

METODE**PRESTREŽENE PADAVINE: MERITVE IN ANALIZA**

AVTORICA

dr. Mojca Šraj

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Jamova cesta 2, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija
mojca.sraj@fgg.uni-lj.si

UDK: 556.12:556.5

COBISS: 1.01

IZVLEČEK

Prestrežene padavine: meritve in analiza

Gozdovi pomembno vplivajo na vodni režim. Številne raziskave po svetu kažejo, da sečnja gozdov povečuje odtok površinske vode, zaraščanje pa zmanjšuje minimalni in maksimalni odtok. Prestrežene padavine so ena od glavnih sestavin vodne bilance poraščenih površin, zato je merjenje prestreženih padavin v zadnjih desetletjih vse bolj pomembno. V prispevku so prikazane metode merjenja posameznih sestavin gozdnega hidrološkega kroga in načini modeliranja prestreženih padavin.

KLJUČNE BESEDE

hidrologija, meteorologija, padavine, prestrežene padavine, prepuščene padavine, odtok po deblu, indeks listne površine, površinski odtok

ABSTRACT

Intercepted precipitation: measurements and analysis

Forests exert a major influence on water regime. Many studies worldwide have shown that forest harvesting causes an increase of surface water runoff and on the other hand, regrowth results in a reduction of minimum and maximum runoff. Interception is one of the major components of the water balance of overgrown areas so measurement of individual components of the forest hydrological cycle developed extensively in the last decades. This paper shows methods of measurement of individual components of forest hydrological cycle and methods of modeling of intercepted precipitation.

KEY WORDS

hydrology, meteorology, precipitation, intercepted precipitation, throughfall, stemflow, leaf area index, stormflow

Uredništvo je prispevek prejelo 16. marca 2009.

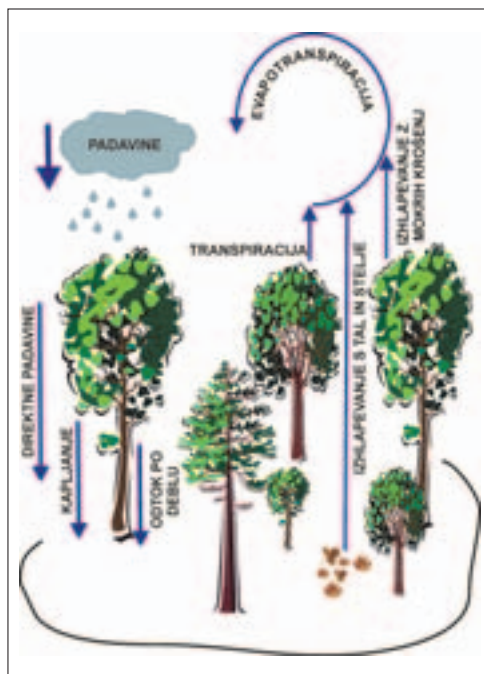
1 Uvod

Hidrologija je veda, ki preučuje kroženje vode v naravi, njene pojavne oblike, razporeditev na Zemlji, njeno gibanje ter fizikalne in kemične lastnosti (Chow 1964; Brilly in Šraj 2005). Hidrologija gozda preučuje kroženje vode na površinah, poraščenih z gozdom. Preučuje poti in načine prehajanja vode iz atmosfere skozi gozdni ekosistem v tla, podtalnico in površinske vode ter vračanje vode nazaj v ozračje (Smolej 1988).

Padavine so glavni vir vode gozdnega hidrološkega kroga (slika 1). Večinoma gre za dež ali sneg, v obmorskih in gorskih gozdnih predelih pa je pomembna tudi megla. Ponavadi velik del padavin, padlih nad gozdom, prestrežejo drevesne krošnje, manjši del pa jih pade skozi odprtine med krošnjami in listi naravnost na tla. Količina prestreženih padavin je odvisna od vegetacijskih in meteoroloških parametrov (Smolej 1988; Šraj 2003a):

- kapacitete krošnje, ki je odvisna od vrste, velikosti, oblike in starosti rastja, površine in usmerjenosti listov (iglaste vrste dreves prestrežajo od 20 do 40 %, listnate pa od 20 do 25 % padavin),
- gostote vegetacije (z večjo gostoto dreves narašča delež prestreženih padavin),
- intenzitete, trajanja in pogostosti padavin (manjša intenziteta ali kratko trajanje omogočata večje izhlapevanje s krošenj, intenziteta izhlapevanja je največja na začetku nevihte, pogostejše padavine zmanjšujejo prestrežene padavine),
- vrste padavin (pri iglavih vodni ekvivalent prestreženih snežnih padavin presega količino prestreženih tekočih padavin, slika 2),
- klimatskih razmer (višja temperatura omogoča večje izhlapevanje, veter lahko znatno poveča izhlapevanje) in
- časovnega obdobja v letu (obdobje rasti, obdobje mirovanja rastja).

