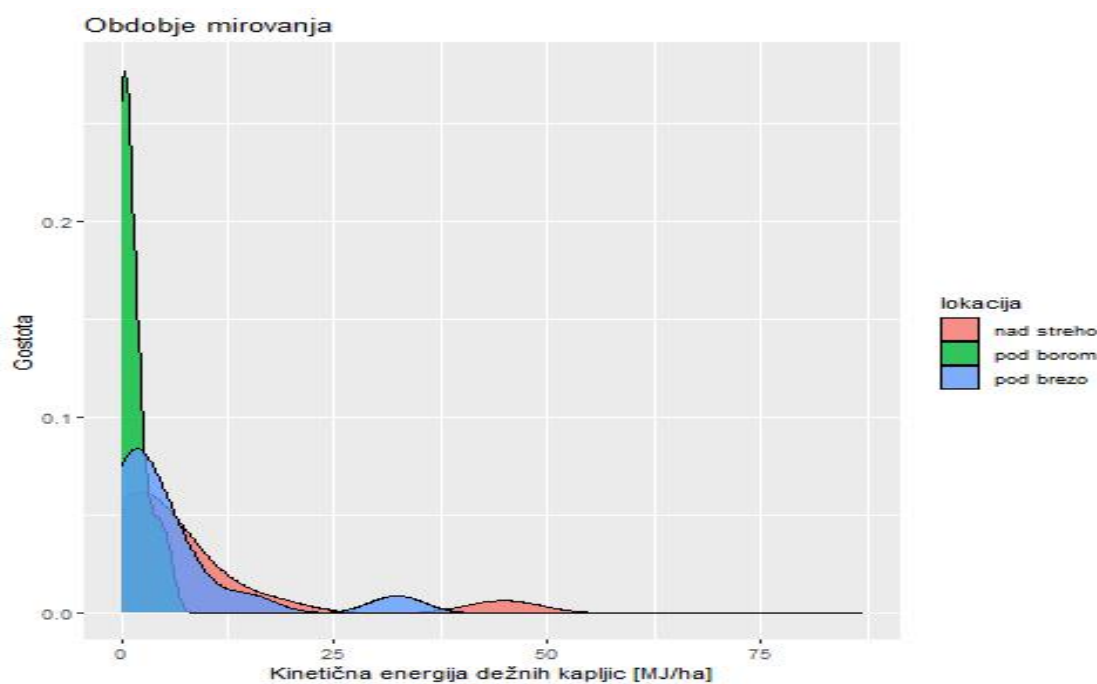
Slika 33: KE kapljic glede na obdobje vegetacije.

V obdobju vegetacije (sliki 33 in 34) so povprečne vrednosti KE znašale 5,58 MJ/ha nad streho, 4,15 MJ/ha pod brezo in 1,16 MJ/ha pod borom. Vrednosti pod krošnjami so glede na vrednost nad njimi manjše za 25,5 % (breza) in 79,1 % (bor).



Slika 34: Gostota verjetnosti KE padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje vegetacije.

V obdobju mirovanja (sliki 33 in 35) so povprečne vrednosti KE znašale 7,21 MJ/ha nad streho, 5,65 MJ/ha pod brezo in 1,21 MJ/ha pod borom. Vrednosti pod krošnjami so glede na vrednosti nad njimi manjše za 21,7 % (breza) in 83,2 % (bor).



Slika 35: Gostota verjetnosti KE padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje mirovanja.

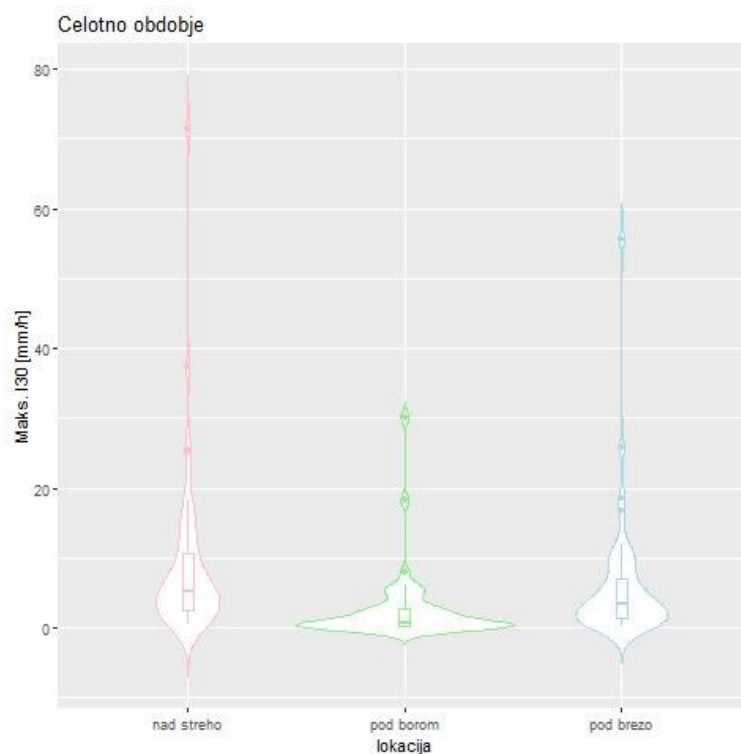
V preglednici 7 so prikazane minimalne in maksimalne dosežene KE padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.

Preglednica 7: Minimalne, maksimalne in povprečne dosežene vrednosti KE in standardna deviacija na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.

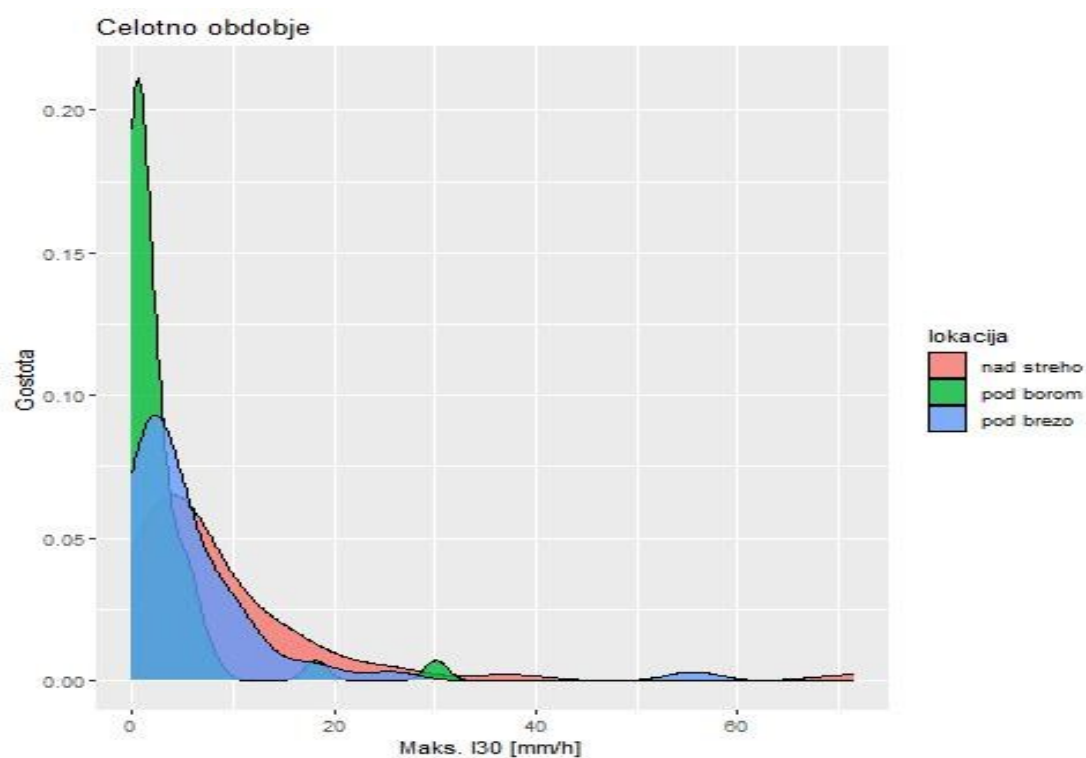
KE [MJ/ha]	Celotno obdobje	Obdobje vegetacije	Obdobje mirovanja
	streha		
Min.	0,09	0,13	0,09
Povprečno	6,05	5,58	7,21
Maks.	87,18	87,18	44,83
St. deviacija	14,06	14,98	11,45
	breza		
Min.	0,05	0,06	0,05
Povprečno	4,59	4,15	5,65
Maks.	63,98	63,98	32,33
St. deviacija	10,48	11,20	8,40
	bor		
Min.	0,00	0,00	0,00
Povprečno	1,18	1,17	1,21
Maks.	22,39	22,39	5,32
St. deviacija	3,42	3,93	1,58

3.8 Maksimalna 30-minutna intenziteta padavinskih dogodkov nad streho in pod drevesnima krošnjama bora in breze

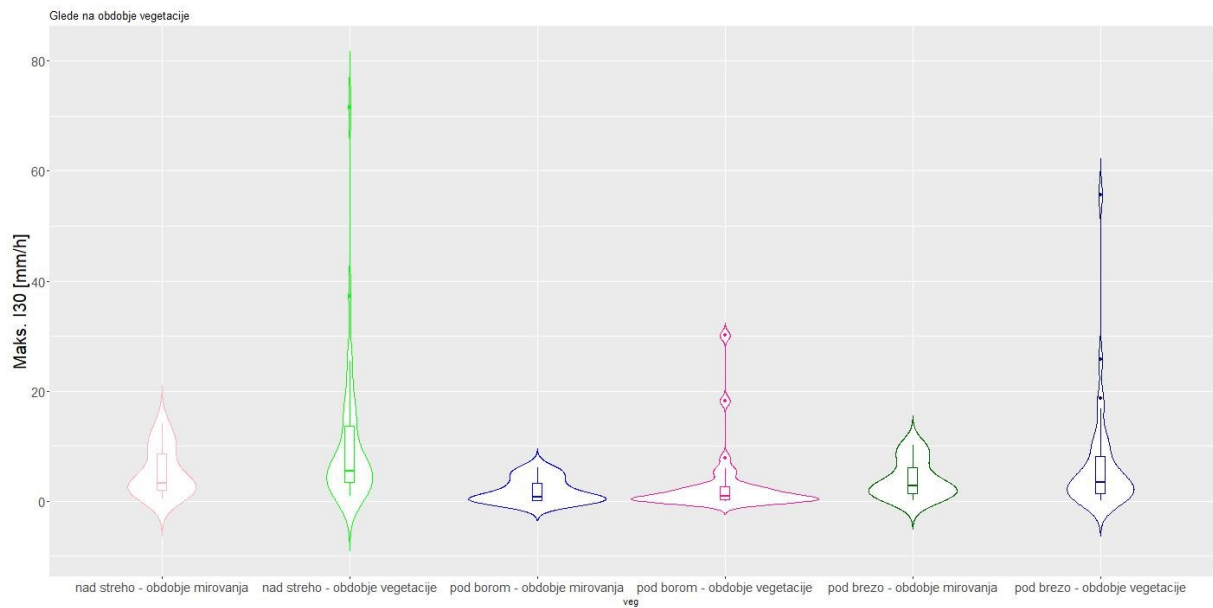
Povprečna maksimalna 30-minutna intenziteta (I30) je v celotnem obravnavanem obdobju, nad drevesno krošnjo znašala 9,0 mm/h, pod krošnjo breze 5,97 mm/h, pod krošnjo bora pa 2,63 mm/h. Pod krošnjo breze je v obravnavanem obdobju vrednost I30 za 33,7 % manjša glede na vrednost nad krošnjo. Pri boru se je ta vrednost zmanjšala še bolj, in sicer za 70,8 % (sliki 36 in 37).



