

UDK/UDC: 556.12/13:630(497.4)  
Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Prejeto/Received: 24.11.2015  
Sprejeto/Accepted: 15.03.2016

## MERITVE IN MODELIRANJE ODTOKA Z DVEH GOZDNATIH POREČIJ NA POHORJU MEASURING AND MODELLING OF RUNOFF FROM TWO FORESTED WATERSHEDS IN POHORJE

Urša Vilhar<sup>1</sup>, Klemen Kestnar<sup>2</sup>, Andrej Vidmar<sup>2</sup>, Mojca Šraj<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gozdarski inštitut Slovenije, Oddelek za gozdno ekologijo, Večna pot 2, SI-1000 Ljubljana

<sup>2</sup>Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

### Izvleček

Gozdovi pomembno vplivajo na površinski odtok, saj struktura gozda vpliva na delež prepuščenih padavin, skladiščno zmogljivost krošenj, odtok po deblu, evapotranspiracijo in infiltracijsko sposobnost tal za vodo. Odtok iz gozdnatega porečja je tudi pomemben kazalnik hidrološke funkcije gozdov. V prispevku obravnavamo vpliv prestrezanja padavin v gozdu na odtoke z dveh eksperimentalnih porečij zgornje Oplotnice na Pohorju. Na Pohorju se zaradi velikih površin antropogenih smrekovih monokultur že od zgodnjih 50-ih let prejšnjega stoletja izvaja načrtna premena gozdov v bolj naravne mešane gozdove iglavcev in listavcev. Primerjali smo merjene prepuščene padavine in odtoke z obej porečij ter izdelali modela površinskega odtoka s programom HEC-HMS 4.0. Modela smo umerili in validirali s pomočjo merjenih padavin in pretokov. Povprečne prepuščene padavine v porečju Javorskega potoka so znašale 92-94 % padavin na prostem in v porečju Lukanskega potoka 78-89 % padavin na prostem. Tudi povprečni pretok je bil višji na Javorskem potoku ( $9,7 \text{ ls}^{-1}$ ) kot na Lukanskem potoku ( $7,1 \text{ ls}^{-1}$ ), pri čemer sta prispevni površini obej potokov podobne velikosti ( $0,21 \text{ km}^2$  za Lukanski potok in  $0,22 \text{ km}^2$  za Javorski potok). Modela površinskega odtoka sta dala sprejemljive rezultate za vegetacijsko obdobje. Celotne padavinske izgube so znašale v porečju Javorskega potoka 92 % in v porečju Lukanskega potoka 95 %.

**Ključne besede:** odtok, prepuščene padavine, odtok po deblu, eksperimentalno porečje, gozd, program HEC-HMS, *Picea abies*, *Fagus sylvatica*

### Abstract

Forests have an important impact on surface runoff, since forest structure influences throughfall, canopy storage capacity, stemflow, evapotranspiration and soil infiltration capacity. Runoff from forested watersheds is also an important indicator of the hydrological function of forests. The paper deals with the influence of rainfall interception by forest on runoff in two small experimental watersheds of the upper Oplotnica River in Pohorje. In Pohorje systematical conversion of large areas of anthropogenic spruce monocultures to more natural mixed forests started already in early 1950s. Measured throughfall and drainage from two watersheds were compared and two runoff models were built in the HEC-HMS 4.0 program. The models were calibrated and validated using the measured precipitation and runoff. Throughfall was higher in Javorski watershed (92-94 % of incident precipitation) than in Lukanski watershed (78-89 %

<sup>1</sup> Stik / Correspondence: [mojca.sraj@fgg.uni-lj.si](mailto:mojca.sraj@fgg.uni-lj.si)

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

© Vilhar U. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – Share Alike 4.0 Licence](#).

of incident precipitation). Also, average flow rate was higher for the Javorski stream ( $9.7 \text{ l s}^{-1}$ ) than for the Lukanski stream ( $7.1 \text{ l s}^{-1}$ ) despite similar size of both catchment areas ( $0.21 \text{ km}^2$  for Lukanski and  $0.22 \text{ km}^2$  for Javorski stream). Runoff models gave acceptable results for the vegetation period. Total precipitation losses amounted to 92 % and 95 % in Javorski and Lukanski watershed, respectively.

**Keywords:** runoff, throughfall, stemflow, experimental watershed, forest, HEC-HMS program, *Picea abies*, *Fagus sylvatica*

## 1. Uvod

Gozdovi imajo nedvomno velik vpliv na vodni režim in hidrološki krog (Šraj, 2009). Raziskave pri nas in v svetu kažejo, da sečna gozdov povzroči povečanje površinskega odtoka, zaraščanje pa njegovo zmanjšanje (Šraj et al., 2008). Delež v gozdu prestreženih padavin je glede na različne razmere lahko zelo različen in znaša od 6 do 93 % (Ovington, 1954).

Gozdnata eksperimentalna porečja (ang. *experimental river basins*), so temelj za razvoj gozdne hidrologije kot znanstvene vede (Šraj et al., 2008; Bezak et al., 2013) in so pomembna za pridobivanje novih spoznanj o dolgoročnih učinkih gozdnogospodarskih ukrepov na hidrologijo gozdnatih porečij (Vilhar, 2009; Vilhar in Fajon, 2007).

Struktura gozda (drevesna sestava, starost, premer, višina, idr.) pomembno vpliva na površinski odtok in posledično na hidrologijo celotnega gozdnatega porečja. Tako na primer večji delež listavcev v mešanih gozdovih prispeva k večjemu deležu prepuščenih padavin, večjemu odtoku po deblu (Vilhar, 2016), ter večji infiltracijski sposobnosti gozdnih tal za vodo (Wahl et al., 2005). Pohorje je eno od območij v Sloveniji z najbolj spremenjeno naravno sestavo drevesnih vrst (Breznikar et al., 2006), saj je tam v 19. stoletju potekalo intenzivno golosečno gospodarjenje z gozdom (Cehner, 2002). Danes antropogeni smrekovi sestoji obsegajo 45 % skupne gozdne površine na Pohorju. Mednje sodijo mešani gozdovi s prevladujočim deležem smrek na naravnih rastiščih bukve in jelke. Načrtna premena smrekovih monokultur na mislinjskem delu Pohorja se je pričela že v zgodnjih 50. letih prejšnjega stoletja in se je postopoma širila na njegovo celotno območje (Diaci, 2006), predvsem zaradi zavedanja gozdarske stroke o negativnih

vplivih smrekovih monokultur na kakovost usedlin (Rothe et al., 2002; Simončič et al., 2005), kemizem tal (Berger et al., 2009; Vilhar et al., 2016), pestrost rastlinskih vrst (Máliš et al., 2010; Vilhar et al., 2016) ter na zagotavljanje različnih funkcij oziroma ekosistemskih storitev gozda (Gamfeldt et al., 2013).

V prispevku obravnavamo vpliv prestrezanja padavin v gozdu na odtoke z dveh manjših eksperimentalnih porečij v mešanih gozdovih smreke in bukve v porečju zgornje Oplotnice na Pohorju. Primerjali smo merjene prepuščene padavine in odtoke z obeh porečij ter izdelali modela površinskega odtoka s programom HEC-HMS 4.0. Modela smo umerili in validirali s pomočjo merjenih padavin in pretokov z obeh porečij.

Odtok s porečja je pomemben kazalnik hidrološke funkcije gozdov, saj odraža zadrževalno sposobnost gozda za padavine. Zato lahko rezultati raziskave pomembno prispevajo k oblikovanju hidrološko usmerjenih gozdnogojitvenih ukrepov na ravni gozdnatih porečij z namenom izboljšanja hidrološke funkcije gozgov.