Ovington (1954) je ugotovil, da je delež prestreženih padavin od 6 do 93 %, saj je glede na zelo različne razmere možen zelo različen delež prestreženih padavin. Znatna količina padavin, ki jih prestreže



Slika 1: Gozdni hidrološki krog (Šraj 2003).



Slika 2: Primerjava pestreženih snežnih padavin iglavcev (levo bor) in listavcev (desno breza).

rašče, izhlapi nazaj v ozračje in jih imenujemo izhlapele prestrežene padavine E_i (angleško *interception loss*). Ko je skladiščna zmogljivost krošnje zapolnjena, del prestreženih padavin prikaplja s krošenj do tal, del padavin pa pade na tla neposredno skozi odprtine med krošnjami in listi. Oba dela merimo in obravnavamo skupaj kot prepuščene padavine T_f (angleško *throughfall*). Manjši del prestreženih padavin se steka z listov in vej po deblu do tal. Ta del imenujemo odtok po deblu S_f (angleško *stemflow*). Vsota prepuščenih padavin T_f in odtoka po deblu S_f je navadno bistveno manjša od količine padlih padavin, razen če je veliko megle (Bruijnzeel 2000).

Če je količina vode, ki doseže tla $T_f + S_f = P_e$ (angleško *net precipitation* 'neto padavine'), večja od infiltracijske kapacitete tal, le-ta odteče kot površinski odtok. Ker je v večini gozdov v Sloveniji prst z veliko infiltracijsko sposobnostjo, je ponavadi površinski odtok zanemarljiv, zato pa je infiltracija večja. Infiltrirana voda oblikuje talno vlago in podpovršinski odtok ter bogati zaloge podtalnice. Del infiltrirane vode se počasi in konstantno drenira proti najbližjemu vodotoku. Imenujemo jo osnovni tok vodotoka. V vlažnih podnebnih osnovni tok navadno doseže minimum poleti, v subtropskih razmerah pa se to zgodi v sušnem obdobju. Take pretoke imenujemo minimalni ali sušni pretoki.

Del infiltrirane vode porabi rastje in vrača v atmosfero skozi proces transpiracije E_t (slika 1). Tudi del prepuščenih padavin izhlapi nazaj v ozračje E_s , čeprav je npr. v gostih vlažnih gozdovih, kjer do tal prodre malo sončnega sevanja, ta del skoraj zanemarljiv. Če k temu prištejemo še znatno izhlapevanje prestreženih padavin z mokrih krošenj E_i (slika 1), dobimo celotno evapotranspiracijo ET . Pomembno je, da ločimo procesa transpiracije E_t in izhlapevanja prestreženih padavin z mokrih krošenj E_i , saj je prvi odvisen od stomatalne kontrole vegetacije, drugi pa od aerodinamičnih lastnosti vegetacije (Bruijnzeel 2000). Glavno komponento celotne evapotranspiracije v gozdu ponavadi predstavlja prav izhlapevanje prestreženih padavin z mokrih krošenj E_i .

Medsebojni odnos glavnih komponent hidrološkega kroga predstavlja enačba vodne bilance $P = ET + Pe + \Delta S + \Delta G$, kjer so s P označene padavine, ET predstavlja evapotranspiracijo, Pe efektivne ali neto padavine, ΔS je sprememba vlažnosti tal in ΔG sprememba zalog podtalne vode. Vse količine izražamo v mm. Zadnja dva člena, ΔS in ΔG , sta lahko pozitivna (bogatenje) ali negativna (izgube). Glede na letoletni hidrološki krog sta v povprečju za daljša časovna obdobja pogosto enaka 0 (Lee 1970). Takrat lahko enačbo za letno vodno bilanco zapišemo kot $P = ET + Pe$.

Če upoštevamo vse zgoraj povedano, lahko zapišemo poenostavljeno enačbo vodne bilance gozda kot $P = Ei + Tf + Sf$, kjer so P padavine, s Tf so označene prepuščene padavine, Sf predstavlja odtok po deblu, z Ei pa je označeno izhlapevanje prestreženih padavin z mokrih krošenj. Vse količine izrazimo v mm.

2 Metode merjenja

Merjenje in določanje posameznih komponent gozdnega hidrološkega kroga (Tf , Sf in Ei) je področje, ki ima v hidrologiji gozda največ pozornosti. Do pionirskega dela Rutterja in kolegov v 60-ih letih (Rutter in ostali 1971) ni bilo vidnega napredka v razumevanju in razlaganju teh procesov. Pred tem so prestrežene padavine določali na podlagi starosti in vrste dreves ali količine, intenzitete in trajanja dežja. Glavni prispevek Rutterja in njegovih sodelavcev k današnjemu razumevanju procesa prestrezanja padavin je bil premik od empiričnega pristopa (Horton 1919) k bolj eksplicitno fizikalnemu opisu procesa.

