



مقایسه مدل‌های فیزیکی مبنای Gash در برآورد ساقاب توده کاج تهران در پارک جنگلی چیتگر

سید محمدمعین صادقی^۱، پدram عطارد^{۲*}، امید بزرگ حداد^۳، جان تولند ون استان^۴ و توماس گرنٹ پایپکر^۵

^۱ دانشجوی دکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج
^۲ دانشیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج
^۳ استاد گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج
^۴ دانشیار گروه زمین‌شناسی و جغرافیا، دانشگاه جورجیای جنوبی، استاتسبرو
^۵ دانشیار گروه علوم منابع طبیعی، دانشگاه تامسون ریورز، کمپوس

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۱۰)

چکیده

جریان ساقاب در مطالعات اکوهیدرولوژیک پوشش گیاهی، به عنوان ورودی نقطه‌ای آب باران به بوم‌سازگان گیاهی در نظر گرفته می‌شود. امروزه به دلایلی چون نیاز به اندازه‌گیری در عرصه و وقتگیر و پرهزینه بودن اندازه‌گیری ساقاب، از مدل‌سازی برای برآورد مقادیر آن استفاده می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی کارایی سه مدل فیزیکی مبنای Gash و نسخه‌های اصلاح‌شده آن (Gash-1 و Gash-2) در برآورد ساقاب توده کاج تهران در پارک جنگلی چیتگر، طی سه سال اندازه‌گیری بود. برای اندازه‌گیری مقدار باران، از ۱۰ باران‌سنج و برای اندازه‌گیری تاج‌بارش ۶۰ باران‌سنج استفاده شد و متوسط ساقاب ۹ درخت به‌عنوان متوسط ساقاب درختان در نظر گرفته شد. نتایج مرحله ارزیابی مدل نشان می‌دهد که مدل‌های Gash و Gash-2 به ترتیب قابلیت بسیار مطلوبی در برآورد ساقاب دارند؛ هرچند که قابلیت آنها در طبقه‌های مختلف مقدار باران متفاوت است. در طبقه باران‌های با مقدار خیلی کم (کمتر از ۲/۵۰ میلی‌متر)، هر سه مدل پیش‌بینی نادرستی از مقدار ساقاب داشتند و در مقدار باران‌های کم (۲/۵۱ تا ۵/۰۰ میلی‌متر) و متوسط (۵/۰۱ تا ۷/۵۰ میلی‌متر) مدل Gash-2 و در مقدار باران‌های زیاد (۷/۵۱ تا ۱۰/۰۰ میلی‌متر) و خیلی زیاد (بیشتر از ۱۰/۰۰ میلی‌متر) مدل Gash عملکرد بسیار مناسبی از خود نشان دادند. در یک جمع‌بندی می‌توان بیان داشت که مدل Gash به دلیل نیاز به ورودی‌های کمتر، می‌تواند کاربردی‌تر باشد. با توجه به پدیده تغییر اقلیم که فراوانی رخدادهای باران در طبقه‌های مختلف مقدار باران تحت تأثیر آن قرار می‌گیرد، باید از مدل‌های مناسب، برای برآورد مقدار ساقاب استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: اکوهیدرولوژی جنگل، جنگلکاری، ورود آب باران، *Pinus eldarica*.

مقدمه

زمینه منابع آب، نیازمند شناخت صحیح از برهم‌کنش پوشش‌های گیاهی با چرخه آب است که در دانش اکوهیدرولوژی، این روابط بررسی می‌شود. از نظر اکوهیدرولوژی، باران مهم‌ترین ورودی آب در

امروزه رشد جمعیت و نیاز بیش از پیش به منابع آب شیرین، سبب چالش جدی در مدیریت منابع آب شده است. برنامه‌ریزی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی در