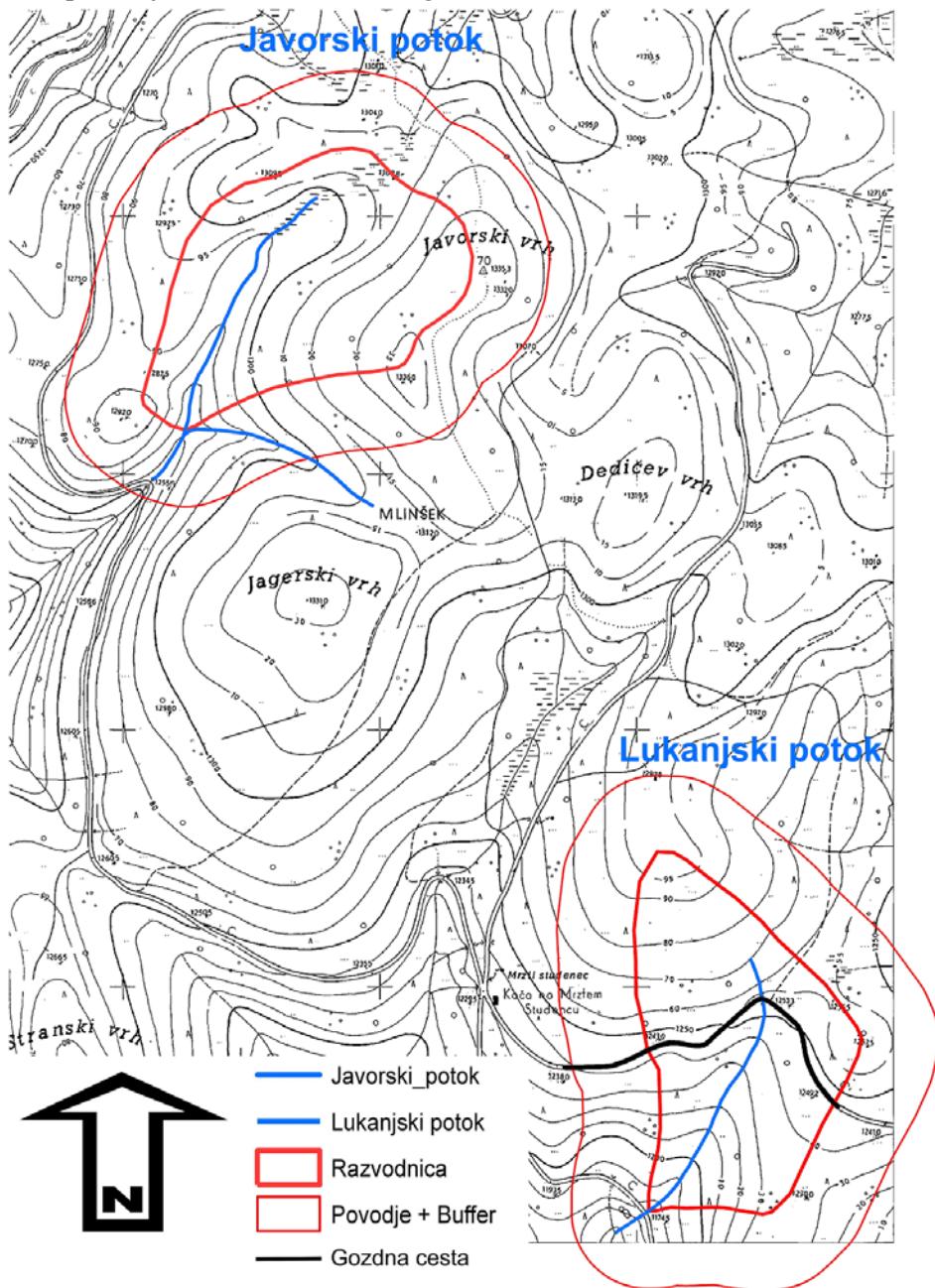
## 2. Metode

### 2.1 Študijsko območje

Raziskave so potekale v zgornjem delu porečja Oplotnice na Pohorju ( $46^{\circ}27'N$ ,  $15^{\circ}23'E$ ) na nadmorski višini od 1100 do 1350 m. Podnebje ekoregije Pohorje je prehodno celinsko z vplivi alpskega (Kutnar et al., 2002) in subpanonskega območja (Perko, 1998). Letna količina padavin v obdobju 2004 do 2013 je znašala 1327 mm, povprečna temperatura zraka pa  $4,7^{\circ}\text{C}$  (Vilhar et al., 2014). Matična podlaga je kisla silikatna kamnina iz muskovitno biotitnega gnajsa s prehodi v blestnik. Prevladujejo distrični ranker, tipična

distrična rjava tla, humusna distrična rjava tla in humusna rjava opodzoljena tla (Urbancič in Kutnar, 2006). Gozdovi kisloljubnega visokogorskega bukovja (kisloljubni gozd bukve in bekič - *Luzulo albidae-Fagetum*) so bili v preteklosti zelo spremenjeni zaradi človekovega

vpliva (Urbancič in Kutnar, 2006). V obdobju glažutarstva je bila za potrebe steklarjev bukev mestoma povsem izsekana, zato se je kot dominantna vrsta ustalila navadna smreka (*Picea abies* (L.) Karst.).



**Slika 1:** Eksperimentalni porečji Javorskega potoka (zgoraj) in Lukanjskega potoka (spodaj) v zgornjem porečju Oplotnice na Pohorju (Vilhar, 2009). Dodatno je označena gozdna cesta, ki preseka prispevno površino Lukanjskega potoka.

**Figure 1:** Experimental watersheds Javorski potok (above) and Lukanjski potok (below) of the Upper Oplotnica River in Pohorje (Vilhar, 2009). The forest road that crosses the Lukanjski stream catchment is additionally marked.

## 2.2 Eksperimentalni porečji Javorskega in Lukanskega potoka

Obravnavani eksperimentalni porečji Lukanskega in Javorskega potoka ležita v osrčju Pohorskega masiva, vzhodno od smučišča Rogla (Kestnar, 2015), in imata podobne rastiščne razmere, talne lastnosti, floristične in vegetacijske značilnosti, gozdnogospodarske razrede, idr. (Vilhar, 2016). Dolžina obravnavanega odseka Javorskega potoka znaša 539 m, medtem ko dolžina obravnavanega dela Lukanskega potoka znaša 580 m (slika 1). Prispevna površina Lukanskega potoka znaša 0,21 km<sup>2</sup>, prispevna površina Javorskega potoka pa 0,22 km<sup>2</sup>. Obliki obeh porečij sta primerljivi, padec pa je v porečju Lukanskega potoka nekoliko večji od tistega v porečju Javorskega potoka.

**Preglednica 1:** Površina gozdnih sestojev v eksperimentalnih porečjih Javorskega potoka in Lukanskega potoka v zgornjem porečju Oplotnice na Pohorju (povzeto po Vilhar, 2009).

**Table 1:** Area of forest stands in experimental watersheds Javorski potok and Lukanski potok of the Upper Oplotnica River in Pohorje (after Vilhar, 2009).

Gozdni sestoj	Lukanjski potok		Javorski potok	
Površina	[m <sup>2</sup> ]	[%]	[m <sup>2</sup> ]	[%]
Visokogorska bukovja, debeljak	90766	43	82148	37
Zelo zasmrečeni gorski in visokogorski bukov gozd, debeljak	0	0	34592	16
Visokogorski smrekov gozd, debeljak	22577	11	51174	23
Zasmrečeni gorski in visokogorski bukov gozd, debeljak	60367	29	54329	24
Visokogorski smrekov gozd, drogovnjak	35406	17	0	0
Skupaj	209116		222243	

Na obeh eksperimentalnih porečjih prevladujeta navadna smreka (*Picea abies* (L.) Karst.) in bukev (*Fagus sylvatica* L.), ki se mozaično izmenjujeta glede na rastiščne značilnosti (Kutnar et al., 2013).

Prevlada smreke je pogojena z načinom gospodarjenja v preteklosti na tem območju. V posameznih delih porečja se pojavljajo tudi navadna jelka (*Abies alba* Mill.), gorski javor (*Acer pseudoplatanus* L.) in jerebika (*Sorbus aucuparia* L.).

Po podatkih Zavoda za gozdove Slovenije (Arhiv ZGS) v obeh porečjih prevladujejo visokogorska bukovja (preglednica 1, slika 2). Sledijo sestoji zasmrečenega gorskega in visokogorskega bukovega gozda, visokogorskega smrekovega gozda, zelo zasmrečenega gorskega in visokogorskega bukovega gozda in visokogorski smrekov gozd. V porečju Lukanskega potoka je delež smreke v lesni zalogi med 25 % in 99 % (povprečno 73 %) ter delež bukve med 1 % in 75 % (povprečno 27 %). V porečju Javorskega potoka je delež smreke v lesni zalogi med 66 % in 98 % (povprečno 83 %) ter delež bukve med 2 % in 34 % (povprečno 17 %).