Slika 36: Max I30 padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.

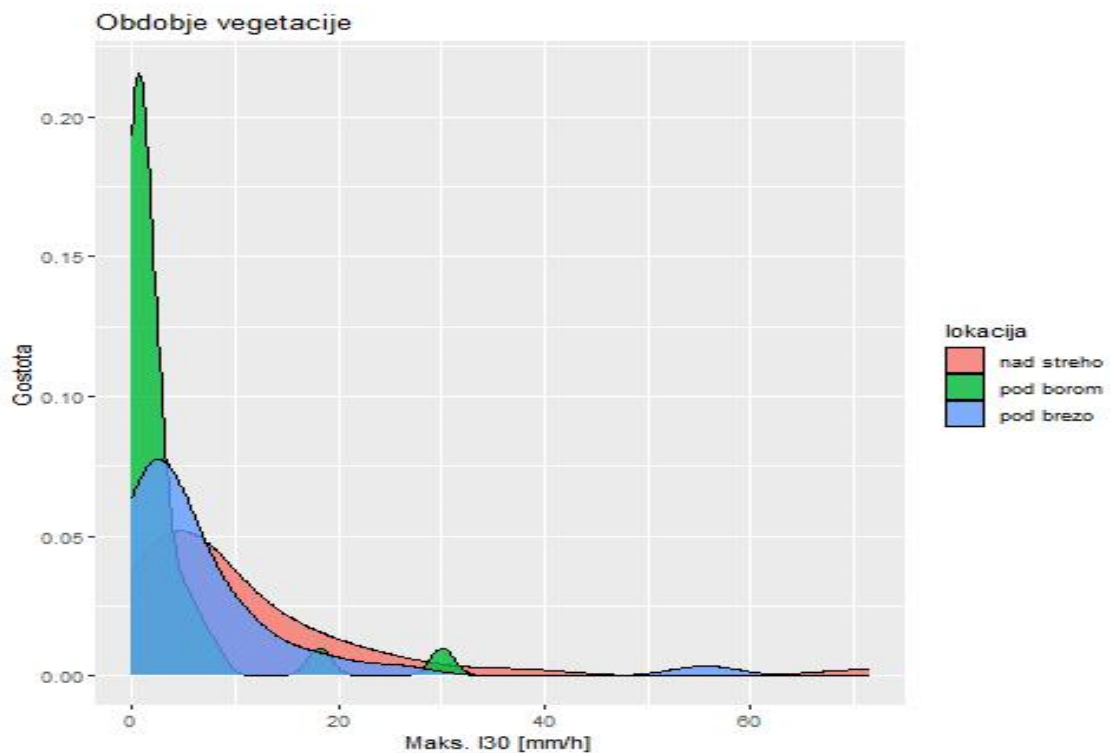


Slika 37: Gostota verjetnosti max I30 padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.



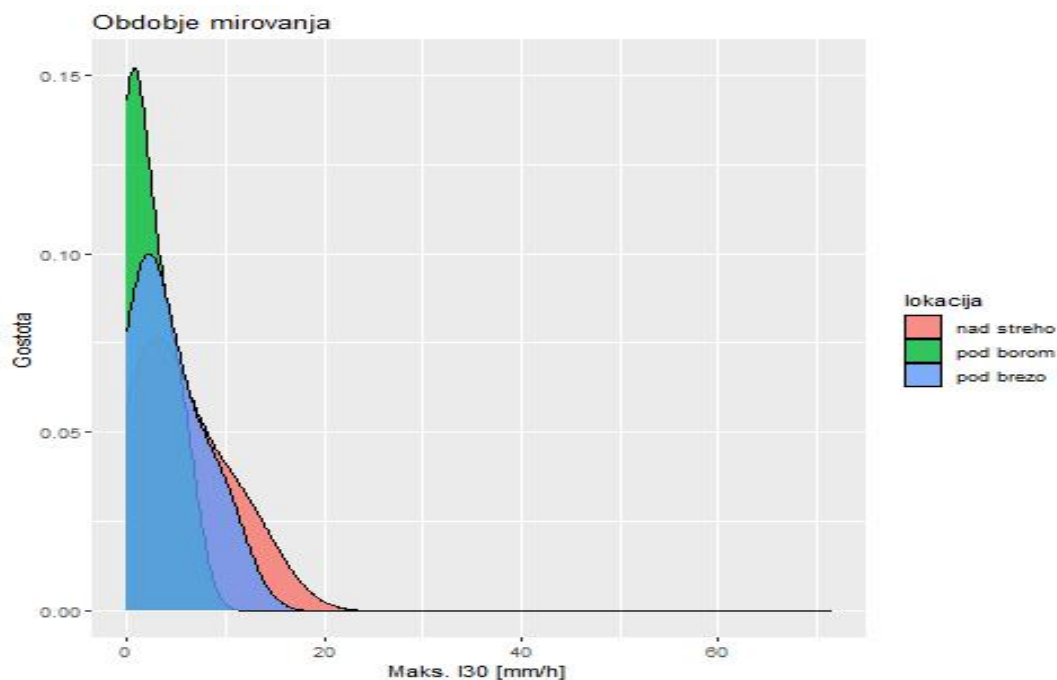
Slika 38: Maksimalne I30 glede na obdobje vegetacije.

V obdobju vegetacije (sliki 38 in 39) je vrednost I30 nad krošnjami znašala 10,53 mm/h, pod krošnjami pa 8,81 mm/h (breza) in 2,91 mm/h (bor).



Slika 39: Gostota verjetnosti max I30 padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje vegetacije.

V obdobju mirovanja (sliki 38 in 40) je vrednost I30 nad krošnjami znašala 5,29 mm/h, pod krošnjami pa 3,91 mm/h (breza) in 1,92 mm/h (bor).



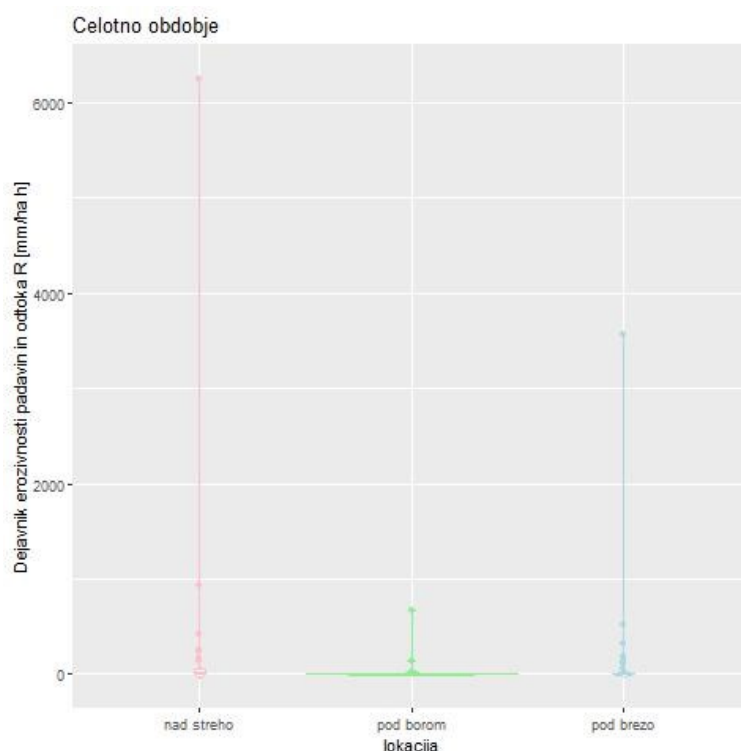
Slika 40: Gostota verjetnosti max I30 padavin na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje mirovanja.

Iz dobljenih rezultatov je razvidno da se je vrednost I30 spremenila bolj v obdobju vegetacije (za 35,3 % pod brezo, za 72,3 % pod borom), kot v obdobju mirovanja (za 26,0 % pod brezo, za 63,6 % pod borom). V preglednici 8 so prikazane minimalne in maksimalne dosežene I30 na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.

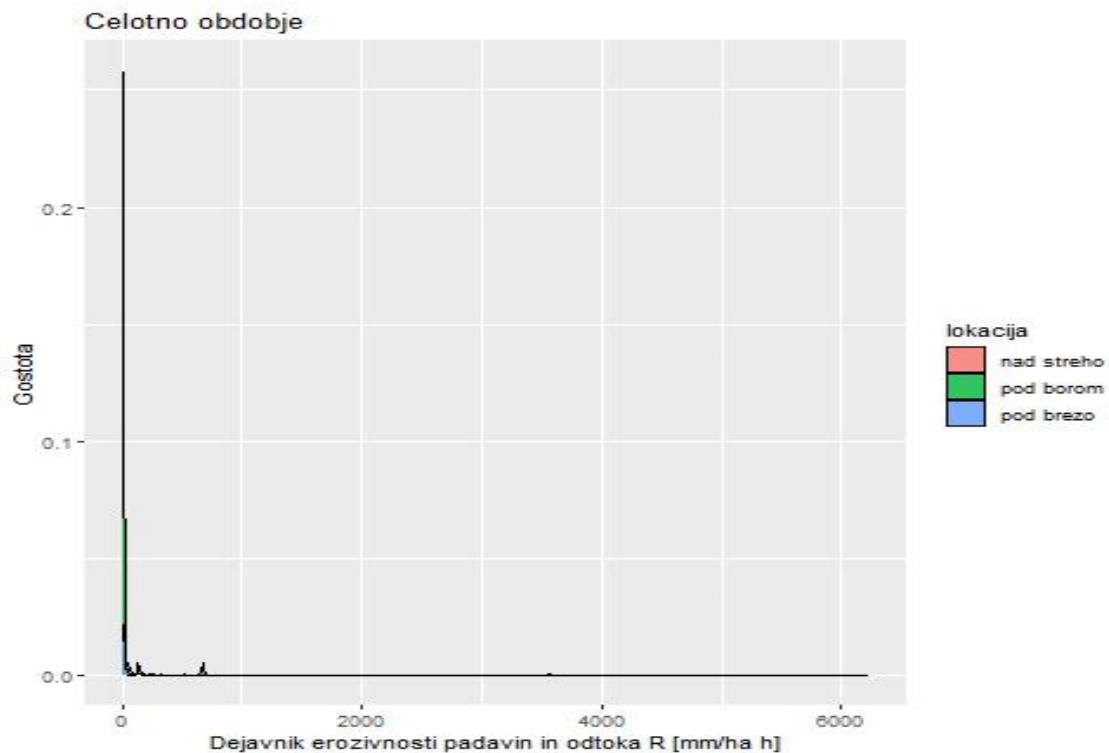
Preglednica 8: Minimalne, maksimalne in povprečne dosežene I30 in standardna deviacija na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.