گونه مناسب و تیمارهایی مانند تنک کردن و هرس کردن و همچنین تعیین فاصله کاشت مناسب درختان کمک می‌کند (Hakimi et al., 2018). برای نمونه، با بررسی مقدار ساقاب درختان و گونه‌های مختلف، می‌توان با کاشت گونه مناسب که ساقاب بیشتری دارد، سبب افزایش رطوبت خاک و حاصلخیزی بیشتر خاک در اطراف تنه درختان شد (Van Stan & Gordon, 2018; Van Stan & Stubbins, 2018). به بیان دیگر، در مناطقی که نیاز است آب بیشتری به بوم‌سازگان از طریق ساقاب وارد شود، با انتخاب درختانی که توانایی توزیع ساقاب بیشتری دارند، می‌توان سبب افزایش مقدار آب در لایه‌های زیرین خاک و حتی تأمین سفره‌های آب زیرزمینی در منطقه شد (Levia & Germer, 2015). بنابراین در مناطقی که آبیاری امکان‌پذیر نیست، باید با اعمال روش‌های مدیریتی سبب افزایش مقدار ساقاب در منطقه شد.

در داخل کشور تحقیقات در زمینه توزیع اجزای باران در بوم‌سازگان‌های جنگلی سابقه‌ای یک‌دهه‌ای دارد. در اولین تحقیق داخل کشور، Ghorbani & Rahmani (2009) توزیع اجزای باران را در یک دوره یکساله در توده راش شرقی در جنگل‌های هیرکانی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که مقادیر تاج‌بارش، ساقاب و باران‌ربایی توده راش شرقی به ترتیب ۴۰/۰، ۳/۰ و ۵۹/۷ درصد است. در منطقه پژوهش (پارک جنگلی چیتگر)، توزیع اجزای باران در توده‌های کاج تهران، سرو نقره‌ای، زبان‌گنجشک، افاقیا، چنار و عرعر انجام گرفته که مقادیر ساقاب در این تحقیقات در دامنه ۱/۵ تا ۱۰/۳ درصد گزارش شده است (Sadeghi et al., 2016, 2017). در مقایسه با تحقیقات پرشمار در زمینه توزیع اجزای باران، مطالعات کمتری در زمینه پارامترهای اکوهیدرولوژیک تاج‌پوشش و تنه درختان انجام گرفته (برای نمونه: Sadeghi & Attarod, 2017; Sadeghi et al., 2018) و در داخل کشور در زمینه مدل‌سازی

بوم‌سازگان‌های گیاهی است. باران هنگام برخورد با پوشش گیاهی به اجزای باران‌ربایی (باران‌گیرش، ربایش تاجی)^۱، تاج‌بارش (بارش تاجی)^۲ و ساقاب (رواناب تنه)^۳ تقسیم می‌شود (Van Stan & Gordon, 2018; Van Stan & Stubbins, 2018).

ساقاب به‌عنوان یک ورودی مهم در هنگام بارندگی، تأثیر بسیار زیادی در حاصلخیزی خاک در اطراف تنه/ساقه گیاه دارد (Van Stan & Gordon, 2018; Van Stan & Stubbins, 2018)، به طوری که مقدار عناصر غذایی موجود در ساقاب تا ۱۰۰ برابر مقدار عناصر غذایی موجود در تاج‌بارش گزارش شده است (Levia & Germer, 2015; Van Stan & Stubbins, 2018). از سوی دیگر، رطوبت خاک در اطراف تنه و ساقه پوشش گیاهی، ارتباط زیادی با مقدار ساقاب دارد (Van Stan & Gordon, 2018). مرور منابع نشان می‌دهد که ترکیب و تنوع پوشش کف جنگل با محل استقرار تنه درختان در جنگل و در نتیجه ساقاب جاری‌شده از آنها ارتباط دارد (Levia & Frost, 2003; Levia & Germer, 2015; Van Stan & Stubbins, 2018). بسیاری از پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که ساقاب می‌تواند سهم چشمگیری از هر رخداد باران را در درختان و درختچه‌ها (به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک) به خود اختصاص دهد (تا ۴۵ درصد؛ Levia & Frost, 2003). هرچند که در بسیاری از پژوهش‌ها در داخل کشور، از اندازه‌گیری آن صرف‌نظر شده است (Attarod et al., 2015; Sadeghi et al., 2015a, b). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که حدود ۷۰ درصد سطح کشور را در بر می‌گیرد یکی از دلایل احتمالی درصد زیاد ساقاب، خاصیت آب‌گریزی^۴ برگ‌هاست (Levia & Frost, 2003; Holder, 2012; Levia & Germer, 2015).