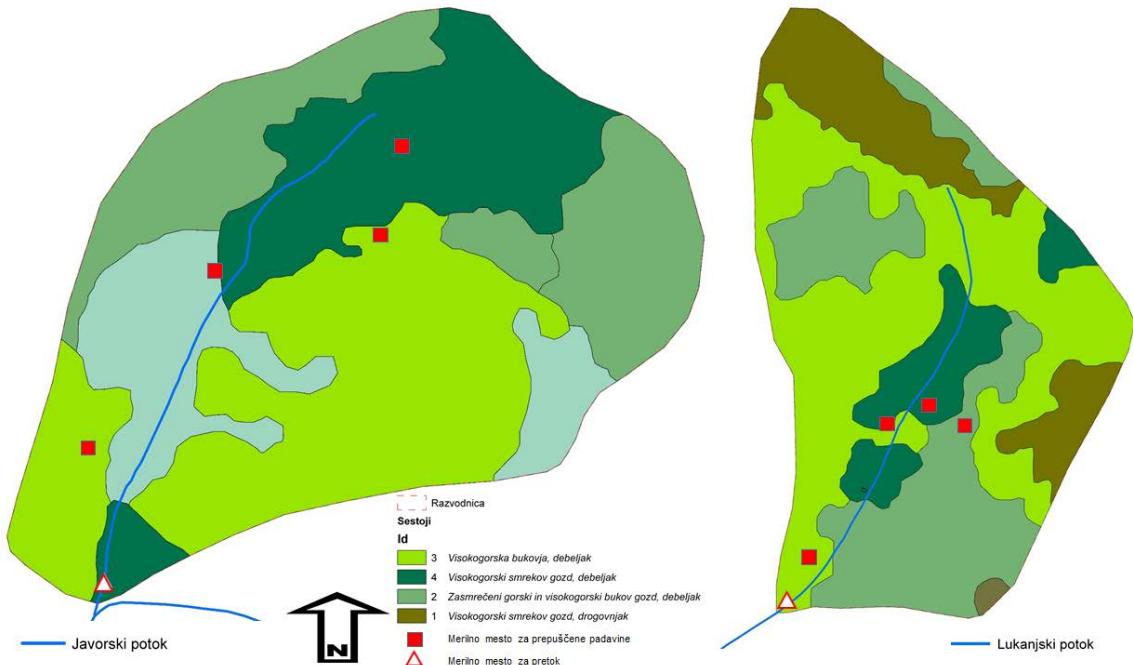
## 2.3 Meritve padavin na prostem, prepuščenih padavin v gozdu in odtoka po deblu

Količino padavin na prostem, za katero predpostavljamo, da je enaka količini padavin, ki doseže vrhove krošenj na ploskvah, smo spremljali na travniku (ploskev intenzivnega spremeljanja gozdov Tratice) v neposredni bližini ploskev v gozdu v obdobju od junija 2008 do decembra 2012 (slika 3a). Mesečno količino padavin na prostem smo merili s tremi dežemerji s površino 452 cm<sup>2</sup> na višini 1,3 m v skladu z navodili ICP Forests (Clarke et al., 2010). V zimskih mesecih smo za vzorčenje snežnih padavin uporabili tri vzorčevalnike s površino 434 cm<sup>2</sup>. Hkrati smo padavine na prostem spremljali v 30-minutnem intervalu s samodejno vremensko postajo (Vantage Pro2 weather station, Davis Instruments), ki je del mreže vremenskih postaj Gozdarskega inštituta Slovenije (Sinjur et al., 2010).

V vsakem porečju smo izbrali štiri gozdne ploskve velikosti 20 m x 20 m, na katerih smo v sistematični mreži postavili devet dežemerov za redne mesečne meritve prepuščenih padavin v mesecih od aprila do novembra (slika 3b). Dežemeri z zbirno površino 452 cm<sup>2</sup> so bili

postavljeni na višini 1,3 m v skladu z navodili ICP Forests (Clarke et al., 2010). Hkrati smo prepričene padavine v gozdu spremljali v 30-

minutnih intervalih s samodejnimi merilci padavin (HOBO Data Logging Rain Gauge-RG3).



**Slika 2:** Gozdni sestoji v eksperimentalnih porečjih Javorškega potoka in Lukanijskega potoka v zgornjem porečju Oplotnice na Pohorju. Kvadrati označujejo merilna mesta prepuščenih padavin, trikotnika pa merilna mesta pretoka.

**Figure 2:** Forest stands in experimental watersheds Javorški potok and Lukanijski potok of the Upper Oplotnica River in Pohorje. Squares indicate measuring locations of throughfall and triangles locations of runoff measurements.



**Slika 3:** Meritve a) padavin na prostem, b) prepuščenih padavin in c) odtoka po deblu na ploskvah v eksperimentalnih porečjih Javorškega potoka in Lukanijskega potoka v zgornjem porečju Oplotnice na Pohorju (foto: Kestnar, 2014).

**Figure 3:** Measurements of a) incident precipitation, b) throughfall and c) stemflow on sites in experimental watersheds Javorški potok and Lukanijski potok of the Upper Oplotnica River (photo: Kestnar, 2014).



a)

b)

**Slika 4:** Parshallov preliv na a) Javorskem potoku in b) Lukanskem potoku v zgornjem porečju Oplotnice na Pohorju (foto: Kestnar, 2014).

**Figure 4:** Parshall flume in a) Javorski potok and b) Lukanski potok of the Upper Oplotnica River in Pohorje (photo: Kestnar, 2014).

Meritve odtoka po deblu so potekale na ploskvi Tratice v gozdu od maja do septembra v letih od 2010 do 2012 na štirih bukvah različnih premerov (od 15 cm do 20 cm) v skladu z metodologijo ICP Forests (Clarke et al., 2010). Merilna naprava je bila izdelana na Gozdarskem inštitutu Slovenije. Na debla izbranih bukev je bila v obliki spirale ovita in tesno pritrjena cev, povezana z več PVC posodami, kjer se je odtok po deblu zbiral in ročno odčitaval v rednih mesečnih časovnih intervalih (slika 3c).

## 2.4 Meritve pretokov

Meritve odtokov z obeh eksperimentalnih porečij so potekale s kovinskim Parshallovim prelivom v obdobju od 21. 5. 2008 do 24. 2. 2014 (slika 4). Zasnova Parshallovega preliva je standardizirana v skladu z ASTM D1941, ISO 9826:1992 in JIS B7553-1993. Gladino odtoka smo merili s samodejno merilno napravo (HOBO Water Level Logger (13 ft) U20L-04) v 15-minutnih časovnih intervalih ter hkrati za kontrolo ročno odčitavali in beležili v rednih mesečnih časovnih intervalih. Pretok prosto dotečajoče vode na Parshallov preliv

je mogoče zapisati s splošno odvisnostjo med pretokom ( $Q$ ) in višino vode ( $H$ ) (Brouwer et al., 1985):

$$Q=CH^n, \quad (1)$$

kjer je  $n$  koeficient, odvisen od velikosti žleba.

Koeficiente  $C$  in  $n$  sta določena eksperimentalno s kalibriranjem Parshallovega preliva glede na širino grla preliva in ju lahko najdemo v literaturi (USDI, 2001). V našem primeru je širina grla 0,1524 m (6 inčev), torej je  $C$  enak 2,06 in  $n$  1,58 (USDI, 2001). Vrednosti obeh koeficientov sta določeni ob uporabi anglosaškega merskega sistema (cfs, ft). Če enačbo priredimo za SI merski sistem (l/s, cm), se enačba pretoka v našem primeru glasi:

$$Q=58,3327 \cdot (0,0328 \cdot H)^{1,58}, \quad (2)$$

kjer je  $Q$  pretok [ $l s^{-1}$ ],  $H$  pa višina vode na merski točki preliva [cm].

## 2.5 Določanje časa koncentracije in časa zakasnitve

Čas koncentracije ( $T_c$ ) in čas zakasnitve ( $T_p$ ) smo določili s pomočjo merjenih padavin in pretokov

ter izrisa hidrograma. Za določitev končne ocene  $T_c$  in  $T_p$  smo izbrali tri neodvisne padavinske dogodke, in sicer 20. do 21. 5. 2010, 16. 6. 2010 in 15. 7. 2010 za vsako porečje posebej (Kestnar, 2015).  $T_c$  in  $T_p$  smo izračunali tudi s pomočjo empiričnih enačb.

$T_c$  smo izračunali po empirični Kerby-Hathewayjevi enačbi, pri čemer smo pri izračunu upoštevali dolžino vodotoka, padec vodotoka in Kerby-jev parameter hrapavosti. Kerby-Hathewayjeva enačba se uporablja predvsem za majhna porečja, kjer je površinski tok pomemben del odtoka, dolžina površinskega toka pa ne presega 400 metrov (Kestnar, 2012). Empirično enačbo Kerby-Hatheway zapišemo kot (Thompson, 1999):

$$T_c = 0,024 \left[ \frac{NL}{\sqrt{s}} \right]^{0,467}, \quad (3)$$

kjer je  $T_c$  čas koncentracije [h],  $L$  dolžina glavnega toka [m],  $S$  padec glavnega toka [%] in  $N$  Kerbyjev brezdimenzijski parameter hrapavosti glede na rabo tal.