Ponavadi so rezultati prestreženih padavin izraženi v odnosu do količin dežja kot razmerje, odstotek ali v obliki različnih tipov regresijskih enačb. Merjenje posameznih komponent, predvsem deleža prepuščenih padavin Tf , zahteva strogo vzorčenje. V splošnem spremenljivost Tf narašča z gostoto dreves in je za listopadni gozd večja poleti kot pozimi in mnogo večja v tropskem deževnem gozdu kot na plantazah v zmernotoplem podnebjju. Delež padavin, ki odtečejo po deblu, je ponavadi majhen, a ne zanemarljiv, zlasti pri listavcih, ki odvajajo vodo po vejah do debla in po deblu do tal. To je eden od glavnih razlogov za razliko v evapotranspiraciji med iglavci in listavci.

2.1 Merjenje padavin na prostem oziroma nad drevesnimi krošnjami

Meritve padavin izvajamo z ombrografi z avtomatskim zapisovanjem meritev v odvisnosti od časa. Ponavadi vzporedno merimo padavine še z ombrometri z ročnim odčitavanjem za nadzor. Pri meritvah padavin na prostem moramo paziti, da je dežemer oddaljen od okoliških objektov 1 do 2 višini objekta. Ker ponavadi v gozdu takega prostora ni, moramo dežemer postaviti nad drevesne krošnje, kar lahko zaradi velike višine dreves zahteva dodaten napor (slika 3).

2.2 Merjenje prepuščenih padavin (Tf)

Merjenje prepuščenih padavin Tf je po mnenju mnogih znanstvenikov (Waterloo in ostali 1999; Bruijnzeel 2000) najboljša s kombinacijo stalnih (slika 4) in premičnih merilcev (slika 5). Stalni merilci imajo večjo zbirno površino in so ves čas merjenja na istem merilnem mestu, medtem ko imajo premični merilci ponavadi manjšo zbirno površino in se jim med meritvami redno menja merilno mesto. Stalni merilci so ponavadi opremljeni z avtomatskim merilcem količine vode (npr. volumetrični merilec, ombrograf) in avtomatskim zapisovanjem meritev v odvisnosti od časa. Premični merilci so navadno ombrometri z ročnim odčitavanjem meritev, ki jih po vsakem odčitavanju premaknemo na drugo mesto. S kombinacijo obeh vrst merilcev dobimo bolj reprezentativno vzorčenje. Z menjavanjem merilnih mest zajamemo tudi t. i. »drip points«, točke, kjer je Tf večji od padavin, ponavadi je to na robovih krošenj. Študij, kjer so uporabljeni tudi premični merilci ni veliko, zato je pri obravnavanju objavljenih rezultatov potrebna previdnost.



MOJCA ŠRAJ



MOJCA ŠRAJ

Slika 3: Merjenje padavin nad drevesnimi krošnjami.

2.3 Merjenje odtoka po deblu (*S_f*)

Delež padavin, ki odtečejo po deblu (*S_f*; angleško *stemflow*), je ponavadi majhen (nekaj odstotkov), a ne vedno zanemarljiv, zlasti pri listavcih, ki odvajajo vodo po vejah do debla in po deblu do tal. To je eden od poglobitvenih razlogov za razliko v evapotranspiraciji med iglavci in listavci. Odtok po deblu je



MOJCA ŠRAJ

Slika 4: Korito za merjenje prepuščenih padavin, opremljeno z volumetričnim merilcem pretokov (Unidata 6506G, 50 ml/zvrat) in avtomatskim zapisovalcem meritev (HOBO logger).



MOJCA ŠRAJ

Slika 5: Ombrometer za ročno merjenje prepuščenih padavin, ki ga po vsakem odčitavanju premaknemo na drugo mesto.



MOJCA ŠRAJ

Slika 6: Merjenje odtoka po deblu z žlebiči in volumetričnim merilcem.

odvisen od mnogih dejavnikov na primer gostote dreves, velikosti in oblike drevesne krošnje, lastnosti drevesne skorje in količine padavin. Merjenje odtoka po deblu izvedemo z žlebiči okrog debla, ki lovijo vodo. Tak žlebič speljemo do volumetričnega merilca ali ombrografa (slika 6), ki omogočata avtomatski zapis meritev v odvisnosti od časa ali pa vodo zbiramo v zbirne posode, kjer volumen vode odčitamo ročno.