شناخت مقادیر ساقاب به مدیران برای انتخاب

1. Rainfall interception
2. Throughfall
3. Stemflow
4. Leaf Hydrophobicity

سبز شهری مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران کمک می‌کند.

بر اساس مرور منابع نویسندگان، تاکنون به بررسی همزمان قابلیت این مدل‌ها در برآورد ساقاب درختان پرداخته نشده است. بنابراین اهداف این پژوهش عبارت‌اند از: ۱. ارزیابی مدل Gash و نسخه‌های اصلاح‌شده Gash-1 و Gash-2 در برآورد ساقاب کل؛ ۲. ارزیابی مدل‌های یادشده در برآورد ساقاب در هر طبقه مقدار باران. پژوهش‌های قبلی در منطقه تحقیق نشان می‌دهد که بر اثر تغییر پارامترهای اقلیمی، فراوانی رخداد‌های باران در طبقه‌های مقدار باران تغییر کرده است (Sadeghi et al., 2015b) و باید کارایی مدل‌های یادشده در هر طبقه مقدار باران جداگانه بررسی شود.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

این تحقیق در پارک جنگلی چیتگر (عرض شمالی ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه و طول شرقی ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه با دامنه ارتفاع از سطح دریای ۱۳۱۳-۱۲۲۵ متر از آب‌های آزاد) در جنگل دست‌کاشت ۴۶ساله کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw.)، در قطعه نمونه‌ای دایره‌ای به مساحت نیم‌هکتار انجام گرفت که مشخصه‌های زیست‌سنجی آن در جدول ۱ ارائه شده است (میانگین ارتفاع از سطح دریای توده جنگلی، ۱۲۵۰ متر از سطح آب‌های آزاد). بر اساس اطلاعات نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه پژوهش، ایستگاه همدیدی چیتگر (۳۵ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی و ۵۱ درجه و هشت دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۲۱۵ متر از سطح دریا)، با فاصله تقریبی چهار کیلومتر از توده مورد بررسی، طی سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۵ خورشیدی، دارای میانگین بارندگی سالانه ۲۷۳/۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۷/۱ درجه سانتی‌گراد بود. گرم‌ترین و سردترین ماه‌های سال به ترتیب مرداد (میانگین ۲۹/۹ درجه سانتی‌گراد) و

ساقاب، تنها یک تحقیق با استفاده از مدل اصلاح‌شده Gash (Gash et al., 1995) در توده عرعر اجرا شده است (Sadeghi et al., 2017).