$T_p$  smo izračunali s Snyderjevo enačbo (povzeto po Brilly in Šraj, 2006):

$$T_p = 0,7516 \cdot C_t (LL_c)^{0,3} \quad (4)$$

kjer je  $T_p$  čas zakasnitve [h],  $C_t$  brezdimenzijski koeficient porečja (1,8 – 2,2),  $L$  dolžina glavnega toka od iztočnega profila do razvodnice [km] in  $L_c$  dolžina glavnega toka od iztočnega profila do centrioda na vodotoku [km].  $C_t$  je empirični koeficient, ki predstavlja topografijo porečja, vendar nima fizikalne razlage (Brilly in Šraj, 2006).

## 2.6 Izdelava hidroloških modelov v programu HEC-HMS

Hidrološki modelski sistem HEC-HMS je zasnovan tako, da simulira zaključene hidrološke procese dendritičnih, z razvodnico določenih območij (HEC-HMS, 2014). Programska oprema vključuje številne hidrološke metode za izračun infiltracije padavin, hidrograma enote in propagacije valov ter vključuje tudi postopke, potrebne za stalno simulacijo, vključno z evapotranspiracijo, taljenjem snega in

zadrževanjem vlage v tleh. Za izdelavo hidroloških modelov obeh eksperimentalnih porečij v programu HEC-HMS smo uporabili podatke o lastnostih obeh porečij in merjene podatke o padavinah. Padavinske izgube smo ocenili po metodi SCS (parameter  $CN$ ), padavine pa smo pretvorili v površinski odtok s pomočjo sintetičnega hidrograma enote po metodi SCS (parameter  $T_p$ ). Parameter  $CN$  je vrednost, ki jo ocenimo kot funkcijo rabe zemljišča, vrste tal in predhodne namočenosti tal (Brilly in Šraj, 2006). Določimo ga s pomočjo preglednic (USACE, 2000).

Za umerjanje modela Lukanskega potoka smo uporabili merjene padavine in pretok za padavinski dogodek, ki se je zgodil v noči od 20. do 21. 5. 2010. Za validacijo modela smo uporabili tri neodvisne padavinske dogodke, ki so se zgodili od 15. do 16. 6. 2010, 13. 7. 2010 in od 7. do 9. 11. 2010. Za umerjanje modela Javorskega potoka smo uporabili merjene padavine in pretok za padavinski dogodek, ki se je zgodil 13. 7. 2010. Za validacijo modela smo uporabili tri padavinske dogodke, ki so se zgodili od 20. do 21. 5. 2010, od 15. do 16. 6. 2010 in od 7. do 9. 11. 2010. Pri validaciji obeh modelov smo uporabili umerjene vrednosti parametrov modela ( $CN$  in  $T_p$ ) tako, da so se izračunani hidrogrami čim bolj približali merjenim. Za oceno ujemanja merjenih in modeliranih odtokov smo izračunali koren srednjega kvadratnega pogreška (ang. Root mean square error, RMSE), ki poda ujemanje med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi modela (enačba 5) in se pogosto uporablja za oceno ujemanja modelov (Thompson, 1999):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (dQ_{izr} - dQ_{izm})^2}{n}}, \quad (5)$$

kjer je RMSE koren srednjega kvadratnega pogreška [ $m^3 s^{-1}$ ],  $dQ_{izr}$  izračunani pretok [ $m^3 s^{-1}$ ],  $dQ_{izm}$  izmerjeni pretok [ $m^3 s^{-1}$ ] in  $n$  število časovnih intervalov.

## 3. Rezultati

### 3.1 Prepuščene padavine

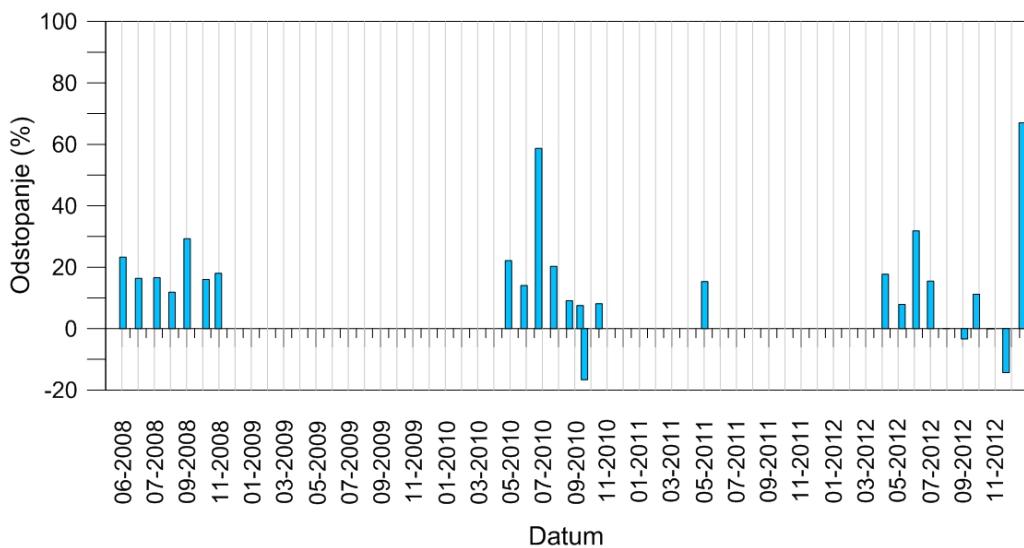
Za obe porečji ugotavljamo visoko stopnjo odvisnosti med padavinami na prostem in prepuščenimi padavinami, pri čemer je ujemanje nekoliko višje na ploskvah v porečju Javorskega potoka ( $R^2 = 0,78$ ) kot na ploskvah v porečju Lukanskega potoka ( $R^2 = 0,77$ ). Delež prepuščenih mesečnih padavin glede na padavine na prostem je bil višji na ploskvah v porečju Javorskega potoka in je znašal od 92 do 94 %. V porečju Lukanskega potoka je ta delež znašal od 78 do 89 % (slika 5).

Najvišja mesečna količina prepuščenih padavin je bila izmerjena v juliju 2009 na ploskvah v porečju Javorskega potoka, in sicer 282 mm. Na ploskvah v porečju Lukanskega potoka meritev v tem obdobju nismo izvajali, pač pa je bila najvišja

mesečna količina prepuščenih padavin izmerjena v juniju 2008, in sicer 223 mm.

### 3.2 Pretoki

Merjeni pretoki so bili večji na Javorskem potoku v primerjavi z Lukanskim potokom (slika 6). Povprečni merjeni pretok je bil na Javorskem potoku  $9,7 \text{ ls}^{-1}$  in na Lukanskem potoku  $7,1 \text{ ls}^{-1}$ . Omeniti moramo, da so se v obdobjih, ko so bili na Javorskem potoku zabeleženi manjši pretoki, vedno pojavile določene nepravilnosti na merilnih napravah, predvsem zmrzovanje vode pozimi in mašenje merilne naprave z listjem ter vejami. Največji zabeleženi pretok na obeh potokih je bil  $173 \text{ ls}^{-1}$ , zgodil pa se je septembra 2010, ko so bile v tem delu Slovenije velike poplave (ARSO, 2010).



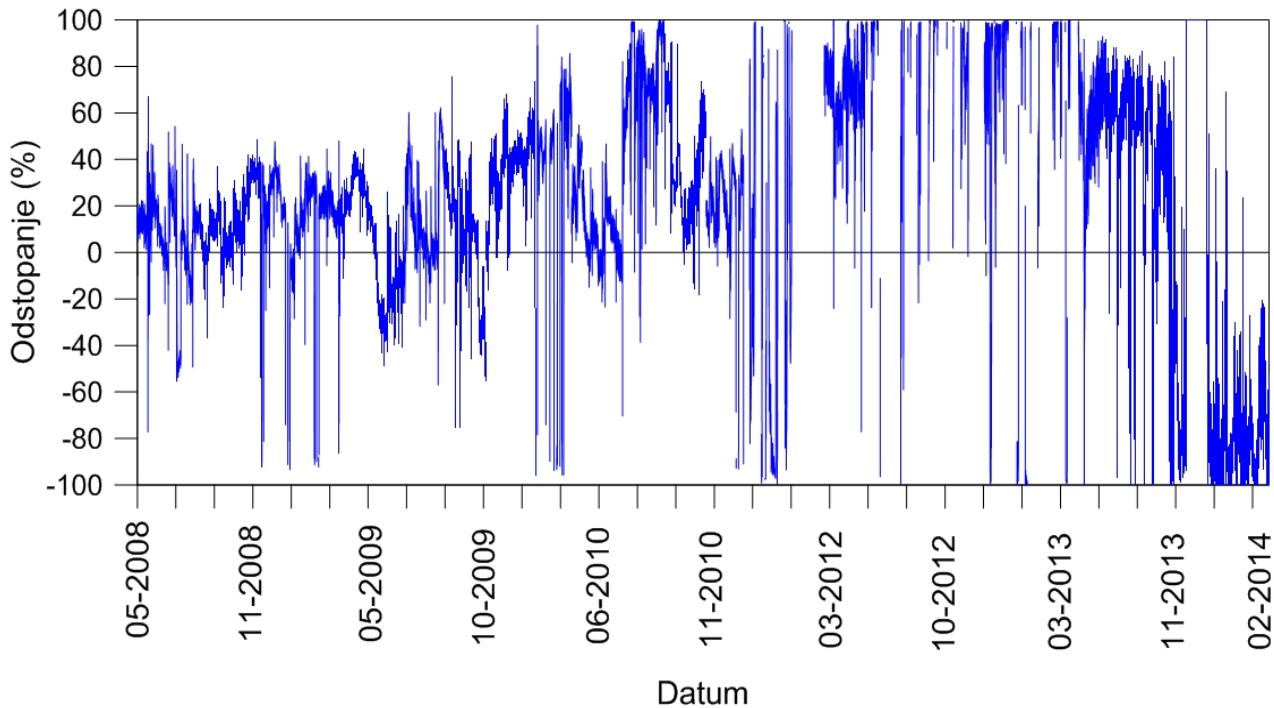
*Slika 5: Odstopanje prepuščenih padavin na ploskvah v porečju Javorskega potoka v primerjavi s ploskvami v porečju Lukanskega potoka od 3. 6. 2008 do 27. 12. 2012.*