2.4 Merjenje indeksa listne površine (LAI)

Indeks listne površine (*LAI*, angleško *leaf area index*) je definiran kot skupna enostranska površina listov na enoto površine tal (m^2/m^2) (Chen in ostali 1997; Gobron 2009). Pri procesih kot so prestrežanje padavin, izhlapevanje, transpiracija, evapotranspiracija in kroženje energije, je indeks listne površine eden od pomembnejših parametrov vegetacije. Točnost določitve indeksa listne površine je lahko kritična pri razumevanju in modeliranju obnašanja posameznega ekosistema. Medtem ko so za posamezne nižje rastline, kot so npr. poljedelske rastline, indeksi listne površine že zelo natančno določeni, pa ostaja določitev listnega indeksa naravnih gozdnih sestavov še vedno velik logistični problem (Šraj, 2003b; 2004). Za *LAI* je značilna prostorska in časovna spremenljivost, ki je v največji meri odvisna od vrste rastlin in podnebja. Za določanje *LAI* raziskovalci uporabljajo različne metode, ki jih v splošnem delimo na neposredne in posredne. Neposredne metode so zanesljivejše, vendar zahtevajo veliko časa in laboratorijskega dela. Posredne metode, pri katerih se indeks listne površine določi prek merjenja in analize nekaterih drugih parametrov, pa so hitrejše in zato omogočajo tudi zajem večjega vzorca. Večina jih temelji na metodi določanja deleža odprtih v krošnji. Njihova pomankljivost pa je, da ne ločijo površine listov od površine vej in debla (Šraj 2004).

Neposredne metode za določanje *LAI* so:

- Zbiranje in določanje količine odpadlega listja skozi celo leto. Metoda je najprimernejša za listopadni gozd, ki ima omejeno obdobje odpadanja listov. Temelji na predpostavki, da v košare za zbiranje listja lovimo naključne vzorce odpadajočega listja nad njimi (slika 7). Je zelo natančna metoda, ki pa zahteva ogromno časa in dela in se ponavadi uporablja v kombinaciji z eno od posrednih metod in služi za njeno kalibracijo (Šraj 2003a). Indeks listne površine se izračuna iz mase posušenih listov na enoto površine (slika 8) in prej določene specifične površine listov *SLA*.
- Sekanje rastlin in določanje celotne listne površine rastline (Chen in ostali 1997). Metoda je uničevalna in iz tega razloga nezaželena. Primernejša je recimo za poljedelske rastline, za gozdove pa takorekoč neuporabna, saj je količina biomase, ki bi jo bilo potrebno uničiti, nedopustno velika.



MOJCA ŠRAJ

Slika 7: Košara za zbiranje odpadlega listja.



MOJCA ŠRAJ

Slika 8: Sušenje vzorcev listja v sterilizatorju pri 70°C (Sterilizator S-45, UL BF).

Med posredne metode za določanje *LAI* pa uvrščamo:

- Merjenje količine prehajanja sončnega sevanja skozi krošnje s posebnimi senzorji. Metoda temelji na določanju deleža odprtin v krošnji,
- Hemisferično fotografiranje krošenj in določanje deleža odprtin v krošnji s posebno obdelavo in analizo fotografij. Najpogosteje se v raziskavah uporablja posebna širokokotna leča 'ribje oko' z vidnim poljem 180°, lahko pa se uporabijo tudi druge leče (Diaci in ostali 1999). Osnovni princip metode je, da nebesni svod, ki je prekrit s krošnjami dreves, projiciramo na ravno podlago. Pri fotografiranju je zelo pomembna osvetlitev, da dobimo dober kontrast med listjem in nebom.
- Alometrične metode, ki temeljijo na določanju *LAI* preko temeljnih fizikalnih lastnosti vegetacije, kot npr. premer debla na določeni višini, višina dreves, biomasa ipd. s predhodno natančno določenim odnosom med posameznimi parametri. Ta odnos se določimo na reprezentativnem manjšem vzorcu z eno od neposrednih metod.
- Določanje *LAI* s pomočjo satelitskih posnetkov temelji na analizi satelitskih merenj IR svetlobe. Z naraščanjem *LAI* odboj IR svetlobe zaradi absorbcije pada.

2.5 Merjenje ostalih meteoroloških spremenljivk

Poleg meritev posameznih komponent hidrološkega kroga, je potrebno meriti tudi posamezne meteorološke spremenljivke, potrebne za izračun evapotranspiracije. To so: vpadla in odbita solarna radiacija, temperatura in vlažnost zraka ter smer in hitrost vetra. Meritve lahko pridobimo z najbližje meteorološke postaje Agencije RS za okolje ali pa jih opravimo lokalno s pomočjo prenosne avtomatske meteorološke postaje.

3 Metodologija izračuna prestreženih padavin

3.1 Enačba vodne bilance

Izhlapovanje prestreženih padavin z mokrih krošenj lahko zapišemo s pomočjo poenostavljene enačbe vodne bilance kot $E_i = P - (T_f + S_f)$, kjer so P padavine, T_f so prepuščene padavine, S_f pa je odtok po deblu (glej Uvod).