تقریباً از ۵۰ سال پیش تاکنون، استفاده از مدل‌های ریاضی برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی با سرعت بیشتری رواج یافته است و روش‌های مدل‌سازی، خط‌مشی‌هایی جامع و مناسب برای ارزیابی اکوهیدرولوژیکی ارائه کرده‌اند. نکته مثبت مدل‌سازی، استفاده آسان، حجم کار اندک و هزینه کم (به‌دلیل بی‌نیازی به دستگاه‌های پیچیده برای اندازه‌گیری) است. از جمله مدل‌های فیزیکی مبنا که قابلیت برآورد ساقاب را دارند، مدل Gash (Gash, 1979) و نسخه‌های اصلاح‌شده Gash-1 (Gash et al., 1995) و Gash-2 (Valente et al., 1997) هستند. مدل Gash در برآورد ساقاب دارای بیش‌برآوردی بود و با اصلاح آن در سال ۱۹۹۵ میلادی، مدل Gash-1 ارائه شد (Gash et al., 1995). پژوهش‌های مرتبط با مدل Gash-1 نشان داد که این مدل نیز مقدار ساقاب را بیش‌برآورد می‌کند و بنابراین، مدل دو سال بعد (سال ۱۹۹۷ میلادی) دوباره اصلاح شد (Valente et al., 1997). در بیشتر مطالعات به بررسی عملکرد مدل‌های اصلاح‌شده Gash در برآورد باران‌ریایی پرداخته شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های فیزیکی مبنا بسته به اقلیم و نوع گونه، توانایی متفاوتی در برآورد باران‌ریایی دارد (به مقاله مروری Muzylo و همکاران (۲۰۰۹) مراجعه شود). نتایج مطالعات قبلی در پارک جنگلی چیتگر، در دو گونه کاج تهران و سرو نقره‌ای (Sadeghi et al., 2015b) و عرعر (Sadeghi et al., 2017) نشان داد که مدل‌های فیزیکی مبنا در برآورد باران‌ریایی کارایی مطلوبی دارند. در برآورد ساقاب، تحقیقات اندکی در جهان به بررسی قابلیت این سه مدل پرداخته‌اند. نتایج برآورد این مدل‌ها، به انتخاب مدل مناسب برای برآورد ساقاب گونه کاج تهران، به‌عنوان پراستفاده‌ترین گونه در پارک‌های جنگلی و فضای

دی (میانگین ۳/۸ درجه سانتی‌گراد) هستند. تعداد روزهای بارانی و یخبندان در این منطقه به ترتیب ۷۱ و ۳۹ روز و میانگین سرعت باد ۳/۲۳ متر بر ثانیه است.

جدول ۱- میانگین مشخصه‌های زیست‌سنجی توده کاج تهران

ارتفاع درختان (متر)	قطر برابر سینه (سانتی‌متر)	طول تاج (متر)	تاج‌پوشش (درصد)	شاخص سطح برگ
۹/۱ (± ۰/۳)	۲۲ (± ۱)	۳/۷ (± ۰/۲)	۶۰ (± ۱)	۴/۳۷ (± ۰/۱۱)

اعداد داخل پرانتز به خطای معیار میانگین پارامترها اشاره دارند.

روش پژوهش

اندازه‌گیری باران و ساقاب

به‌منظور برآورد مقادیر توزیع اجزای باران در توده کاج تهران، بارندگی‌ها به مدت سه سال (از ۲۶ اسفند ۱۳۹۰ تا ۲۴ اسفند ۱۳۹۳) اندازه‌گیری شدند. مقدار باران در هر رخداد، با استفاده از ۱۰ باران‌سنج دستی (قطر دهانه ۸ سانتی‌متر و عمق ۲۲ سانتی‌متر) در نزدیک‌ترین فضای باز به توده (فاصله کمتر از ۳۰ متر)، که به‌صورت کاملاً عمودی در کف جنگل مستقر شدند، جمع‌آوری شد. ۱۰ باران‌سنج دستی به‌صورت تصادفی در فضای باز توزیع شدند. محل استقرار باران‌سنج‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شد که در زاویه ۴۵ درجه از سطح آنها، هیچ تداخلی با تاج درختان اطراف باران‌سنج‌ها وجود نداشته باشد. این روش استاندارد در پژوهش‌های متعددی توصیه شده است (برای نمونه: Helvey & Patric, 1965; Carlyle-Moses et al., 2004). محفظه اطراف همه باران‌سنج‌ها با فویل‌های آلومینیومی برای کاهش اثر نور خورشید پوشانده شد. در پژوهش حاضر، ساقاب ۹ درخت به‌صورت تصادفی اندازه‌گیری شد؛ بدین صورت که از ناودان‌های لاستیکی با قطر ۶ سانتی‌متر استفاده شد و این ناودان‌ها حداقل ۱/۵ دور به دور تنه درختان می‌چرخیدند. فاصله بین ناودان‌های لاستیکی جمع‌آوری ساقاب و پوست درختان کاج تهران، توسط چسب سیلیکونی عایق‌بندی و درزگیری شد. هدف از این کار، جلوگیری از عبور آب از فاصله بین ناودان‌ها و پوست درختان بود (Levia & Frost, 2003). این