I30 [mm/h]	Celotno obdobje	Obdobje vegetacije	Obdobje mirovanja
Streha			
Min.	0,38	0,95	0,38
Povprečno	9,00	10,53	5,29
Maks.	71,56	71,56	14,20
St. deviacija	11,74	13,39	4,19
Breza			
Min.	0,18	0,18	0,18
Povprečno	5,97	6,82	3,91
Maks.	55,61	55,61	10,17
St. deviacija	8,92	10,27	3,25
Bor			
Min.	0,00	0,00	0,00
Povprečno	2,63	2,92	1,93
Maks.	30,10	30,10	6,07
St. deviacija	5,04	5,81	2,10

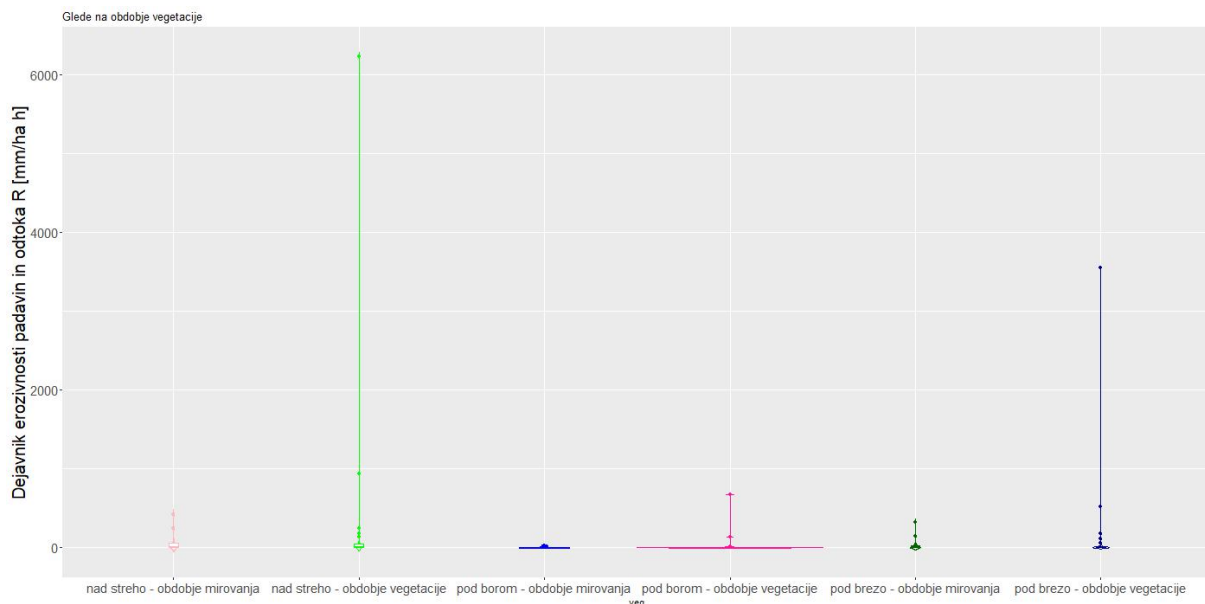
Vrednost R (dejavnik erozivnosti padavin) nad streho se je večinoma gibala med $0,03 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in $935,6 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, razen pri zelo obilnem dogodku (sredina septembra 2022) je ta vrednost znašala nekaj več kot $6200 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Povprečna vrednost R je nad streho 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 $19,2 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Ugotovimo lahko, da je pod krošnjami obeh vrst dreves dejavnik erozivnosti zaradi prestrežanja padavin manjši kot nad njimi (pod brezo 42,6 % za , in pod borom za 89,9 %) (sliki 41 in 42).



Slika 41: Vrednosti dejavnika erozivnosti padavin R na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.

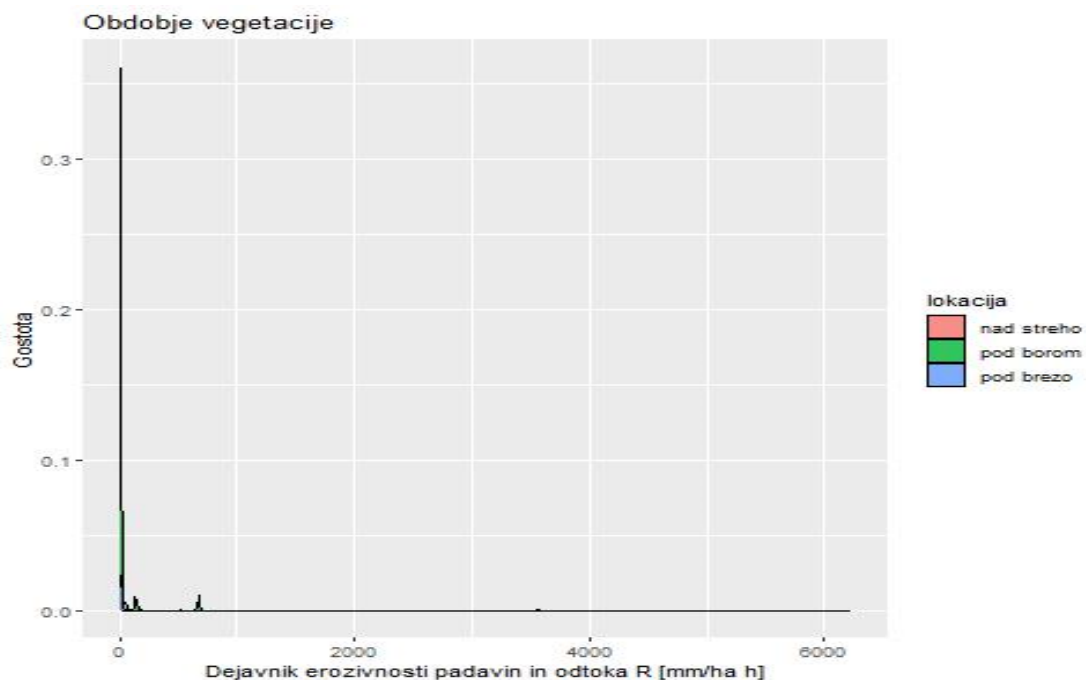


Slika 42: Vrednosti dejavnika erozivnosti padavin R na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za celotno obravnavano obdobje.



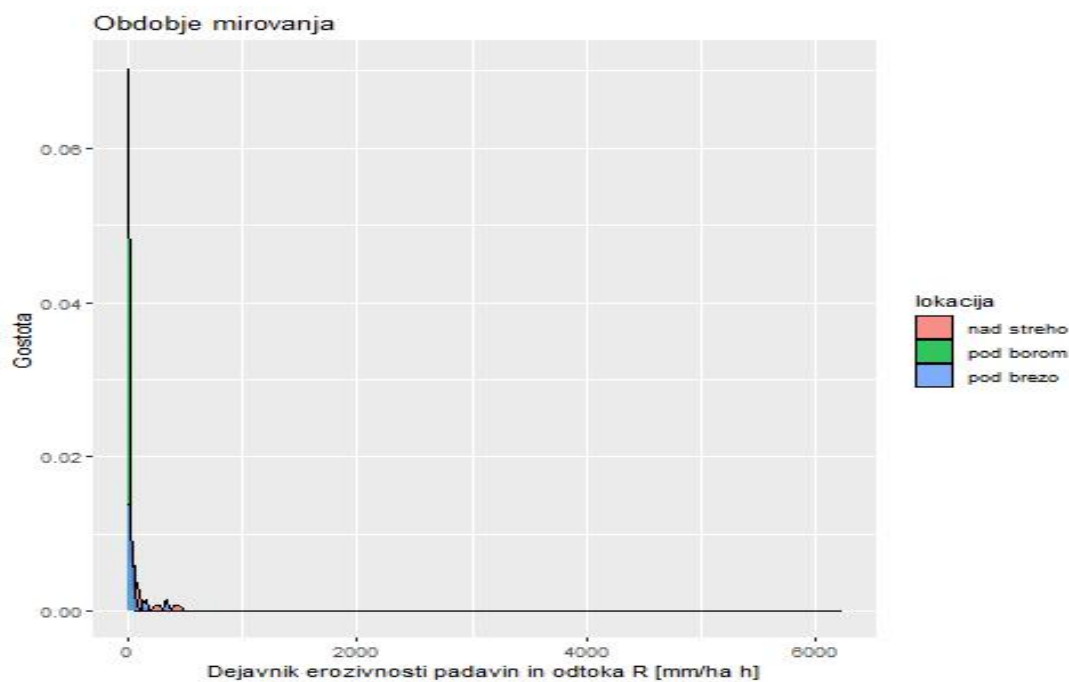
Slika 43: Vrednosti dejavnika R glede na obdobje vegetacije.

V obdobju vegetacije (sliki 43 in 44) je povprečna vrednost dejavnika erozivnosti padavin R nad streho znašala $240,7 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Ta vrednost se je pod krošnjo breze zmanjšala za 43,7 % ($135,5 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), pod krošnjo bora pa za 89,6 % ($25 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$).



Slika 44: Vrednosti dejavnika erozivnosti padavin R na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje vegetacije.

V obdobju mirovanja (sliki 43 in 45) 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 $44 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (za 33,3 % manj), pod borom pa $5,2 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (za 92 % manj).



Slika 45: Vrednosti dejavnika erozivnosti padavin R na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora za obdobje mirovanja.

V preglednici 9 so prikazane minimalne in maksimalne vrednosti R na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.

Preglednica 9: Minimalne, maksimalne in povprečne dosežene vrednosti dejavnika R in standardna deviacija na prostem, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora.