Izhlapovanje prestreženih padavin z mokrih krošenj E_i je pomembna in velikokrat tudi prevladujoča komponenta celotne evapotranspiracije v gozdu. Glede na različne razmere, pa je možen zelo različen delež prestreženih padavin (preglednica 1)

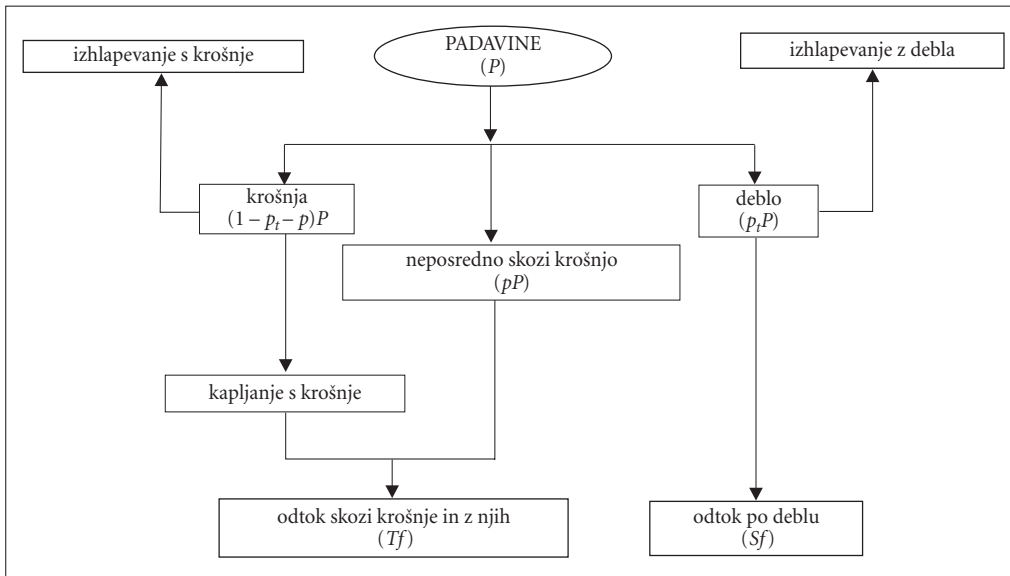
Preglednica 1. Pregled izmerjenih vrednosti deleža prestreženih padavin (E_i) iz različnih raziskovalnih študij (Šraj 2003a).

vrsta vegetacije	E_i [% od P]	lokacija	avtor
breza	23–40	Slovenija (Ljubljana)	Šraj in ostali 2008b
listopadni gozd (jesen, hrast, gaber)	25–28	Slovenija (Dragonja)	Šraj 2003a; Šraj in ostali 2008a
hrastov gozd	23	Nizozemska	Dolman 1987
listopadni gozd	18–23	Nizozemska	Lankreijer in ostali 1993
listopadni gozd (hrast, javor, gaber)	19,3	Kanada	Carlyle-Moses in Price 1999
nasadi oljk	7–25	Španija	Gomez in ostali 2001
listnati zimzeleni gozd (lovor)	42,8	Tenerife	Aboal in ostali 1999
evkaliptusov gozd	9,7	Portugalska	Valente in ostali 1997
rdeči bor	51–65	Slovenija (Ljubljana)	Šraj in ostali 2008b
iglasti gozd	11,9	jugozahodna Francija	Gash in ostali 1995
iglasti gozd	17,6	Španija	Llorens 1997
iglasti gozd	15–21 (poletje) 13–21 (zima)	Francija	Loustau in ostali 1992
iglasti gozd	12,5	Francija	Lankreijer in ostali 1993
iglasti gozd	31	vzhodna Velika Britanija	Gash in Stewart 1977
iglasti gozd	16,4	Portugalska	Valente in ostali 1997
mešani gozd (bukev, jelka)	12,5–20	jugovzhodna Slovenija	Vilhar 2006
tropski gozd	18,1–18,6	Fidji	Waterloo in ostali 1999
tropski deževni gozd	52	Porto Rico	Schellekens in ostali 1999
tropski deževni gozd	16–17	Južna Amerika	Jetten 1996
tropski deževni gozd	22–35	Nova Zelandija	Rowe 1983

3.2 Modeliranje prestreženih padavin

Fizikalni modeli lahko pomagajo pojasniti pomembnost različnih faktorjev, ki jih je pri procesu prestrežanja težko določiti iz merjenih podatkov. Obstaja več modelov, najbolj razširjena pa sta Rutterjev dinamični model in iz njega izpeljan in poenostavljen Gashev model. Oba zahtevata poznavanje strukture drevesnih krošenj in podnebnih razmer.

Rutter in sodelavci (1971) so razvili numerični model izračuna prestreženih padavin na temelju vodne bilance krošnje (in debla) (slika 9). Sprememba količine vode v krošnji v odvisnosti od časa je v Rutterjevem modelu izražena z deležem padavin, ki zadenejo krošnjo, deležem, ki se s krošenj drenira kasneje kot kapljanje ter izhlapevanjem prestreženih padavin z mokrih krošenj. Izhlapovanje z mokrih



Slika 9: Poenostavljena shema Rutterjevega modela.

krošenj se določa po Penman-Monteithovi enačbi. Model zahteva urne vrednosti padavin in meteoroloških podatkov za izračun izhlapevanja. Rutterjev model zelo podcenjuje izhlapevanje E_i v obalnih, vlažnih in tropskih razmerah, kjer bi posledično morali imeti nerealno velike skladiščne zmogljivosti krošenj ali zelo nizko aerodinamično upornost, da bi lahko primerjali izračunano in izmerjeno izhlapevanje prestreženih padavin (Bruijnzeel 2000). Največja slabost Rutterjevega modela pa je visoka zahteva po podatkih.