*Figure 5: Differences in measured throughfall in experimental watershed Javorski potok compared to Lukanski potok from 3. 6. 2008 to 27. 12. 2012.*

**Preglednica 2:** Čas koncentracije ( $T_c$ ) in čas zakasnitve ( $T_p$ ) za porečji Javorskega potoka in Lukanskega potoka v zgornjem porečju Oplotnice na Pohorju.

**Table 2:** Time of concentration ( $T_c$ ) and time to peak ( $T_p$ ) in experimental watersheds Javorski potok and Lukanski potok of the Upper Oplotnica River in Pohorje.

Porečje	Padavinski dogodek	Trajanje [h]	Padavine [mm]	$T_c$ [min]	$T_p$ [min]
Lukanjski potok	20. do 21. 5. 2010	3,5	9,4	120	85
	16. 6. 2010	5,0	20,6	130	80
	15. 7. 2010	3,0	4,2	70	60
	ocena iz meritev			110	80
Javorski potok	20. do 21. 5. 2010	3,5	9,4	120	90
	16. 6. 2010	5,0	20,6	180	125
	15. 7. 2010	2,0	6,0	210	125
	ocena iz meritev			200	125



**Slika 6:** Odstopanje pretokov v porečju Javorskega potoka v primerjavi s porečjem Lukanskega potoka v obdobju od 21. 5. 2008 do 24. 2. 2014.

**Figure 6:** Differences in runoff from experimental watershed Javorski potok compared to Lukanski potok in the period from 21. 5. 2008 to 24. 2. 2014.

**Preglednica 3:** Izračun časa koncentracije ( $T_c$ ) z enačbo Kerby-Hatheway za porečji Lukanskega potoka in Javorskega potoka v zgornjem porečju Oplotnice na Pohorju.

**Table 3:** Time of concentration ( $T_c$ ), calculated with Kerby-Hatheway equation in Javorski potok and Lukanski potok experimental watersheds of the Upper Oplotnica River in Pohorje.

Porečje	Dolžina toka $L$ [m]	Padec toka $S$ [%]	Kerby-ev parameter hrapavosti $N$ [-]	$T_c$ [min]
Lukanjski potok	650	0,040	0,8	72
Javorski potok	610	0,055	0,8	72

### 3.3 Čas koncentracije in čas zakasnitve

Na podlagi analize merjenih hidrogramov treh neodvisnih padavinskih dogodkov smo za porečje Lukanskega potoka ocenili čas koncentracije ( $T_c$ ) 110 minut in čas zakasnitve ( $T_p$ ) 80 minut ter za porečje Javorskega potoka  $T_c$  200 minut in  $T_p$  125 minut (preglednica 2).

$T_c$ , izračunan s Kerby-Hathewayeve enačbo, je bil za obe porečji 72 minut (preglednica 3) in precej nižji od ocen na podlagi merjenih vrednosti.  $T_p$ , izračunan s Snyderjevo enačbo, je znašal za porečje Lukanskega potoka 66 minut in porečje

Javorskega potoka 60 minut (preglednica 4), torej precej manj od ocen na podlagi meritev. Pri modeliranju smo upoštevali ocenjene čase na podlagi meritev, ki pri primerjavi padavinskih dogodkov podajajo bolj realne vrednosti in so zato primernejši.

### 3.4 Rezultati hidroloških modelov, izdelanih s programom HEC-HMS

Na podlagi umerjanja (sliki 7 in 8) in validacije modelov v programu HEC-HMS (preglednica 5) smo za porečje Lukanskega potoka določili  $T_p$  80

minut in vrednost koeficenta  $CN$  73 ter za porečje Javorskega potoka  $T_p$  105 minut in koeficient  $CN$  74.

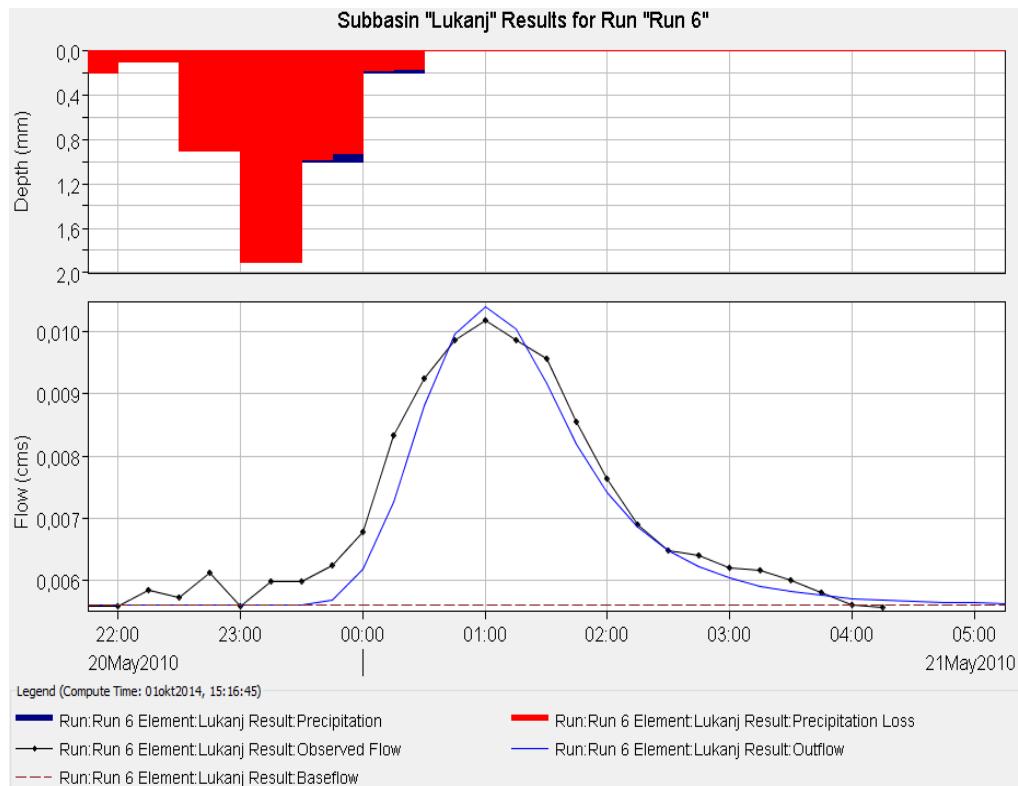
**Preglednica 4:** Izračun časa zakasnitve ( $T_p$ ) z enačbo Snyder za porečji Lukanskega in Javorskega potoka v zgornjem porečju Oplotnice na Pohorju.

**Table 4:** Time to peak ( $T_p$ ), calculated with Snyder equation in Javorski potok and Lukanski potok experimental watersheds of the Upper Oplotnica River in Pohorje.