ناودان‌های لاستیکی در ارتفاع برابر سینه نصب و خروجی آنها به ظرف‌های جمع‌آوری‌کننده ۲۰ لیتری، توسط یک شلنگ (قطر ۷ سانتی‌متر و طول ۱ متر)، متصل شد. این ناودان‌ها به‌گونه‌ای نصب شدند که با داشتن شیب به‌سمت پایین و شکل مارپیچی، آب جاری‌شده بر روی تنه را جمع کنند و آن را از طریق شلنگ متصل‌کننده به ظرف‌های جمع‌آوری‌کننده انتقال دهند. مرور منابع نشان می‌دهد که روش استفاده‌شده، روشی مؤثر در اندازه‌گیری ساقاب به شمار می‌آید (Levia & Frost, 2003). پس از اندازه‌گیری ساقاب در هر رخداد باران، از محکم بودن محل اتصال شلنگ خروجی با ناودان‌های لاستیکی و ظرف جمع‌آوری‌کننده ساقاب و نیز سالم بودن ناودان‌های جمع‌آوری‌کننده، شلنگ خروجی و ظرف جمع‌آوری‌کننده ساقاب، اطمینان حاصل شد. برای محاسبه عمق ساقاب تولیدی درختان، حجم ساقاب جمع‌آوری‌شده هر یک از درختان نمونه، بر تصویر تاج آن درخت تقسیم شد. برای اندازه‌گیری تصویر تاج درختان نمونه ساقاب، قطر تاج هر یک از درختان در هشت جهت اصلی با استفاده از متر نواری (با دقت ۱ سانتی‌متر) اندازه‌گیری و سطح تاج درختان بر اساس رابطه مساحت دایره محاسبه شد (Shachnovich et al., 2008). سپس میانگین عمق ساقاب تولیدی توسط ۹ درخت نمونه، به‌عنوان ساقاب تولیدی در هر رخداد بارندگی در نظر گرفته شد. مقدار تاج‌بارش نیز با استفاده از ۶۰ باران‌سنج

آب تنه (S_t) نشان‌دهنده مقدار آبی از هر رخداد باران است که توسط تنه نگهداری می‌شود. عرض از مبدأ خط رگرسیون خطی بین ساقاب (محور y) و باران (محور x)، نشان‌دهنده مقدار ظرفیت نگهداری آب تنه است (Gash, 1979). در مدل اصلاح‌شده Gash-2، از تقسیم ظرفیت نگهداری آب تنه (S_t) بر درصد تاج پوشش (c)، مقدار ظرفیت نگهداری تصحیح‌شده حاصل می‌شود (S_{tc}). برای محاسبه تعداد رخدادهای باران کافی برای اشباع آب تنه (q) باید مقدار نقطه اشباع آبی تنه محاسبه شود (P_g ، میلی‌متر) که این نقطه از تقسیم S_t بر p_t حاصل می‌شود. پس از یافتن این نقطه، تعداد رخدادهای باران برابر یا بیشتر از این نقطه معادل q است. نسبت \bar{E}/\bar{R} ، برابر تفاضل شیب رگرسیون خطی بین تاج‌بارش و باران (برای رخدادهای برابر یا بزرگ‌تر از نقطه برآوردی اشباع آب تاج‌پوشش) از عدد ۱ است (Gash et al., 1995; Valente et al., 1997). در مدل اصلاح‌شده Gash-2، از تقسیم نسبت \bar{E}/\bar{R} بر درصد تاج‌پوشش (c)، نسبت \bar{E}/\bar{R} تصحیح‌شده حاصل می‌شود (\bar{E}_c/\bar{R}). مقدار نقطه اشباع آبی تاج‌پوشش (میلی‌متر) که به صورت چشمی، اولین نقطه انحنای نمودار بین تاج‌بارش (محور y) و باران (محور x) -از سمت شروع محور مختصات- با استفاده از کل رخدادهای باران، نقطه اشباع آب تاج‌پوشش در نظر گرفته می‌شود (Pypker et al., 2005). در واقع نقطه‌ای از منحنی که شیب نمودار ابر نقاط افزایش می‌یابد، نشان‌دهنده مقداری از باران است که برای اشباع تاج‌پوشش کافی است و در باران‌های برابر یا بزرگ‌تر از این نقطه، درصد بیشتری از هر رخداد باران می‌تواند به تاج‌بارش اختصاص یابد (Pypker et al., 2005).