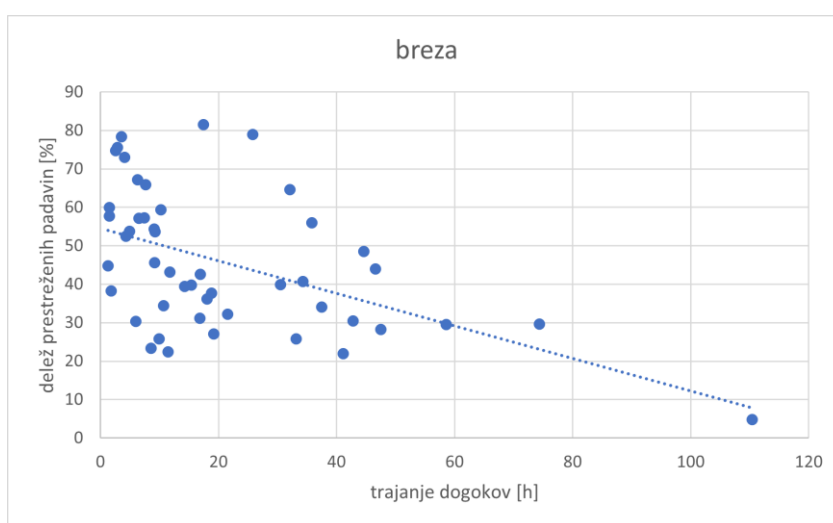
R [MJ mm/ha h]	Celotno obdobje	Obdobje vegetacije	Obdobje mirovanja
	Streha		
Min.	0,03	0,12	0,03
Povprečno	189,73	240,67	66,02
Maks.	6.238,18	6.238,18	421,31
St. deviacija	894,95	1.056,49	117,31
	Breza		
Min.	0,01	0,01	0,01
Povprečno	108,78	135,44	44,02
Maks.	3.557,78	3.557,78	328,79
St. deviacija	511,30	602,91	87,21
	Bor		
Min.	0,00	0,00	0,00
Povprečno	19,24	25,01	5,22
Maks.	674,08	674,08	32,31
St. deviacija	97,62	115,35	9,03

4 ANALIZA REZULTATOV IN RAZPRAVA

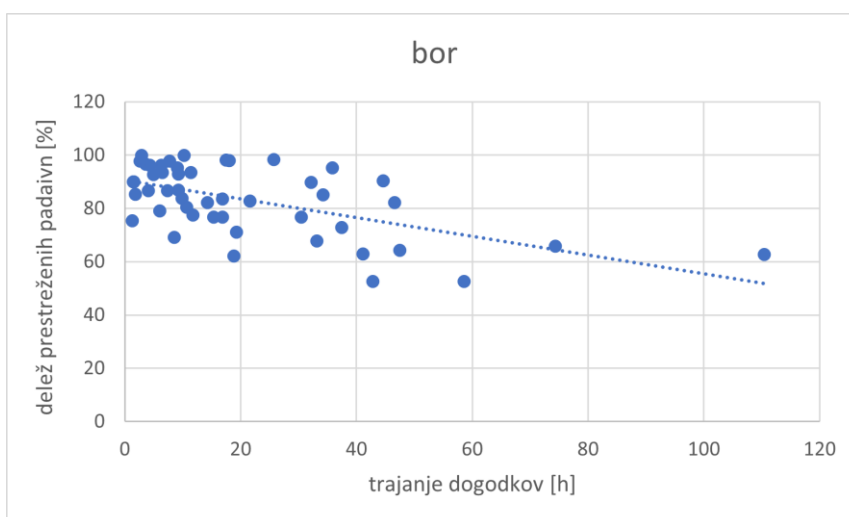
4.1 Vpliv časa trajanja dogodka na delež prestreženih padavin

V celotnem obravnavanem obdobju se je delež prestreženih padavin breze gibal med 4,8 % in 81,5 %, v povprečju 45,6 %. Delež prestreženih padavin bora se je v istem obdobju gibal med 52,5 % in 99,8 %, v povprečju 83,2 %.

Iz rezultatov je razvidno da se delež prestreženih padavin s časom trajanja padavinskih dogodkov zmanjšuje, tako za brezo (slika 46) kot za bor (slika 47). Do podobnih zaključkov so prišli tudi drugi avtorji (Zore, 2022; Zabret in sod., 2016; Šraj in sod., 2008a).



Slika 46: Delež prestreženih padavin breze glede na trajanje padavinskih dogodkov.

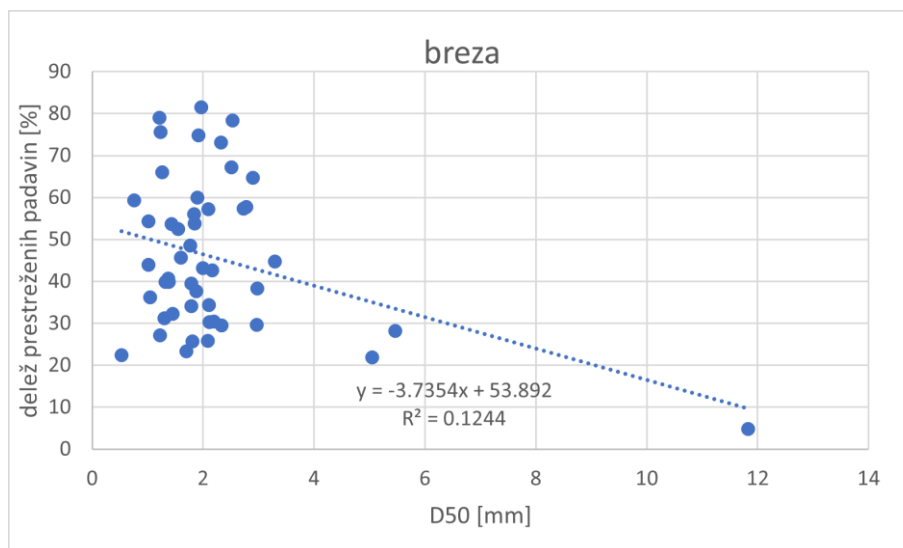


Slika 47: Delež prestreženih padavin bora glede na trajanje padavinskih dogodkov.

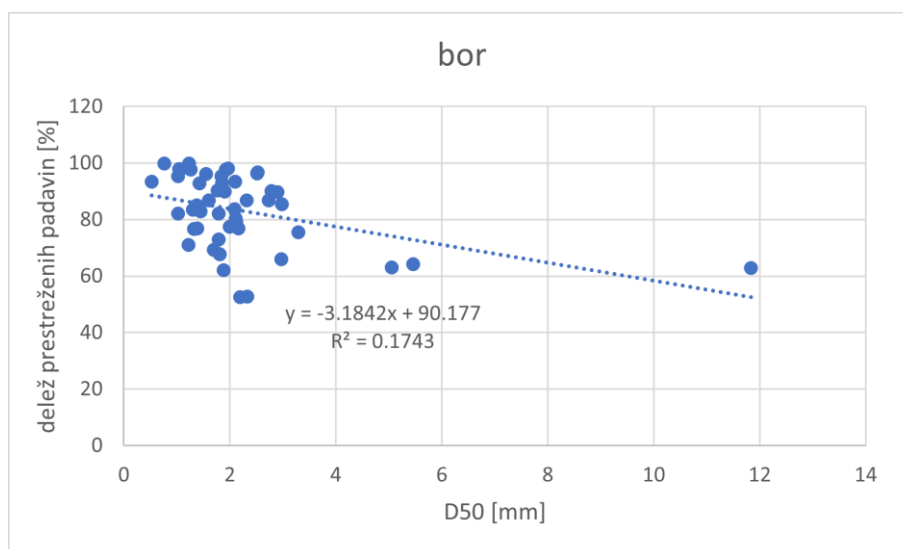
4.2 Vpliv mikrostrukture padavin na delež prestreženih padavin

Pri primerjavi povprečne velikosti kapljic (D50) in deleža prestreženih padavin pri brezi (slika 48), smo ugotovili, da med njimi ni statistično značilne odvisnosti. Pearsonov koeficient korelacije $r = 0,35$ pri

brezi kaže na nizko oziroma šibko medsebojno povezanost obeh spremenljivk. Da je ta medsebojna odvisnost statistično neznačilna je potrjeno tudi z izračunano p vrednostjo ($p = 0,014$). Statistično neznačilno odvisnost med povprečno velikostjo in deležem prepuščenih padavin breze je ugotovila tudi Zore, 2022. Glede na rezultate pod borom (slika 49) pa rezultati kažejo, da je medsebojna odvisnost spremenljivk statistično značilna s p vrednostjo 0,0031. Izbrana stopnja zaupanja je 0,01.

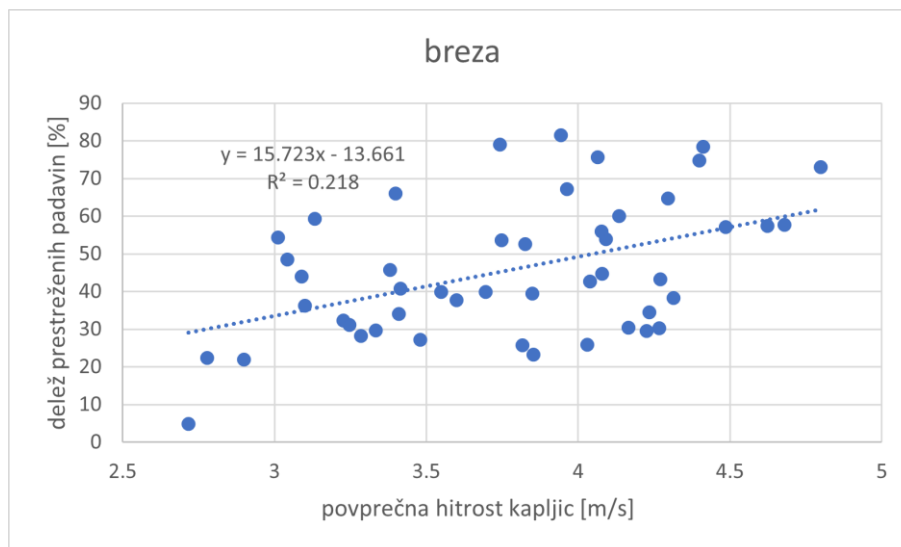


Slika 48: Delež prestreženih padavin breze glede na D50.

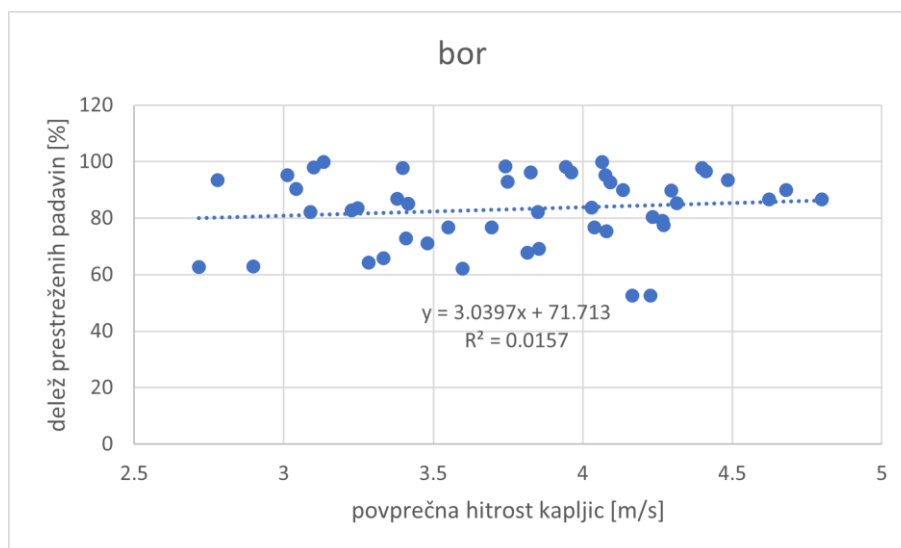


Slika 49: Delež prestreženih padavin bora glede na D50.