Gashev t. i. analitični model prestreženih padavin (Gash 1979) je poenostavljena izpeljava Rutterjevega modela in obravnava padavine kot serije posameznih dogodkov, med katerimi lahko ločimo: fazo močenja med dežjem P , pri kateri je količina padavin manjša od mejne vrednosti zasičenosti krošnje P'_g , zasičeno fazo, ko intenziteta dežja R presega intenziteto izhlapevanja z mokre krošnje in fazo sušenja po koncu dežja.

Tak pristop daje boljše rezultate kot Rutterjev predvsem v primerih z več kot eno nevihto na dan. Predpostavljeno je, da ima krošnja med posameznimi nevihtami dovolj časa, da se posuši. Model ohranja enostavnost empiričnega pristopa in hkrati glavne fizikalne osnove Rutterjevega modela. Uspešno je bil uporabljen v zelo različnih okoljih od iglastega gozda v Veliki Britaniji (Gash in ostali 1980) do tropskega deževnega gozda (Schellekens in ostali 1999). Model temelji na naslednjih predpostavkah:

Padavine so predstavljene kot serija diskretnih neviht oziroma dogodkov, ki so ločeni z obdobjem, v katerem se krošnje popolnoma posušijo. Za modeliranje prestreženih padavin lahko torej uporabimo vsote posameznih merjenih količin (P , T_f , S_f) za posamezni dogodek.

Povprečno izhlapevanje \bar{E} predstavlja izhlapevanje z mokrih krošenj med posameznimi dogodki. Odnos med povprečnim izhlapevanjem in povprečno intenziteto padavin (\bar{E}/R) je konstanten oziroma enak za vse dogodke.

Dokler skladiščna zmogljivost krošnje S ni zapolnjena, ni kapljanja s krošenj.

Izhlapovanje z debel se začne šele, ko dež preneha.

V Gashevem modelu je uporabljena serija enačb (preglednica 2) za izračun posameznih komponent izhlapevanja prestreženih padavin med različnimi časovnimi fazami nevihte, kjer je P'_g količina padavin, potrebna za zapolnitev skladiščne zmogljivosti drevesne krošnje, S skladiščna zmogljivost krošenj,

\bar{R} povprečna intenziteta padavin, \bar{E} povprečna intenziteta izhlapevanja z mokrih krošenj, p delež padavin, ki padejo skozi odprtine med krošnjami in listi neposredno na tla, p_t delež padavin, ki odtečejo po deblu in S_t skladiščna zmogljivost debla. Celotno izhlapevanje prestreženih padavin z mokrih krošenj E_i pa je vsota posameznih komponent. Tudi pri tem modelu je, kot pri Rutterjevem, izhlapevanje prestreženih padavin E_i za obalna območja podcenjeno.

Preglednica 2: Enačbe za izračun posameznih komponent izhlapevanja prestreženih padavin in parametrov po Gashu (1979).

komponente izhlapevanja	enačbe
za m malih neviht, ki ne zasičijo krošenj ($P < P'_g$)	$(1 - p - p_t) \sum_{j=1}^m P_j$
za n velikih neviht, ki lahko zasičijo krošnje ($P \geq P'_g$)	$n(1 - p - p_t) P'_g - nS$
izhlapevanje z mokrih zasičenih krošenj med nevihto	$\frac{\bar{E}}{R} \sum_{j=1}^n (P_j - P'_g)$
izhlapevanje po nevihti za n velikih neviht	nS
izhlapevanje z debel za q neviht, ki zasičijo skladiščno zmogljivost debla	qS_t
izhlapevanje z debel za $(m + n - q)$ neviht, ki ne zasičijo debla	$p_t \sum_{j=1}^{m+n-q} P_j$
parametri	enačbe
dež, potreben za zapolnitev drevesne krošnje	$P'_g = \left(-S \cdot \frac{\bar{R}}{E} \cdot \ln \left[1 - \frac{\bar{E}}{(1 - p - p_t) \cdot \bar{R}} \right] \right)$
povprečno izhlapevanje z mokrih krošenj	$\bar{E} = \bar{E}_w$
skladiščna zmogljivost krošnje	S
pokrovnost krošnje	$1 - p$

Zaradi nekaterih pomanjkljivosti modela, predvsem precenjevanja evapotranspiracije v bolj odprtih gozdovih, je Gash s sodelavci (1995) model popravil (preglednica 3). Dodal je parameter pokrovnosti krošnje c , in ga naredil linearno odvisnega od skladiščne zmogljivosti krošnje S in izhlapevanja z mokrih krošenj \bar{E} . Popravljen model upošteva izhlapevanje na enoto površine krošenj in ne na enoto površine tal, kar izboljša rezultate v odprtih gozdovih. Tako se v popravljenem modelu povprečno izhlapevanje z mokrih krošenj \bar{E} izračuna glede na delež pokritosti s krošnjami c , skladiščna zmogljivost krošenj pa podobno. Zaradi doslednosti sta bili rahlo popravljene tudi enačbi odtoka po deblu in skladiščne zmogljivosti debla, z upoštevanjem predpostavke, da odtoka po deblu ni, dokler skladiščna zmogljivost krošnje ni zapolnjena.