طبقه‌های مقدار باران

رخدادهای باران بر اساس مقدار باران به پنج طبقه شامل خیلی کم ($0/1-2/50$ میلی‌متر)، کم ($2/51-5/00$ میلی‌متر)، متوسط ($5/01-7/50$

دستی که در زیر تاج‌پوشش به صورت تصادفی نصب شدند، اندازه‌گیری شد. بعد از هر پنج رخداد باران، نیمی از باران سنج‌ها جابه‌جا شده و در مکان‌های دیگر در سطح توده به‌طور تصادفی نصب شدند و نیمی از باران‌سنج‌ها نیز در کل دوره پژوهش در مکان ثابت در توده قرار گرفتند (Pypker et al., 2005). اندازه‌گیری مقدار بارندگی، ساقاب و تاج‌بارش در هر رخداد بارندگی، همزمان و با استفاده از استوانه مدرج با دقت ۱ میلی‌متر صورت گرفت. بعد از اندازه‌گیری هر بارندگی، همه باران‌سنج‌ها و جمع‌آوری‌کننده‌های ساقاب، از آب تخلیه و از شاخ و برگ تمیز شدند.

مدل‌های فیزیکی مبنای Gash

در ابتدا برای برآورد ساقاب (f_t ، میلی‌متر) بر اساس هر مدل، باید یک سری از پارامترهای اکوهیدرولوژیک تاج‌پوشش و تنه درختان اندازه‌گیری و محاسبه شوند (جدول ۲). این پارامترها شامل ضریب ساقاب (p_t)، P_g مقدار بارندگی در هر رخداد باران (میلی‌متر)، q تعداد رخدادهای باران کافی برای اشباع آب تنه، S_t ظرفیت نگهداری آب تنه (میلی‌متر)، c درصد تاج‌پوشش جنگل، نرخ تبخیر به شدت باران در هنگام اشباع آبی تاج‌پوشش (\bar{E}/\bar{R})، P'_g مقدار نقطه اشباع آبی تاج‌پوشش (میلی‌متر) و P''_g نقطه اشباع آبی تنه (میلی‌متر) و \bar{E}_c/\bar{R} ، p_{tc} به ترتیب ضریب ساقاب تصحیح‌شده، نرخ تبخیر به شدت باران در هنگام اشباع آبی تاج‌پوشش تصحیح‌شده و ظرفیت نگهداری آب تنه تصحیح شده‌اند.

ضریب ساقاب (p_t) نشان می‌دهد که چه مقدار از هر رخداد باران بر خورد کرده به تاج‌پوشش، امکان تبدیل به ساقاب را دارد (Levia & Frost, 2003) و شیب خط رگرسیون خطی بین مقادیر ساقاب (محور y) و باران (محور x)، برابر با مقدار ضریب ساقاب است. در مدل اصلاح‌شده Gash-2، از تقسیم ضریب ساقاب (p_t) بر درصد تاج‌پوشش (c)، ضریب ساقاب تصحیح‌شده حاصل می‌شود (p_{tc}). ظرفیت نگهداری

صحیح‌تر از قابلیت مدل‌های یادشده در برآورد مقدار ساقاب در سناریوهای مختلف مقدار باران است.