Pri primerjavi povprečne hitrosti in deleža prestreženih padavin Pearsonov koeficient korelacije za brezo (slika 50) znaša 0,47, za bor (slika 51) pa 0,12. P-vrednost za rezultate pod brezo znaša 0,0008 in kaže na statistično značilno medsebojno odvisnost. Takšna ugotovitev se ne poklapa s zaključkom Zore, 2022, ki pravi da je medsebojna odvisnost dveh spremenljivkah statistično neznačilna s p vrednostjo 0,033. Pri analizi rezultatov pod borom pa dobimo drugačen zaključek, in sicer, da medsebojna povezava med hitrostjo kapljic in deležem prestreženih padavin ni statistično značilna ($p = 0,39$). Izbrana stopnja zaupanja je 0,01.



Slika 50: Delež prestreženih padavin breze glede na povprečno hitrost kapljic.

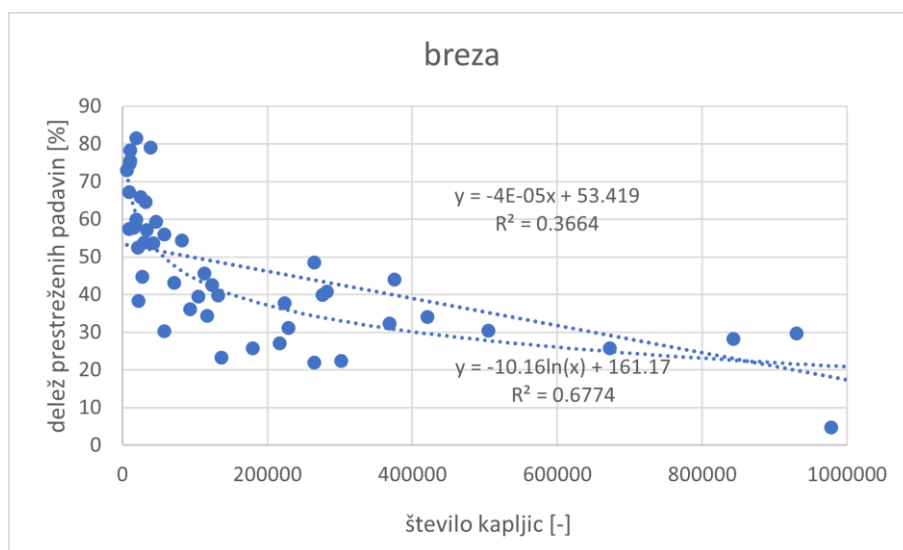


Slika 51: Delež prestreženih padavin bora glede na povprečno hitrost kapljic.

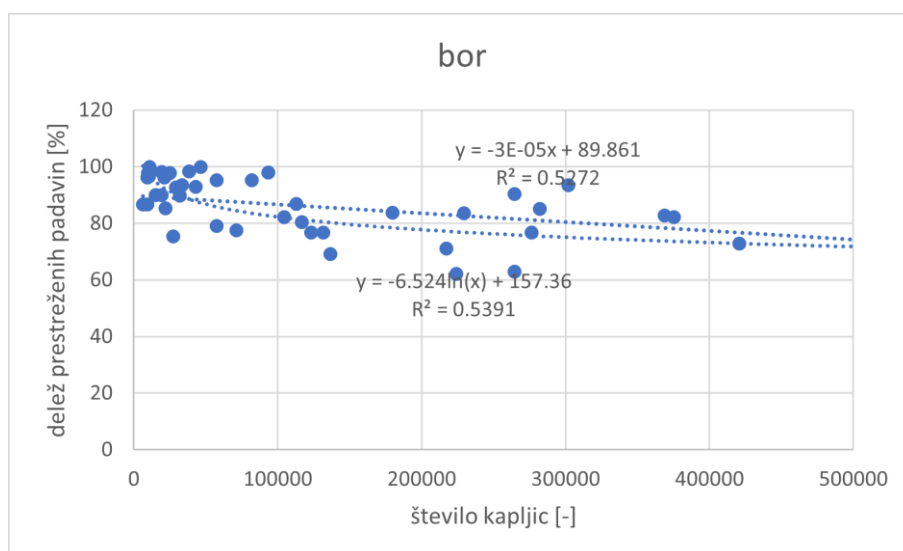
Drugi avtorji (npr. Zore, 2020; Zore in sod., 2022) so na isti ploskvi, a v drugem obdobju meritev ugotovili, da je medsebojna odvisnost hitrosti oz. velikosti kapljic in deleža prestreženih (prepuščenih) padavin statistično neznačilna.

Glede na dobljene rezultate smo ugotovili, da ima število kapljic posameznega dogodka največji vpliv na delež prestreženih padavin. V primeru linearne trendne črte Pearsonov koeficient korelacije, izračunan glede na podatke z obeh dreves, kaže na zmerno linearno medsebojno odvisnost ($r = 0,60$ pri brezi, $r = 0,72$ pri boru) (sliki 52 in 53). V primeru logaritemske trendne črte Pearsonov koeficient za obe drevesi kaže na močno medsebojno odvisnost ($r = 0,87$ pri brezi in $r = 0,84$ pri boru). Kljub malo šibkejši povezanosti med spremenljivkama v primeru linearne trendne črte, je ta statistično značilna ($p = 0,0005$ pri brezi in $p = 0,00001$ pri boru). Izbrana stopnja zaupanja je 0,01.

Statistično značilno linearno povezavo med številom dežnih kapljic in količini prestreženih oziroma prepuščenih padavin je ugotovila tudi Zore (2020).



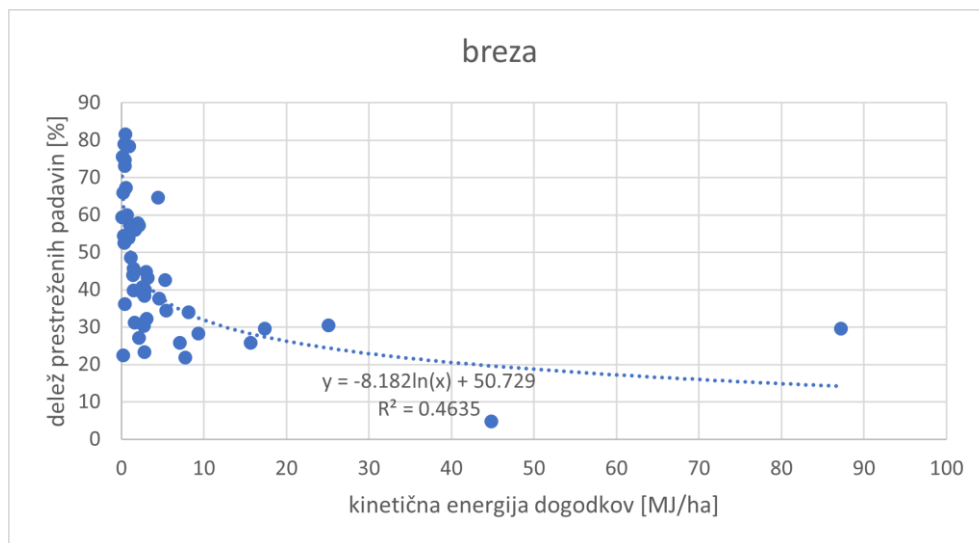
Slika 52: Delež prestreženih padavin breze glede na število kapljic.



Slika 53: Delež prestreženih padavin bora glede na število kapljic.

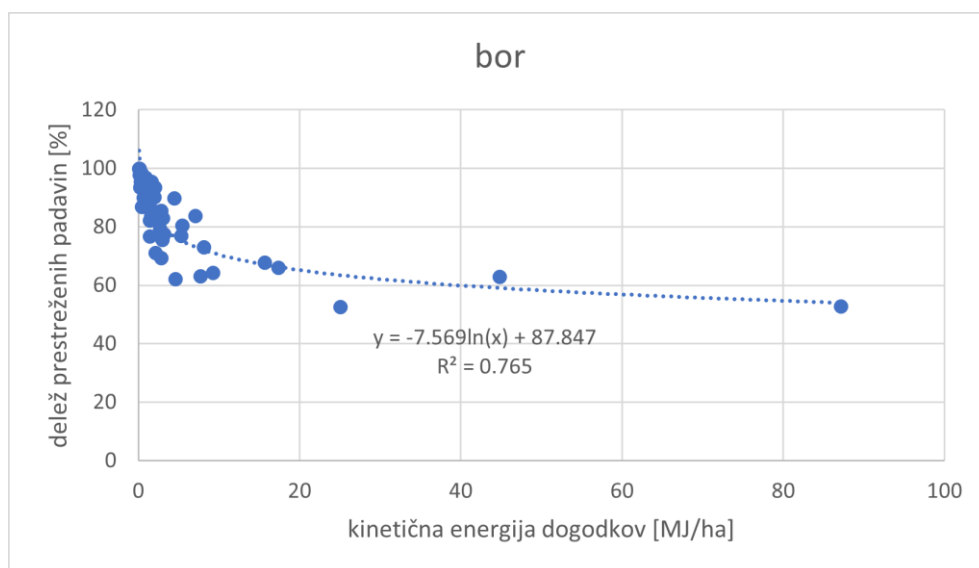
4.3 Vpliv KE padavin na delež prestreženih padavin

Kot je razvidno iz slike 54, se delež prestreženih padavin breze zmanjšuje z večanjem KE kapljic. Odvisnost deleža prestreženih padavin od KE je logaritemska in je statistično značilna ($p = 1,012 \cdot 10^{-7}$).



Slika 54: Delež prestreženih padavin breze glede na KE kapljic.

Tudi delež prestreženih padavin bora (slika 55) se zmanjšuje z večanjem KE kapljic. Medsebojna povezanost med hitrostjo padavin in KE je močna ($r = 0,87$) in statistično značilna s p vrednostjo $4,55 \cdot 10^{-16}$.