Bistvena izboljšava dopolnjenega Gashevega modela iz leta 1995 (van Dijk in Bruijnzeel 2001) je predvsem v načinu izračuna izhlapevanja z mokre vegetacije, ki se ji značilnosti oz. parametri krošenj spreminjajo s časom (npr. listnati gozdovi). V dopolnjenem modelu je uporabljen nov parameter indeks

Preglednica 3: Enačbe za izračun posameznih komponent izhlapevanja prestreženih padavin in parametrov po popravljenem Gashevem modelu (1995).

komponente izhlapevanja	enačbe
za m malih neviht, ki ne zasičijo krošenj ($P < P'_g$)	$c \sum_{j=1}^m P_j$
za n velikih neviht, ki lahko zasičijo krošnje ($P \geq P'_g$)	$n \cdot c \cdot P'_g - nS$
izhlapevanje z mokrih zasičenih krošenj med nevihto	$\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \sum_{j=1}^n (P_j - P'_g)$
izhlapevanje po nevihti za n velikih neviht	nS
izhlapevanje z debel za q neviht, ki zasičijo skladiščno zmogljivost debela	qS_t
izhlapevanje z debel za (n - q) neviht, ki ne zasičijo debela	$P_t \sum_{j=1}^{n-q} P_j$
parametri	enačbe
dež, potreben za zapolnitev drevesne krošnje	$P'_g = \left(-S \cdot \frac{\bar{R}}{\bar{E}} \cdot \ln \left[1 - \frac{\bar{E}}{c \cdot \bar{R}} \right] \right)$
povprečno izhlapevanje z mokrih krošenj	$\bar{E} = c\bar{E}_c$
skladiščna zmogljivost krošnje	$S = cS_c$
pokrovnost krošnje	c

listne površine *LAI*, ki poleg pokrovnosti *c* opisuje gostoto vegetacije. Novi popravki temeljijo na naslednjih predpostavkah:

Skladiščna zmogljivost krošnje je linearno odvisna od indeksa listne površine *LAI*.

Relativno izhlapevanje (\bar{E}/\bar{R}) je lahko izraženo kot funkcija indeksa listne površine *LAI*.

Voda, ki se zadržuje na deblu, se lahko obravnava enako kot tista na krošnji, zato je izhlapevanje z zasičenega debela med nevihto lahko vključeno v simulacijo.

4 Sklep

Gozd ima velik vpliv na vodni režim. Raziskave v svetu kažejo, da gozd nima samo pozitivnega vpliva na vodni režim, saj povečanje zaraščenosti zmanjšuje odtok površinskih voda. Gozdovi so pogosto vir kakovostne vode, njihovo krčenje pa zaradi povečane erozije poslabša kakovost tal in vode. Zaradi globalnih sprememb je hidrološka funkcija gozdov danes pomembnejša kot kdajkoli prej, zato so se meritve in metode analize posameznih komponent gozdnega hidrološkega kroga v zadnjih desetletjih zelo razvile in posodobile.