میلی‌متر)، زیاد (۱۰/۰۰-۷/۵۱ میلی‌متر) و خیلی زیاد (۱۰/۰۰ > میلی‌متر) دسته‌بندی شدند (Sadeghi et al., 2015b, 2017). دلیل این کار، درک

جدول ۲- روابط تشکیل‌دهنده مدل‌های فیزیکی مبنای برآورد ساقاب (S_f)

معادله	مدل
$\sum_{j=1}^q S_{f,j} = p_t \sum_{j=1}^q P_{g,j} - qS_t$	Gash
$\sum_{j=1}^q S_{f,j} = cp_t \sum_{j=1}^q \left(1 - \frac{\bar{E}}{R_j}\right) \times (P_{g,j} - P'_{g,j}) - qcS_t$	Gash-1
$\sum_{j=1}^q S_{f,j} = cp_{tc} \sum_{j=1}^q \left(1 - \frac{\bar{E}_c}{R_j}\right) \times (P_{g,j} - P'_{g,j}) - qcS_{tc}$	Gash-2

در این روابط، N تعداد داده مشاهده‌شده، P_i مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل (مقدار برآوردشده)، O_i مقدار مشاهده‌شده (مقدار اندازه‌گیری شده) و \bar{O} میانگین داده‌های مشاهداتی است. $RMSE$ آماره‌ای است که برای ارزیابی خطای مدل استفاده می‌شود، دامنه آن بین صفر تا مثبت بی‌نهایت است و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، خطای مدل کمتر است. CE آماره‌ای است که برای ارزیابی کارایی مدل استفاده می‌شود و بازه این ضریب بین منفی بی‌نهایت تا ۱ است و هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل کارایی بهتری دارد و مقادیر کمتر از صفر، نشان‌دهنده ناکارآمدی مدل است. در تحقیقات اکوهیدرولوژیک، مقادیر CE بیشتر از ۰/۵ را قابل قبول می‌دانند. IA آماره‌ای است که برای تطابق‌پذیری مدل استفاده می‌شود و مقدار آن بین صفر تا ۱ است و مقادیر بیشتر از ۰/۷ قابل قبول‌اند (Dawson et al., 2007).

نتایج

مقدار بارندگی و ساقاب

در این پژوهش ۱۶۵ رخداد بارندگی با مقدار جمعی ۷۳۰/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد (با متوسط ۴/۴ میلی‌متر در هر رخداد). کمترین و بیشترین

روش تحلیل

در این پژوهش از داده‌های دو سال اول پژوهش برای اجرای مدل و از داده‌های سال سوم برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شد. از ضریب همبستگی پیرسون (r) نیز برای تعیین معنی‌داری همبستگی بین مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری‌شده ساقاب استفاده شد. همچنین برای ارزیابی مدل‌های تحت بررسی، از سه آماره ریشه میانگین مربع خطا ($RMSE$)، ضریب کارایی (CE)^۱ و شاخص تطابق‌پذیری مدل (IA)^۲ بهره گرفته شد (رابطه‌های ۱ تا ۳؛ Dawson et al., 2007).

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

1. Coefficient of Efficiency (CE)
2. Index of Agreement (IA)

نسبی ساقاب (مقدار ساقاب در هر رخداد بارندگی) ۳/۹ درصد بود.

مقادیر پارامترهای اکوهیدرولوژیک برای مدل سازی ها

مقدار پارامترهای اکوهیدرولوژیک برای مدل های فیزیکی مبنا در جدول ۳ ارائه شده است.