Porečje	Dolžina glavnega toka $L$ [km]	Dolžina glavnega toka do centroida $L_c$ [km]	Koeficent porečja $C_t$	$T_p$ [min]
Lukanjski potok	0,50	0,65	2,0	66
Javorski potok	0,46	0,61	2,0	60

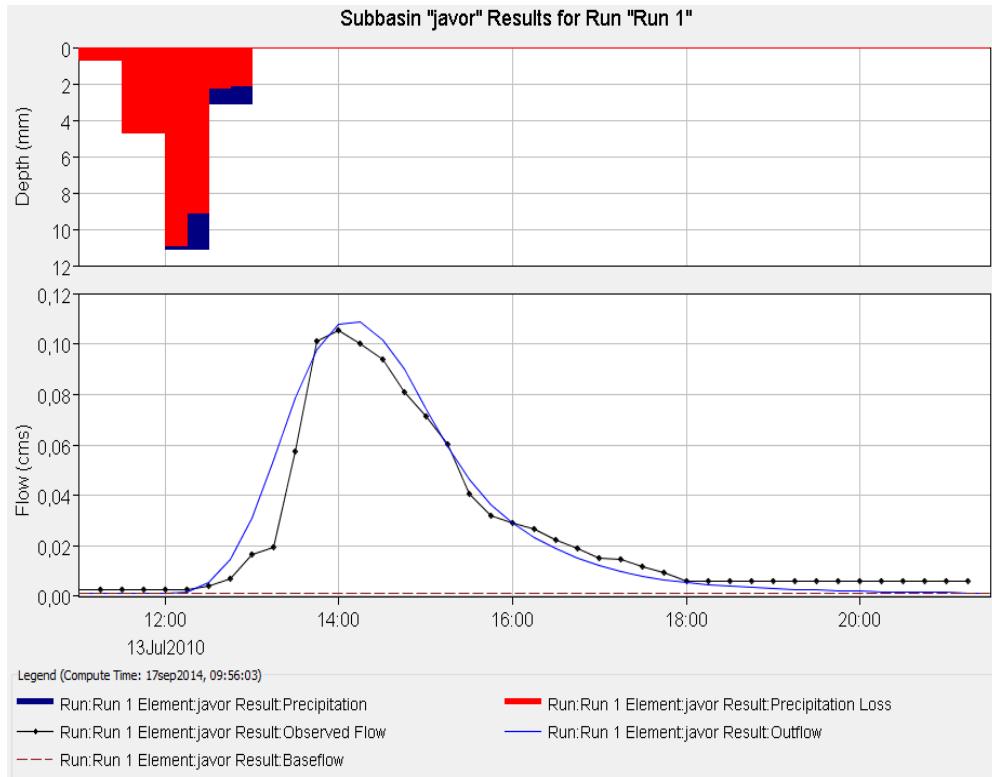
Izračunane vrednosti RMSE za merjene in modelirane odtoke znašajo za porečje Lukanskega potoka od  $0,001 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  do  $0,017 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  ter za porečje Javorskega potoka od  $0,0002 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  do  $0,047 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  (preglednica 6). RMSE vrednosti so zelo nizke, kar kaže na dobro ujemanje modeliranih in merjenih pretokov in pomeni, da sta oba modela dobro umerjena in dajeta sprejemljive rezultate. Model za porečje Javorskega potoka v splošnem daje nekoliko slabše rezultate od modela za porečje Lukanskega potoka. Modelirani  $Q_{\max}$  najbolj odstopa od merjenega za padavinski dogodek od 7. do 9. 11. 2010, kar je verjetno posledica odpadanja listja bukve v novembru.

Celotne padavinske izgube oziroma evapotranspiracija v obravnavanih padavinskih dogodkih so bile v porečju Lukanskega potoka 95 % in v porečju Javorskega potoka 92 %. Razlika v padavinskih izgubah med porečjema je razmeroma majhna (3 %) in je verjetno posledica razlik v količini padavin ter razlik v sestojni zgradbi gozda.



**Slika 7:** Umerjeni model porečja Lukanskega potoka za padavinski dogodek od 20. do 21. 5. 2010.

**Figure 7:** Calibrated model of Lukanski potok catchment for precipitation event from 20. to 21. 5. 2010.



*Slika 8:* Umerjeni model porečja Javorskega potoka za padavinski dogodek 13. 7. 2009.

*Figure 8:* Calibrated model of Javorski potok catchment for precipitation event 13. 7. 2009.

**Preglednica 5:** Vhodni podatki za hidrološka modela v programu HEC–HMS za porečji Lukanjskega potoka in Javorskega potoka v zgornjem porečju Oplotnice na Pohorju.

**Table 5:** Input parameters for models in HEC-HMS program for Javorski potok and Lukanjski potok experimental watersheds of the Upper Oplotnica River in Pohorje.

Porečje	Postopek	Datum	Trajanje dogodka [h]	P [mm]	CN [/]	$T_p$ [min]
Lukanjski potok	Umerjanje	20. do 21. 5. 2010	3,5	9,4	73	80
	Validacija	15. do 16. 6. 2010	15,5	7,0	73	80
		13. 7. 2010	11,0	20,0	73	80
		7. do 9. 11. 2010	30,0	30,0	73	80
Javorski potok	Umerjanje	13. 7. 2010	11,0	20,0	74	105
	Validacija	20. do 21. 5. 2010	8,5	9,4	74	105
		15. do 16. 6. 2010	22,0	35,0	74	105
		7. do 9. 11. 2010	30	30	74	105

#### 4. Razprava

Odtok s porečja je pomemben kazalnik hidrološke funkcije gozdov, saj odraža zadrževalno sposobnost gozda za padavine. V naši raziskavi ugotavljamo, da struktura gozda (drevesna sestava, starost, premer, višina, idr.) vpliva na prestrezanje padavin in na površinski odtok z dveh manjših

eksperimentalnih porečij v porečju zgornje Oplotnice na Pohorju.

Obranavani eksperimentalni porečji sta enako veliki in imata podobno obliko, rastiščne razmere in talne lastnosti, le porečje Lukanjskega potoka ima padec nekoliko večji od tistega v porečju Javorskega potoka. V obeh porečjih prevladuje

navadna smreka na rastiščih prvotnih kisloljubnih, visokogorskih bukovij, pri čemer je v porečju Lukanjskega potoka delež smreke v lesni zalogi 10 % nižji in delež bukve 10 % višji kot v porečju Javorskega potoka.

Izmerjeni in modelirani pretoki so bili v porečju Lukanjskega potoka nižji kot v porečju Javorskega potoka. Razlike v pretokih lahko deloma razložimo z večjim deležem prepuščenih padavin v porečju Javorskega potoka, ki so verjetno posledica večje količine padavin zaradi orografskih dejavnikov (relief, naklon, eksponicija) in vetra, ki pomembno vplivajo na razporeditev padavin (Frantar, 2008) v masivu Pohorja, kljub majhni zračni razdalji med porečjem in podobni nadmorski višini. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi Šraj et al. (2008)

**Preglednica 6:** Rezultati validacije hidroloških modelov za porečji Lukanjskega in Javorskega potoka v zgornjem porečju Oplotnice na Pohorju.  $P$  so padavine,  $P_{iz}$  so izračunane padavine,  $P_{ef}$  so efektivne padavine,  $Q_{max}$  je maksimalni pretok oziroma konica vala,  $T_{konica}$  je čas konice vala,  $V_{vala}$  je skupna količina odteklih vod in RMSE je srednji kvadratni pogrešek.

**Table 6:** Results of hydrological model validation for experimental watersheds Javorski potok and Lukanjski potok of the Upper Oplotnica River in Pohorje.  $P$  is precipitation,  $P_{iz}$  is calculated precipitation,  $P_{ef}$  is effective precipitation,  $Q_{max}$  is maximal runoff,  $T_{konica}$  is time of peak,  $V_{vala}$  is total volume of runoff and RMSE is root mean square error.