5 Viri in literatura

- Aboal, J. R., Jimenez, M. S., Morales, D., Hernandez, J. M. 1999: Rainfall interception in laurel forest in the Canary Islands. *Agricultural and Forest Meteorology* 97. Amsterdam.
- Brilly, M., Šraj, M., 2005: Osnove hidrologije. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Bruijnzeel, L. A. 2000: *The Forestry Handbook* 1. Oxford.
- Carlyle-Moses, D. E., Price, A. G. 1999: An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. *Journal of Hydrology* 214. Amsterdam.
- Chen, J. M., Rich, P. M., Gower, R. T., Norman, J. M., Plummer, S. 1997. Leaf area index of boreal forests, Theory, Techniques and measurements. *Journal of Geophysical Research* 102 (D24). Washington.
- Chow, V. T. 1964: *Handbook of applied hydrology*. New York.
- Diaci, J., Thormann, J. J., Kolar, U. 1999. Meritve sončnega sevanja v gozdu – II. Metode na osnovi projekcij hemisfere neba in krošenj. *Zbornik gozdarstva in lesarstva* 60. Ljubljana.
- Dolman, A. J. 1987: Summer and winter rainfall interception in an oak forest, predictions with an analytical and a numerical simulation model. *Journal of Hydrology* 90. Amsterdam.
- Gash, J. H. C. 1979: An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 105. Bracknell, Berks.
- Gash, J. H. C., Stewart, J. B. 1977: The evaporation from Thetford forest during 1975. *Journal of Hydrology* 35. Amsterdam.
- Gash, J. H. C., Wright, L. R., Lloyd, C. R. 1980: Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain. *Journal of Hydrology* 48. Amsterdam.
- Gobron, N. 2009. Leaf area index. Medmrežje: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0197e/i0197e15.pdf> (27. 2. 2009).
- Gomez, J. A., Giraldez, J. V., Fereres, E. 2001: Rainfall interception by olive trees in relation to leaf area. *Agricultural Water Management* 49. Amsterdam.
- Horton, R. E. 1919: Rainfall interception. *Monthly Weather Review* 47. Boston.
- Jetten, V. G. 1996. Inerception of tropical rain forest: performance of a canopy water balance model. *Hydrological Processes* 10. Chichester.
- Lankreijer, H. J. M., Hendriks, M. J., Klassen, W. 1993: A comparison of models simulating rainfall interception of forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 64. Amsterdam.
- Lee, R. 1970: Theoretical estimates versus forest water yield. *Water Resources Research* 6. Washington.
- Llorens P. 1997. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area, II. Assessment of the applicability of Gash's analytical model. *Journal of Hydrology* 199. Amsterdam.
- Loustau, D., Berbigier, P., Granier, A. 1992: Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime oak stand, II. An application of Gash's analytical model of interception. *Journal of Hydrology* 138. Amsterdam.
- Ovington, J. D. 1954: A comparison of rainfall in different woodlands. *Forestry London* 27.
- Rowe, L. K. 1983: Rainfall interception by an evergreen beech forest, Nelson, New Zealand. *Journal of Hydrology* 66. Amsterdam.
- Rutter, A. J., Kershaw, K. A., Robins, P. C., Morton A. J. 1971: A predictive model of rainfall interception in forests, Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology* 9. Amsterdam.
- Schellekens, J., Scatena, F. N., Bruijnzeel, L. A., Wickel, A. J. 1999: Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico. *Journal of Hydrology* 225. Amsterdam.
- Smolej, I. 1988: Gozdna hidrologija. Sladkovodni ekosistemi, varstvo voda in gozdna hidrologija. TOZD za gozdarstvo Biotehnične fakultete Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Šraj, M. 2003a: Modeliranje in merjenje prestreženih padavin. Doktorska disertacija, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.

- Šraj, M. 2003b: Estimating leaf area index of the deciduous forest in the Dragonja watershed, Part I: Methods and measuring. *Acta hydrotechnica*, 21-35. Ljubljana.
- Šraj, M. 2004. Estimating leaf area index of the deciduous forest in the Dragonja watershed, Part 2: Results and discussion. *Acta hydrotechnica*, 22-36. Ljubljana.
- Šraj, M., Brilly, M., Mikoš, M. 2008a: Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. *Agricultural and Forest Meteorology* 148-1. Amsterdam.
- Šraj, M., Lah, A., Brilly, M. 2008b: Meritve in analiza prestreženih padavin navadne breze (*Betula pendula* Roth.) in rdečega bora (*Pinus sylvestris* L.) v urbanem okolju. *Gozdarski vestnik* 66-9. Ljubljana.
- Valente, F., David, J. S., Gash, J. H. C. 1997: Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology* 190. Amsterdam.
- van Dijk, A. I. J. M., Bruijnzeel, L. A. 2001: Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model, Part 1: Model description. *Journal of Hydrology* 247. Amsterdam.
- Waterloo, M. J., Bruijnzeel, L. A., Vugst, H. F., Rawaqa, T. T. 1999: Evaporation from *Pinus caribaea* plantations on former grassland soils under maritime tropical conditions. *Water Resources Research* 35-7. Washington.

6 Summary: Intercepted precipitation: measurements and analysis

(translated by the author)

A vegetation cover can influence climatic and soil conditions at a great deal. Rainfall is the main input to the ecosystem hydrological cycle. Throughfall is a portion of rainfall, which reaches the forest floor directly without touching the canopy (direct throughfall), and portion of precipitation intercepted by the canopy, which, after the storage capacity of the canopy has been filled, reaches the floor as crown drip. Direct throughfall and crown drip cannot be measured separately, so that together they represent throughfall. A portion of intercepted precipitation that flows along branches and trunks to the floor is called stemflow. It is usually small but not always negligible. Interception loss is rainfall that strikes the vegetation and evaporates back to the atmosphere. It is a significant component in the water balance of forested areas. The leaf area index is one of the most important canopy structure characteristics. It is defined as the total one-sided leaf area per unit ground area.

Measurements and analyses of the individual components of the forest hydrological cycle developed extensively in the last decades. Before 1960's interception was determined by the amount, duration or intensity of the rain or by vegetation type and age (Horton 1919). Nowadays, interception loss is estimated by water balance equation and with analytical models. Rutter was the first to move away from empirical approach. Rutter's model requires extensive climatic and vegetation data (Rutter et al. 1971). Gash proposed simpler model which represents rainfall as series of discrete storms between which vegetation dries completely (Gash 1979). The model has been successfully applied in many studies in different climates and vegetation types.