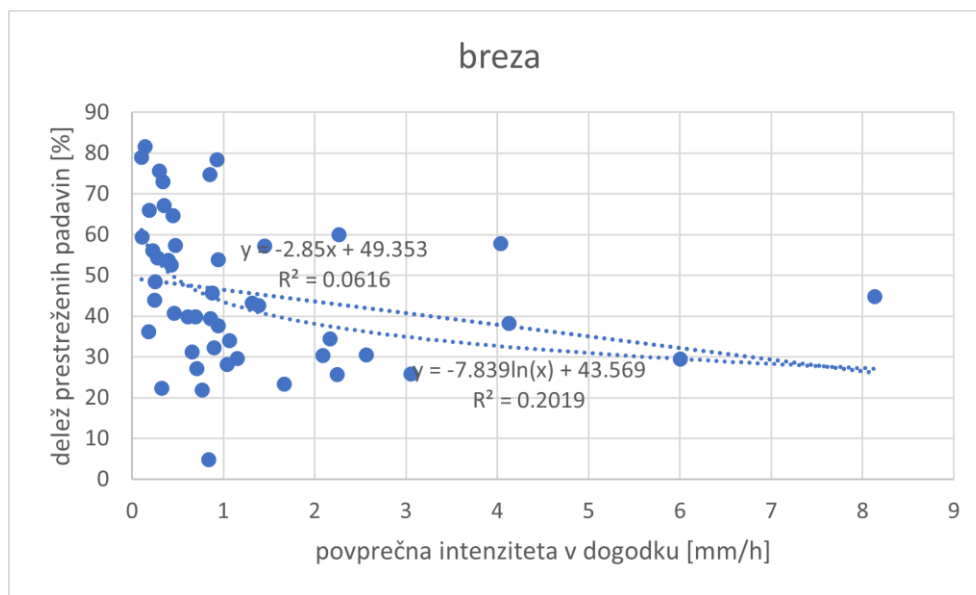


Slika 55: Delež prestreženih padavin bora glede na KE kapljic.

Ugotovitev, da so KE kapljic in delež prestreženih oziroma prepuščenih padavin močno statistično povezane se sklada u ugotovitvami, ki jih je podala Zore (2020), ko je obravnavala prepuščene padavine breze.

4.4 Vpliv intenzitete padavin na delež prestreženih padavin

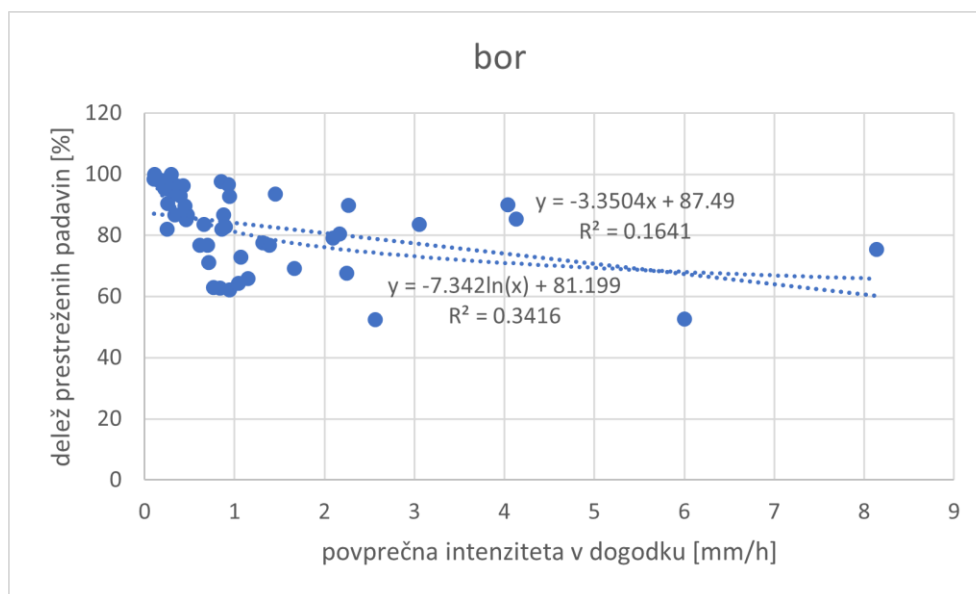
Pri analizi rezultatov za krošnjo breze (slika 56) je ugotovljena medsebojna odvisnost deleža prestreženih padavin in njihove intenzitete. Povezanost med njimi je logaritemska s Pearsonovim koeficientom 0,45 in statistično značilna ($p = 0,0014$).



Slika 56: Delež prestreženih padavin breze glede na povprečno intenziteto padavin.

Analiza podatkov za krošnjo bora (slika 57) enako pokaže logaritemsko medsebojno povezanost deleža prestreženih padavin in njihove intenzitete. Glede na Pearsonov koeficient ($p = 0,58$) je ta zmerna. Odvisnost je statistično značilna s p vrednostjo 0,000013.

Statistično značilno odvisnost potrjuje tudi magistrsko delo Anite Zore (2020).



Slika 57: Delež prestreženih padavin bora glede na povprečno intenziteto padavin.

4.5 Primerjava treh različnih padavinskih dogodkov

Za primerjavo smo izbrali tri različne dogodke, ki se razlikujejo po času trajanja, količini in intenziteti padavin. Vsi trije izbrani dogodki so se zgodili v septembru leta 2022. V nadaljevanju bomo najprej

prikazali dogodek A – najmanjši dogodek od treh, nato dogodek B – srednji od treh in na koncu še dogodek C – največji dogodek od treh izbranih.

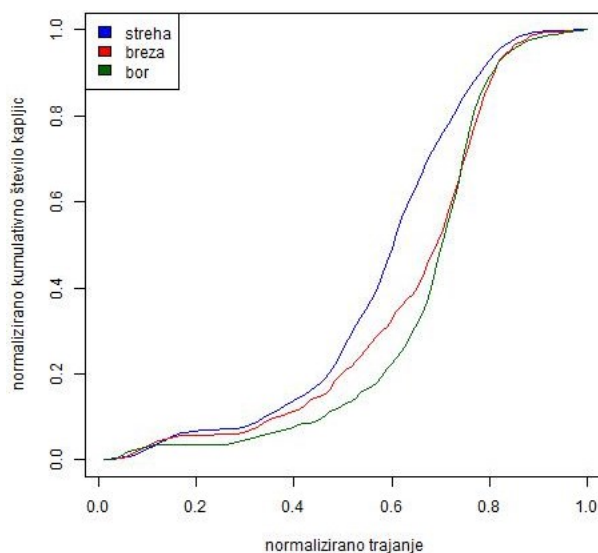
4.5.1 Dogodek A

Prvi dogodek, najmanjši od treh, ki jih bomo prikazali, se je zgodil 10. 09. 2022 in je trajal 1,5 ur, s skupno količino padavin 3,6 mm in 19.463 kapljic nad drevesno krošnjo. Skupno število kapljic pod krošnjo breze je bilo na koncu dogodka 16.922 (zmanjšalo se je za 13 %), pod borom pa 8.259 (zmanjšalo se je za 57.6 %).

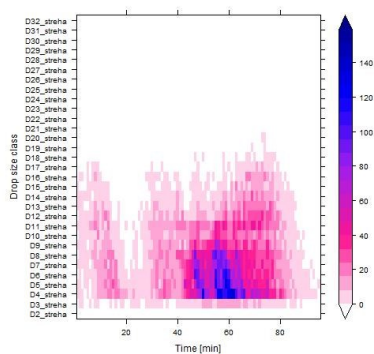
Iz slik 58-64 je razvidno, da je večina kapljic (približno 70 %) padla v drugi polovici dogodka. Intenziteta je v prvih 15 minut naraščala, potem pa je padala, in nato po 30. minuti spet narasla. Intenzivno je deževalo vse do 80. minute, ko je intenziteta padavin začela hitro padati.

Največji premer kapljice na prostem je bil zaznan med 70. in 75. minuto in je ustrežal 21. velikostnemu razredu, kar pomeni, da je bila kapljica velikosti približno 5,5 mm. Pod krošnjo breze je maksimalna vrednost dosežena 2-krat in je znašala približno 7,50 mm, pod borom pa približno 4,75 mm. Iz slik 58-64 je tudi razvidno, da je največje število kapljic pod obema drevesoma prepuščeno med 50. in 80. minuto, kar je pričakovano zaradi največje intenzitete padavin na prostem v tem času.

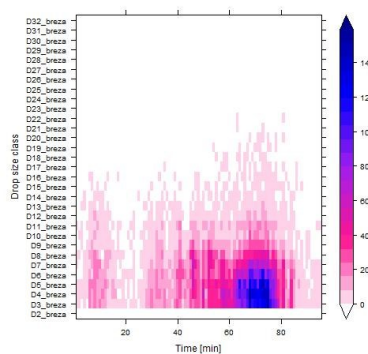
Največja zaznana hitrost nad drevesno krošnjo je zaznana 2-krat in je znašala približno 12 m/s (28. hitrostni razred). Pod krošnjo breze je maksimalna hitrost dosežena 1-krat in je znašala približno 13,6 m/s (29. hitrostni razred). Pod krošnjo bora je maksimalna hitrost okrog 10,4 m/s dosežena 3-krat.



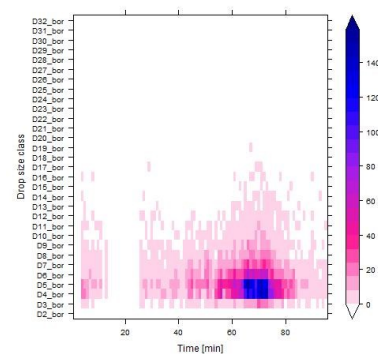
Slika 58: Prikaz naraščanja števila kapljic v času trajanja dogodka A.



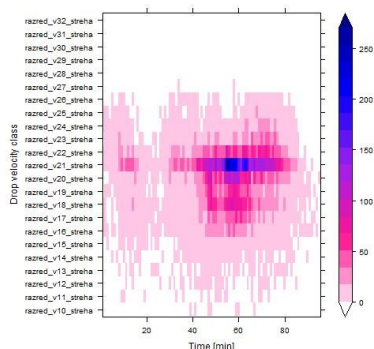
Slika 59: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic nad drevesnimi krošnjami pri dogodku A.



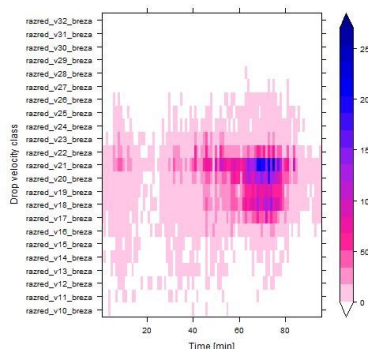
Slika 60: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo breze pri dogodku A.



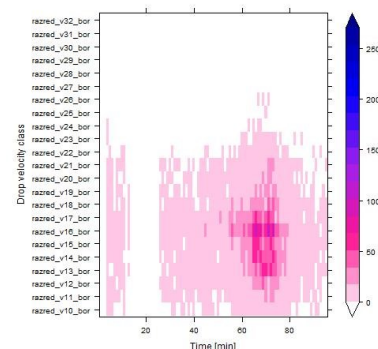
Slika 61: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo bora pri dogodku A.



Slika 62: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic nad drevesnimi krošnjami pri dogodku A.



Slika 63: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo breze pri dogodku A.



Slika 64: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo bora pri dogodku A.