Porečje	Datum	Postopek	$P$ [mm]	$P_{iz}$ [mm]	$P_{iz}$ [%]	$P_{ef}$ [mm]	$Q_{max}$ [ $m^3 s^{-1}$ ]	$T_{konica}$	$V_{vala}$ [ $m^3$ ]
Lukanjski potok	20. do 21. 5. 2010	Meritev	8,4				0,010	21. 5. 2010 01:00	70
		Izračun		8,3	98	0,1	0,010	21. 5. 2010 01:00	100
		RMSE					0,001		
	31. 5. 2010	Meritev	13,8				0,023	13. 5. 2010 10:00	280
		Izračun		13,2	95	0,7	0,022	13. 5. 2010 10:01	300
		RMSE					0,003		
	13. 7. 2010	Meritev	39,2				0,119	13. 7. 2010 13:30	710
		Izračun		35,6	91	3,6	0,131	13. 7. 2010 13:30	800
		RMSE					0,044		
	7. do 9. 11. 2010	Meritev	32,0				0,043	8. 11. 2010 16:00	930
		Izračun		30,4	95	1,6	0,042	8. 11. 2010 16:01	1000
		RMSE					0,017		
Javorski potok	20. do 21. 5. 2010	Meritev	8,4				0,016	21. 5. 2010 01:45	80
		Izračun		8,2	97	0,3	0,015	21. 5. 2010 01:30	100
		RMSE					0,000		
	15. do 16. 6. 2010	Meritev	34,8				0,040	16. 6. 2010 8:15	687
		Izračun		33,1	95	1,7	0,040	16. 6. 2010 8:00	800
		RMSE					0,019		
	13. 7. 2010	Meritev	39,2				0,110	13. 7. 2010 14:00	1015
		Izračun		35,1	90	4,1	0,114	13. 7. 2010 14:00	1000
		RMSE					0,005		
	7. do 9. 11. 2010	Meritev	32,0				0,080	8. 11. 2010 16:00	1457
		Izračun		28,0	87	4,0	0,080	8. 11. 2010 16:15	1500
		RMSE					0,047		

Padavinske izgube oziroma evapotranspiracija so v porečju Lukanskega potoka predstavlja 95 % in v porečju Javorskega potoka 92 % padavin. Vrednosti so podobne kot v subalpskem smrekovem gozdu na Qinghai-Tibetanski planoti (417 mm oziroma 97,4 % letnih padavin) (Gaofeng et al., 2014) ter višje kot v gozdu smreke na Aljaski (*Picea mariana* (Mill.)) 207 mm oziroma 85,8 % letnih padavin (Nakai et al., 2013).

Modeliranje majhnih porečij je precej zahtevno, saj intenzivnost in trajanje padavin v takih primerih še posebej vplivata na hidrogram odtoka in model pogosto prikaže nekoliko drugačne rezultate kot meritev (Kestnar, 2012). Pri določanju časa koncentracije ( $T_c$ ) in časa zakasnitve ( $T_p$ ) smo uporabili merjene padavine in pretoke ter izrise hidrograma, saj empirične enačbe niso dale primernih ocen. Na podlagi rezultatov namreč ugotovljamo, da Kerby-Hathewayjeva enačba za izračun  $T_c$  in Snyderjeva enačba za izračun  $T_p$  ne vključujejo zadostnega števila primernih parametrov, s katerimi bi lahko opisali posebnosti razmeroma majhnih gozdnatih porečij. Pri izdelavi hidroloških modelov v programu HEC-HMS smo ugotovili, da model ne zmore v celoti upoštevati vpliva gozda na vodni krog. Gozd kot raba zemljišča je upoštevan le delno v koeficientu  $CN$ , medtem ko transpiracija, prestrezanje padavin, odtok po deblu ipd. v modelu niso posebej upoštevani.

Kljub omejitvam modela smo ugotovili visoko stopnjo ujemanja med merjenimi in modeliranimi odtoki v vegetacijskem obdobju, iz česar sklepamo, da oba modela dajeta sprejemljive rezultate. Model za porečje Javorskega potoka v splošnem daje nekoliko slabše rezultate od modela za porečje Lukanskega potoka, predvsem za padavinski dogodek v novembru, ko se vegetacijsko obdobje za bukev konča in ni več olistana (Vilhar et al., 2013). Za natančnejšo oceno primernosti modelov bi lahko uporabili več padavinskih dogodkov, tako v času olistanja bukve kot v obdobju, ko bukev ni več olistana. Oba modela lahko sedaj uporabimo za nadaljnje napovedovanje pretokov v obravnavanih porečjih, vendar predvsem v vegetacijskem obdobju.

Vzpostavitev gozdnatih eksperimentalnih porečij in spremljanje dolgoročnih učinkov gozdnogospodarskih ukrepov na njihovo hidrologijo je pomembno za razvoj gozdne hidrologije. Tovrstne raziskave lahko pomembno doprinesejo k oblikovanju hidrološko usmerjenih gozdnogojitvenih ukrepov na ravni gozdnatih porečij z namenom izboljšanja hidrološke funkcije gozdov (Zakon o gozdovih, 1993, 1998, 2007, 2010; Pravilnik o gozdnogospodarskih in gozdnogojitvenih načrtih, 1998; Zakon o spremembah in dopolnitvah zakona o gozdovih, 2002), kot tudi z vidika doseganja dobrega ekološkega stanja na vseh vodnih telesih, kot del celostnega urejanja povodij, ki ga narekuje »Vodna direktiva« (Direktiva 2000 / 60 / EC Evropskega parlamenta in Sveta o določitvi okvirja za ukrepanje Skupnosti na področju politike do voda, 2000) ter Zakon o vodah z dopolnitvami (Zakon o vodah, 2002, 2008, 2012; Zakon o spremembah in dopolnitvah zakona o vodah, 2008).

## Zahvala

Raziskava je nastala v okviru magistrske naloge Klemna Kestnarja »Vpliv gozda na odtoke z dveh eksperimentalnih porečij na Pohorju«, UL FGG, Oddelek za Okoljsko gradbeništvo. Eksperimentalni porečji sta bili vzpostavljeni v okviru Podoktorskega raziskovalnega projekta »Ohranjanje kakovosti in količine vodnih virov v gozdnem prostoru«, meritve pa so potekale v okviru CRP Konkurenčnost Slovenije 2006-2013: Ohranjanje kakovosti vodnih virov v gozdnem prostoru; Javne gozdarske službe: Usmerjanje in strokovno vodenje spremljanja stanja razvrednotenja in poškodovanosti gozdov (RPG), Sklop 1.2: Raziskave gozdnih rastišč in njihovega razvrednotenja kot podlage za načrtovanje in gospodarjenje z gozdovi ter Sklop 1.3: Intenzivno spremljanje vpliva onesnaženosti zraka na gozdove v skladu s Pravilnikom o varstvu gozdov in Konvencije UNECE CLRTAP, financirane s strani Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano; ter Programske skupine za gozdro biologijo, ekologijo in tehnologijo, financirane s strani

Ministrstva za izobraževanje, znanost in šport Slovenije.

Za pomoč pri izboru eksperimentalnih porečij se zahvaljujemo Primožu Simončiču z Gozdarskega inštituta Slovenije ter sodelavcem Zavoda za gozdove Slovenije Igorju Aheju, mag. Andreju Breznikarju, mag. Matjažu Zupaniču; Krajevna enota Slovenska Bistrica, Območna enota Maribor. Za pomoč pri terenskem delu in meritvah se zahvaljujemo sodelavcem Gozdarskega inštituta Slovenije Tini Brišnik, Andreju Verliču, Izotku Sinjurju, Samu Grbecu, Mitji Ferlanu, ter za laboratorijske analize Magdi Špenko, Nataliji Senčar in Danielu Žlindri.

## Viri

Arhiv Zavoda za gozdove Slovenije (ZGS)

ARSO (2010). Hidrološko poročilo o povodnji v dneh od 17. do 21. septembra 2010. Ljubljana, MOP ARSO, 18 p. (in Slovenian).

Berger, T.W., Inselsbacher, E., Mutsch, F., Pfeffer, M. (2009). Nutrient cycling and soil leaching in eighteen pure and mixed stands of beech (*Fagus sylvatica*) and spruce (*Picea abies*), *Forest Ecology and Management* **258**, 2578–2592.

Bezak, N., Šraj, M., Rusjan, S., Kogoj, M., Vidmar, A., Sečnik, M., Brilly, M., Mikoš, M. (2013). Primerjava dveh sosednjih eksperimentalnih hudourniških porečij: Kuzlovec in Mačkov graben (Comparison between two adjacent experimental torrential watersheds: Kuzlovec and Mačkov graben), *Acta hydrotechnica* **26**, 85–97 (in Slovenian).

Breznikar, A., Mlinšek, G., Cehner, M., Grečs, Z., Čater, M. (2006). "Strategije sanacije antropogenih smrekovih sestojev na Pohorju". In Simončič P. et al., Eds., *Splošne ekološke in gozdnogojitvene osnove za podsadnjo bukve (*Fagus sylvatica* L.) v antropogenih smrekovih sestojih* (General ecological and silvicultural basis of the planting of beech (*Fagus sylvatica* L.) in anthropogenic spruce stands, Ljubljana, *Silva Slovenica*, Gozdarski Inštitut Slovenije, 143–153 (in Slovenian).

Brilly, M., Šraj M. (2006). Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC- HMS, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 172 p. (in Slovenian).

Brouwer, C., Goffeau, A., Heibloem, M. (1985). Irrigation Water Management: Training Manual No. 1 – Introduction to Irrigation. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 152 p.

Clarke, N., Žlindra, D., Ulrich, E., Mosello, R., Derome J. et al. (2010). "Sampling and Analysis of Deposition. Manual Part XIV". In Eds., Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Hamburg, United Nations Economic Commission for Europe Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, ICP Forests, 66.