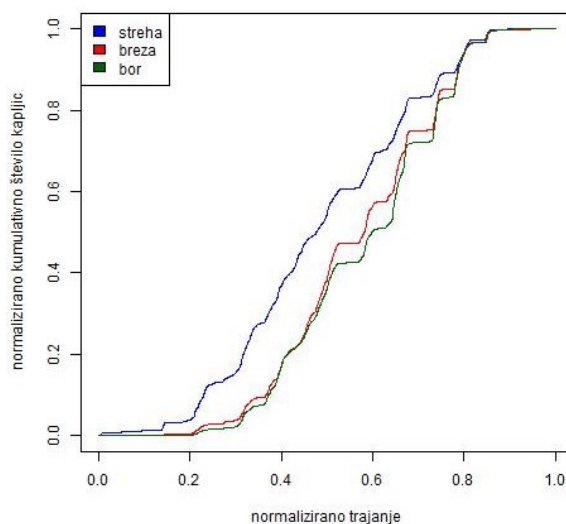
4.5.2 Dogodek B

Drugi dogodek (slike 65-71), ki ga bomo prikazali se je zgodil med 24. in 26. septembrom leta 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 (zmanjšalo se je za 16,8 %), pod borom pa 274.075 (zmanjšalo se je za 40,7 %). Prepuščanje padavin pod drevesnimi krošnjami se začelo šele po sedmih urah od začetka dogodka, ko je intenziteta padavin na prostem začela naraščati (pod brezo je majhna količina kapljic zaznana tudi v prvih sedmih urah). Kapljanje pod borom ni preseglo trajanja dogodka, pod brezo pa so zaznane kapljice tudi v naslednjih štirih urah po dogodku.

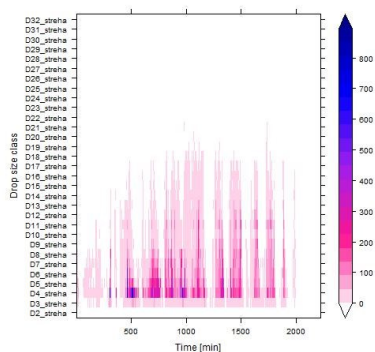
Največji premer kapljice (slike 66-68) nad drevesno krošnjo je zaznan 2-krat in je znašal približno 6,5 mm (22. velikostni razred), pod krošnjo breze je znašal 8,5 mm (24. velikostni razred) in je zaznan 3-krat, pod krošnjo bora pa 7,5 mm (23. velikostni razred) in je zaznan 2-krat.

Največja zaznana hitrost (slike 69-71) pri dogodku B je nad drevesno krošnjo znašala 12 m/s in je bila dosežena 3-krat. Nad streho so kapljice večina časa padale s hitrostjo med 2,2 m/s (16. hitrostni razred)

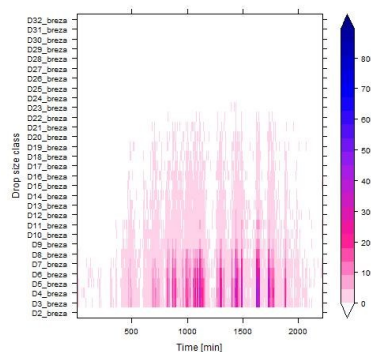
in 6 m/s (23. hitrostni razred). Pod krošnjo breze se je hitrost gibala med 2,6 m/s (17. hitrostni razred) in 5,3 m/s (22. hitrostni razred), maksimalna hitrost pa je znašala približno 13,6 m/s (29. hitrostni razred) in je bila dosežena 3-krat. Pod krošnjo bora je razporejenost po hitrostnih razredih precej bolj enakomerna, maksimalna hitrost pa je bila 8,8 m/s (26. hitrostni razred).



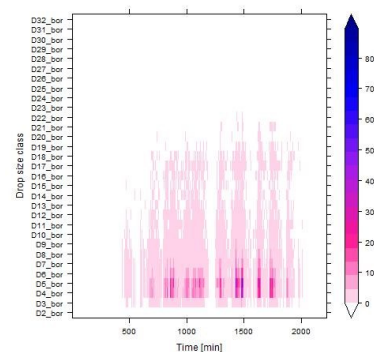
Slika 65: Prikaz naraščanja števila kapljic v času trajanja dogodka B.



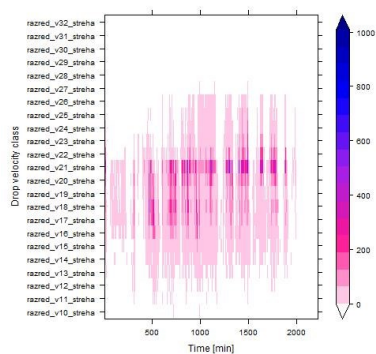
Slika 66: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic nad drevesnimi krošnjami pri dogodku B.



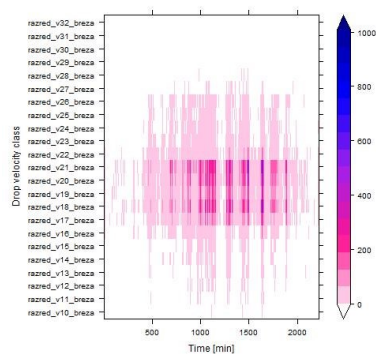
Slika 67: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo breze pri dogodku B.



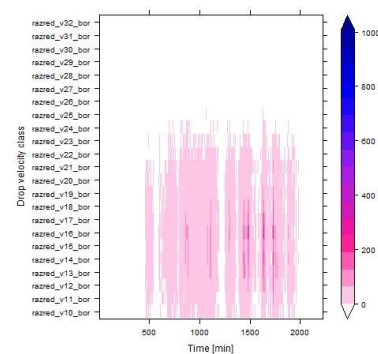
Slika 68: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo bora pri dogodku B.



Slika 69: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic nad drevesnimi krošnjami pri dogodku B.



Slika 70: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo breze pri dogodku B.



Slika 71: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo breze pri dogodku B.

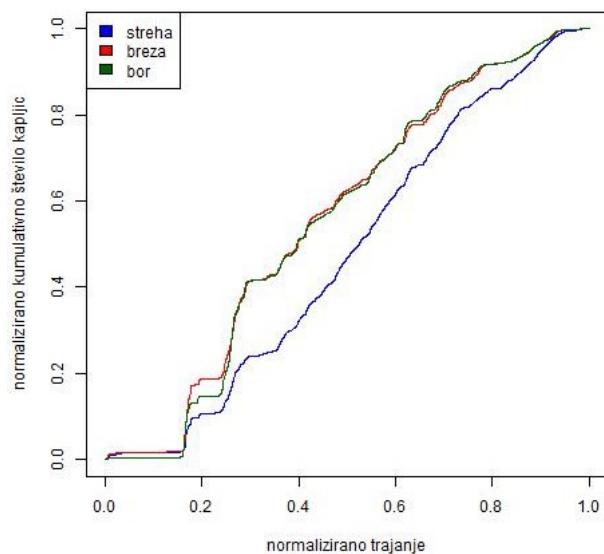
4.5.3 Dogodek C

Tretji dogodek (slike 72-78), največji od treh izbranih, se je zgodil med 15. in 17. septembrom leta 2022 in je trajal 58,6 ur, s skupno količino padavin 356,5 mm in 1.435.716 kapljic nad drevesno krošnjo. Skupno število kapljic pod krošnjo breze je bilo na koncu dogodka 2.048.417 (povečalo se za 42,7 %), pod borom pa 1.329.566 (zmanjšalo se za 7,4 %). V tem dogodku so kapljice nad drevesno krošnjo precej enakomerno razporejene po velikostnih razredih. Pod obema drevesoma je največji del padavin prepuščen v času trajanja dogodka med 4-to in 16-to uro. Dogodek je kot izredni dogodek zabeležen tudi s strani ARSO (ARSO, 2022).

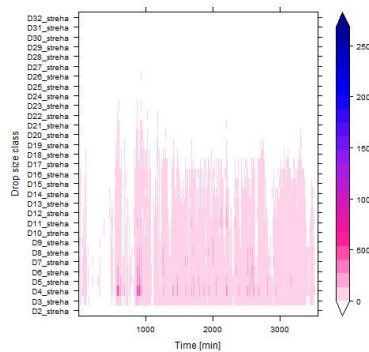
Največji premer kapljice (slike 73-75) nad drevesno krošnjo je znašal približno 13 mm (27. velikostni razred). Tudi pod krošnjo breze je znašal 13 mm in se časovno ujema z največjim številom prepuščenih kapljic pod njo. Največji zaznani premer kapljice pod borom se tudi časovno ujema z največjim številom prepuščenih kapljic in znaša 15 mm (28. velikostni razred).

Pri dogodku C so maksimalne dosežene hitrosti (slike 76-78) nad krošnjami in pod njimi višje v primerjavi z manjšima dogodkoma A in B. Nad drevesno krošnjo je maksimalna hitrost kapljice znašala približno 20,8 m/s (najvišji hitrostni razred), pod krošnjo breze je ta vrednost znašala približno 17,6 m/s (31. hitrostni razred), pod krošnjo bora pa približno 12 m/s (28. hitrostni razred).

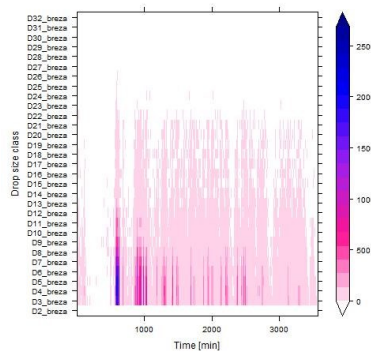
Vse našete maksimalne vrednosti (maksimalen premer in maksimalna povprečna hitrost) so na vseh treh lokacijah (nad krošnjami, pod krošnjo breze in pod krošnjo bora) pri tem dogodku dosežene enkrat.



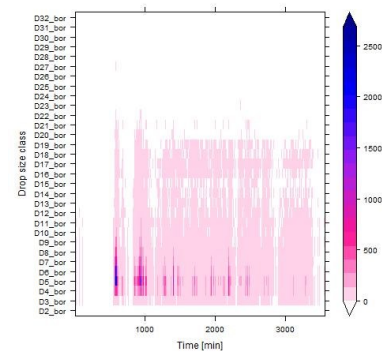
Slika 72: Prikaz naraščanja števila kapljic v času trajanja dogodka C.



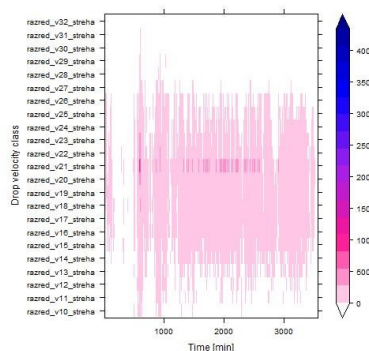
Slika 73: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic nad drevesnimi krošnjami pri dogodku C.