Cehner, M. (2002). Gozdnogospodarski podatki o raziskovalni ploskvi Brička - projekt SUSTMAN. Mislinja, Zavod za gozdove Slovenije, Območna enota Slovenj Gradec, Krajevna Enota Mislinja: 1 p. (in Slovenian).

Diaci, J. (2006). "Ekološke osnove in gozdnogojitveni ukrepi pri vnosu bukve v antropogene smrekove sestoste na Pohorju". In Simončič P. et al., Eds., *Splošne ekološke in gozdnogojitvene osnove za podsadnjo bukve (*Fagus sylvatica* L.) v antropogenih smrekovih sestojih*. Ljubljana, *Silva Slovenica*, Gozdarski Inštitut Slovenije, 56–67 (in Slovenian).

Direktiva EC Evropskega parlamenta in Sveta o določitvi okvirja za ukrepanje Skupnosti na področju politike do voda (2000). 2000 / 60 / EC.

Frantar, P. (2008). Vodna bilanca Slovenije 1971–2000. Ljubljana, MOP ARSO, 119 p.

Gamfeldt, L., Snall, T., Bagchi, R., Jonsson, M., Gustafsson, L. et al. (2013). Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species, *Nat Commun* **4**, 1340.

Gaofeng, Z., Ling, L., Yonghong, S., Xufeng, W., Xia, C. et al. (2014). Energy flux partitioning and evapotranspiration in a sub-alpine spruce forest ecosystem, *Hydrological Processes* **28**, 5093–5104.

Kermavnar, J. (2015). Sestojne padavine v izbranih urbanih gozdovih Ljubljane (Stand precipitation in selected urban forests in the city of Ljubljana). Magistrsko delo (Master of science thesis), Univerza v Ljubljani, 103 p. (in Slovenian)

Kestnar, K. (2012). Določanje največjih pretokov na nemerjenih porečjih. Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, 63 p. (in Slovenian)

Kestnar, K. (2015). Vpliv gozda na odtoke z dveh eksperimentalnih porečij na Pohorju (The influence of

forest on the runoff from two experimental basins on Pohorje), Magistrsko delo (Master of science thesis), Univerza v Ljubljani, 81 p. (in Slovenian)

Kutnar, L., Vilhar, U., Urbančič, M., Cojzer, M., Kobal, M. et al. (2013). Vegetacijske, talne in hidrološke razmere ter spremeljanje stanja gozdov v GGE Osankarica na Pohorju. Pohorje, Zavod za gozdove, Območna enota Maribor, Gozdarski inštitut Slovenije, 65. (in Slovenian)

Kutnar, L., Zupančič, M., Robič, D., Zupančič, N., Žitnik, S. et al. (2002). Razmejitev provenienčnih območij gozdnih drevesnih vrst v Sloveniji na osnovi ekoloških regij. *Zbornik gozdarstva in lesarstva* **67**, 73–117 (in Slovenian).

Máliš, F., Vladovič, J., Čaboun, V., Vodálová, A. (2010). The influence of *Picea abies* on herb vegetation in forest plant communities of the Veporské vrchy Mts. *Journal of Forest Science* **56**, 58–67.

Nakai, T., Kim, Y., Busey, R.C., Suzuki, R., Nagai, S. et al. (2013). Characteristics of evapotranspiration from a permafrost black spruce forest in interior Alaska. *Polar Science* **7**, 136–148.

Ovington, J.D. (1954): A comparation of rainfall in different woodlands, *Forestry London* **27**, 41–53.

Perko, D. (1998). Slovenija - pokrajine in ljudje. Ljubljana, Mladinska knjiga, 735 p. (in Slovenian)

Pravilnik o gozdnogospodarskih in gozdnogojitvenih načrtih. (1998). Uradni list RS, št. 5/1998 (in Slovenian).

Rothe, A., Huber, C., Kreutzer, K., Weis, W. (2002). Deposition and soil leaching in stands of Norway spruce and European Beech: Results from the Höglwald research in comparison with other European case studies, *Plant and Soil* **240**, 33–45.

Siegert, C.M., Levia, D.F., Hudson, S.A., Dowtin, A.L., Zhang, F. et al. (2016). Small-scale topographic variability influences tree species distribution and canopy throughfall partitioning in a temperate deciduous forest, *Forest Ecology and Management* **359**, 109–117.

Simončič, P., Čater, M., Breznikar, A., Zupanič, M. (2005). Ekološke in gozdnogojitvene osnove za podsadnjo bukve v antropogenih smrekovih sestojih: zgoščena informacija o rezultatih raziskovalne naloge "Vnašanje listavcev za trajnostno gospodarjenje z gozdovi - SUSTMAN", *Gozdarski vestnik* **63**, 365–372 (in Slovenian).

Sinjur, I., Ferlan, M., Simončič, P., Vilhar, U. (2010). Mreža meteoroloških postaj Gozdarskega inštituta Slovenije (The Meteorological Stations Net of the Forestry Institute of Slovenia), *Gozdarski vestnik* **68**, 41–46 (in Slovenian).

Šraj, M. (2003). Modeliranje in merjenje prestreženih padavin. Unpublished Doctoral Thesis, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 142 p. (in Slovenian).

Šraj, M. (2009). Prestrežene padavine: Meritve in analiza, *Geografski vestnik* **81**, 99–111 (in Slovenian).

Šraj, M., Brilly, M., Mikoš, M. (2008). Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**, 121–134.

Thompson, S.A. (1999). Hydrology for water management. Rotterdam, Balkema, 476 p.

USDI (2001). Water measurement manual. U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. Washington, 317 p.

Urbančič, M., Kutnar, L. (2006). "Site conditions of the Brička plot and comparison with other SUSTMAN plots". In Simončič P. et al. , Eds., *Splošne ekološke in gozdnogojitvene osnove za podsadnjo bukve (*Fagus sylvatica* L.) v antropogenih smrekovih sestojih*, Ljubljana, Silva Slovenica, Gozdarski inštitut Slovenije, 68–85.

USACE (2000). HEC-HMS Hydrologic Modeling System. Technical reference manual. US Army Corps of Engineers, Davis, 155 p.

Vilhar, U. (2009). Vpliv gospodarjenja na vodno bilanco jelovo-bukovih gozdov Dinarskega kraša (Influence of management on water balance of the silver fir-beech forests in the dinaric karst). *Studia forestalia Slovenica* 133. Gozdarski inštitut Slovenije, Ljubljana: 122 p.

Vilhar, U. (2016). Sestojne padavine v mešanih sestojih smrek in bukve na Pohorju (Throughfall in mixed beech-spruce forest in the Pohorje mountains), *Gozdarski vestnik* **74**, 28–45.

Vilhar, U., Fajon, Š. (2007). "Vpliv gozda in gozdnogojitvenih ukrepov na hidrološki režim vodozbirnega območja". In Kovač M., Eds., *Gozd in voda: rezultati projekta [Interreg III A]*. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije, Zavod za gozdove Slovenije, 16–21 (in Slovenian).

Vilhar, U., Kutnar, L., Urbančič, M., Simončič, P. (2016). Mikrorastiščne razmere kot pomemben dejavnik premene smrekovih monokultur na bukovih rastiščih (Microsite conditions as a major factor in the conversion of spruce monocultures on beech sites). *Gozdarski vestnik* (in print).

Vilhar, U., Skudnik, M., Ferlan, M., Simončič, P. (2014). Influence of meteorological conditions and crown defoliation on tree phenology in intensive forest monitoring plots in Slovenia (Vpliv vremenskih spremenljivk in osutosti krošenj na fenološke faze dreves na ploskvah intenzivnega monitoringa gozdnih ekosistemov v Sloveniji), *Acta Silvae et Ligni* **105**, 1–15.

Vilhar, U., Skudnik, M., Simončič, P. (2013). Fenološke faze dreves na ploskvah Intenzivnega monitoringa gozdov v Sloveniji (Phenological phases of trees on the Intensive monitoring plots in Slovenia), *Acta Silvae et Ligni* **100**, 5–17.

Wahl, N.A., Wöllecke, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (2005). Can forest transformation help reducing floods in forested watersheds? Certain aspects on soil hydraulics and organic matter properties, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **30**, 611–621.

Zabret, K. (2013). Vpliv značilnosti drevesnih vrst na prestrezanje padavin (The influence of tree characteristics on rainfall interception), *Acta hydrotechnica* **26**, 99–116 (in Slovenian).

Zakon o gozdovih (1993, 1998, 2007, 2010). Uradni list RS, št. 30/1993, 13/1998, 67/2002, 115/2006, 110/2007, 106/2010.

Zakon o vodah (2002, 2008, 2012). Uradni list RS, št. 67/2002, 57/2008, 57/2012.