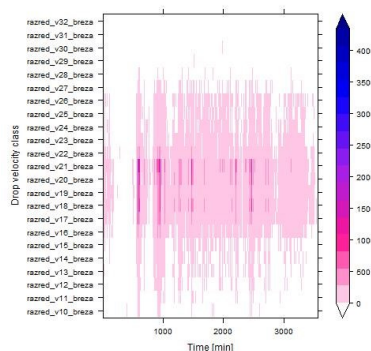
Slika 74: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo breze pri dogodku C.



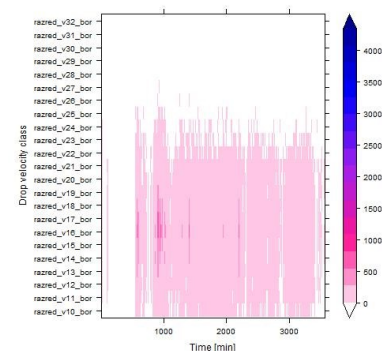
Slika 75: Velikostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo bora pri dogodku C.



Slika 76: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic nad drevesnimi krošnjami pri dogodku C.



Slika 77: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo breze pri dogodku C.



Slika 78: Hitrostna porazdelitev dežnih kapljic pod krošnjo bora pri dogodku C.

4.5.4 Glavni zaključki primerjave treh različnih dogodkov

Pri dogodku A je delež prestreženih padavin, tako pri brezi kot pri boru, precej večji glede na povprečno vrednost obeh (preglednica 10). Pri dogodkih B in C so vrednosti manjše od povprečnih, vendar razlika ni velika. Povprečne intenzitete dogodkov 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 največ časa, pa je delež prestreženih padavin najmanjši od treh. Zaključimo lahko, da z daljšim časom trajanja dogodka, vegetacija prestreže manj padavin, kar so ugotovili tudi nekateri drugi avtorji (npr. Zore, 2022; Zabret in sod., 2017).

Pri podrobnejši analizi velikostne porazdelitve padavinskih delcev dogodkov A in C je razvidno, da sta tako breza kot bor zadržala manj padavin, ko je bil premer kapljic največji. Pri dogodku C so največji premeri kapljic in tudi največji deleži prepuščenih padavin, nastopili med približno 8. in 20. uro. Pri dogodku A pa so nastopili približno med 50. in 80. minuto. Hitrosti padavinskih delcev so nekoliko bolj enakomerno razporejene po dogodkih, le da je pri dogodku C razvidno, da se je z največjimi hitrosti kapljic prepuščanje pod krošnjo bora začelo.

Preglednica 10: Primerjava treh izbranih padavinskih dogodkov.

Dogodek	Trajanje [h]	Količina padavin [mm]	Intenziteta [mm/h]	Prestrežene padavine breza [%]	Prestrežene padavine bor [%]	Hitrost [m/s]	D50 [mm]
A	1,48	3,59	2,27	59,95	89,90	4,13	1,90
B	33,18	83,04	2,24	25,72	67,70	3,82	1,81
C	58,62	356,52	6,01	29,53	52,66	4,23	2,33

5 ZAKLJUČKI

V diplomski nalogi smo obravnavali vpliv prestrežanja padavin na mikrostrukturo padavin in s tem tudi na erozivnost padavin. Prestrežanje padavin smo obravnavali posebej za dve vrsti dreves (brezo in bor) in glede na dve glavni fenološki fazi (obdobje vegetacije in obdobje mirovanja).

Na podlagi merjenih podatkov s tremi disdrometri (nad krošnjo in pod krošnjama breze in bora), smo analizirali lastnosti padavinskih dogodkov v obravnavanem obdobju. Tako smo določili 48 padavinskih dogodkov v obdobju med 12. julijem 2022 in 16. februarjem 2023. Za posamezne dogodke smo izračunali čas trajanja, količino in intenziteto padavin in mikrostrukturo padavin (hitrost, velikost in število kapljic). Izračunali pa smo tudi dejavnik erozivnosti padavin, ki je določen z izračunano maksimalno 30-minutno intenziteto in kinetično energijo padavin posameznega padavinskega dogodka. Vse omenjene lastnosti dogodkov smo določili nad krošnjami dreves in pod obema izbranimi vrstama dreves za celotno obravnavano obdobje in ločeno glede na dve glavni fenološki fazi.

Analiza meritev je pokazala, da se delež prestreženih padavin obeh drevesnih krošenj s časom zmanjšuje. Iz rezultatov je jasno da bor v splošnem prestreže več padavin kot breza, da pa obdobje vegetacije vpliva na prestrežene padavine pri brezi bolj kot pri boru. Takšen rezultat je bil pričakovan glede na to da je breza listavec z izrazitim spreminjanem fenoloških faz, bor pa je iglavec, za katerega je prehod med fenološkimi fazami manj izrazit.

Ko smo analizirali vpliv mikrostrukture padavin na delež prestreženih padavin, smo prišli do precej različnih zaključkov za obe vrsti dreves. Zveza med povprečno velikostjo kapljic in deležem prestreženih padavin se je pokazala kot statistično značilna samo pri boru. Vpliv povprečne hitrosti kapljic na delež prestreženih padavin pa je bil statistično značilen samo pri brezi. Pokazalo se je tudi, da ima največji vpliv na delež prestreženih padavin pri obeh vrstah dreves število kapljic.

Statistično značilne so bile pri obeh vrstah dreves tudi medsebojne odvisnosti KE in delež prestreženih padavin ter intenziteta in delež prestreženih padavin. Ugotovili smo, da se prestrežanje z večanjem KE zmanjšuje.

Če pogledamo rezultate analiz po posameznih fenoloških fazah ugotovimo, 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 pa se je povečala za 5 %. Glede na dobljene rezultate, lahko torej samo delno potrdimo hipotezo 1, ki pravi, da prestrežanje padavin breze in bora v obeh glavnih fenoloških fazah zmanjšuje hitrost kapljic.

Rezultati, za celotno obravnavano obdobje skupaj in za obdobje vegetacije posebej, delno ovržejo hipotezo 2, ki pravi da prestrežanje padavin zmanjšuje velikost kapljic, saj se je D50 pri obeh vrstah dreves precej povečal pri prehodu skozi krošnje. V obdobju mirovanja pa se je D50 res zmanjšal. Rezultati so pokazali, da listje pri brezi povečuje premer kapljic v večji meri kot pri boru.

Hipotezo 3, ki pravi, da se število kapljic povečuje s prehodom skozi krošnjo breze in bora v obeh glavnih fenoloških fazah, prav tako lahko samo delno potrdimo. V obdobju vegetacije se je pod brezo

(ko je bilo na njej v večji meri listje prisotno) število kapljic povečalo za 2,8 %, vendar se je pri boru pa zmanjšalo za 44,6 %.

VIRI

Agencija republike Slovenije za okolje (ARSO). 2022. Obilne padavine in neurja med 15. in 17. septembrom 2022.

https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/weather_events/padavine-neurja_15-17sep2022.pdf (Pridobljeno 1. 6. 2023.)

Agencija republike Slovenije za okolje (ARSO). 2023. Sneženje in močan veter med 21. in 24. januarjem 2023.

https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/weather_events/sneg_veter_21-24jan2023.pdf (Pridobljeno 1. 6. 2023.)

Brandt, C.J., 1989. The size distribution of throughfall drops under vegetation canopies. *Catena* 16: 507–524.

Brilly, M., Šraj, M. 2014. Osnove hidrologije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 304 str.

Carollo, F., Ferro, V. 2014. Modeling Rainfall Erosivity by Measured Drop-Size Distribution. *Journal of Hydrologic Engineering* 20(6): C4014006.

Carollo, F. G., Ferro, V., Serio, M. A. 2016. Estimating rainfall erosivity by aggregated drop size distributions. *Hydrological Processes* 30: 2119–2128.

Giráldez, J.V., Castro-Orgaz, O., Gómez, J.A., Laguna, A.M. 2022. Chapter 15 - Rainfall and erosion/sediment transport. 397-426.

Gunn, R., Kinzer, G. D. 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *J. Atmos. Sci.*, 6, 243–248.

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: e1225.
https://www.researchgate.net/publication/316919926_Throughfall_drop_size_distributions_a_review_and_prospectus_for_future_research (Pridobljeno 17. 5. 2023.)

LI-COR. 2023. LI-2200C Plant Canopy Analyzer.

https://www.licor.com/env/products/leaf_area/LAI-2200C/instrument (Pridobljeno 9. 5. 2023.)

Meshesha, D.T., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N. 2019. Influence of raindrop size on rainfall intensity, kinetic energy, and erosivity in a sub-humid tropical area: a case study in the northern highlands of Ethiopia. *Theor Appl Climatol* 136, 1221–1231.

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: 620–627.

OTT Hydromet. Operating Instructions. Present weather sensor OTT Parsivel. 2016.

<http://www.ott.com/en-us/products/download/operating-instructions-present-weather-sensor-ott-parsivel2/> (Pridobljeno 15. 5. 2023.)

Petan, S., 2010. Meritve in modeliranje erozivnosti padavin kot parametra erozije tal. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Petan): 258 str.

R Core Team. 2023. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Dunaj, Avstria. <http://www.R-project.org/> (Pridobljeno 20. 06. 2023.)

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Washington, DC, USDA ARS. Agricul. Handbook 703: 384 str. https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/64080530/RUSLE/AH_703.pdf (Pridobljeno 21. 5. 2023.)

Sarkar D., 2008. Lattice: Multivariate Data Visualization with R. Springer, New York. ISBN 978-0-387-75968-5. <http://lmdvr.r-forge.r-project.org> (Pridobljeno 11. 6. 2023.)

Uijlenhoet, R., Sempere Torres, D. 2006. Measurement and parameterization of rainfall microstructure. Journal of Hydrology 328: 1–7.

Wickham, H., 2016. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York.

Wickham H., François R., Henry L., Müller K., Vaughan D., 2023. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. Package version 1.1.2. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr> (Pridobljeno 20. 6. 2023.)

Zabret, K. 2018. Vpliv meteoloških in vegetacijskih parametrov na prestrežanje padavin. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Zabret): 174 str.

Zabret, K., Mikoš, M., Rakovec, J., Šraj, M. 2016. Proces prestrežanja padavin: vpliv fenološke faze, trajanja padavinskega dogodka ter mikrostrukture padavin. Konferenca: Raziskave s področja geodezije in geofizike 2015, Ljubljana, Slovenija., Objava: Zbornik referatov: 111–121.

Zabret, K., Rakovec, J., Šraj, M. 2017. Evaluation of Drop Size Distribution Impact on Rainfall Interception by Trees. Proceedings 1: 117.

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., Šraj, M. 2018. Spatial variability of throughfall under single birch and pine tree canopies. *Acta hydrotechnica* 31/54: 1-20.

Zore, A. 2020. Vpliv prestrežanja padavin na erozijo. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Zore): 62 str.

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.

Zorn, M., Komac, B. 2023. Erozijski prsti na kmetijskih zemljiščih v Sloveniji.

»Ta stran je namenoma prazna«