رخداد بارندگی اندازه گیری شده به ترتیب ۰/۵ و ۱۹/۰ میلی متر بود. ۵۸ رخداد بارندگی در سال اول پژوهش (میانگین: ۴/۷ میلی متر در هر رخداد باران)، ۶۱ رخداد بارندگی در سال دوم پژوهش (میانگین: ۴/۲ میلی متر در هر رخداد باران) و ۴۶ رخداد بارندگی در سال سوم پژوهش (میانگین: ۴/۴ میلی متر در هر رخداد باران) اندازه گیری شد. نتایج این پژوهش نشان داد که سهم تجمعی ساقاب برابر با ۸/۸ درصد و سهم

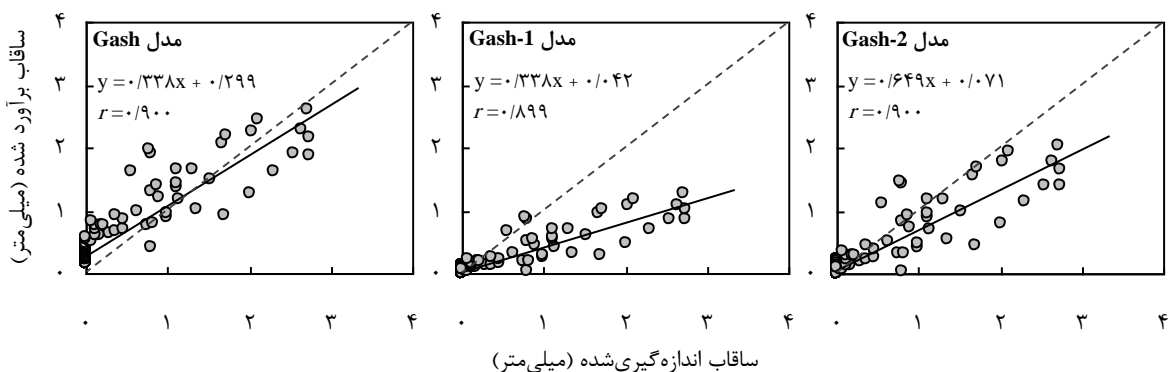
جدول ۳- مقادیر پارامترهای اکوهیدرولوژیک توده کاج تهران برای استفاده در مدل های فیزیکی مبنا برآورد ساقاب

p_t	q	S_t (میلی متر)	\bar{E}/\bar{R}	P'_g (میلی متر)	P''_g (میلی متر)	p_{tc}	\bar{E}_c/\bar{R}	S_{tc} (میلی متر)
۰/۱۴	۷۵	۰/۲۳	۰/۰۲	۱/۷۸	۱/۵۹	۰/۲۴	۰/۰۳	۰/۳۸

برآورد شده و اندازه گیری شده در هر سه مدل حاصل شد (شکل ۱). بر اساس نزدیکی خط رگرسیون خطی به خط ۱:۱، بهترین حالت در مدل Gash و بدترین حالت در مدل Gash-1 حاصل شد (شکل ۱).

مقایسه کارایی مدل های فیزیکی مبنا در برآورد ساقاب

شکل ۱، نتایج اجرای مدل های مختلف در برآورد مقدار ساقاب را نشان می دهد. بر اساس مقدار ضریب همبستگی قوی و معنی داری بین مقادیر



شکل ۱- مقادیر ساقاب برآورد و اندازه گیری شده توده کاج تهران با استفاده از داده های دو سال اول پژوهش در مدل های مختلف فیزیکی مبنا. هر دایره، به یک رخداد باران اشاره دارد. خط چین بیانگر خط ۱:۱ است.

نسبت به دو مدل یاد شده از مقدار ساقاب می دهد (جدول ۴). مدل Gash مقدار ساقاب را بیشتر از مقدار اندازه گیری شده و مدل های Gash-1 و Gash-2 کمتر از مقدار اندازه گیری شده برآورد می کنند.

نتایج مرحله ارزیابی مدل نشان می دهد که مدل های Gash و Gash-2 به ترتیب قابلیت بسیار مطلوبی در برآورد ساقاب دارند و مدل Gash-1 این اقلیم و گونه درختی، برآوردی با صحت کمتر

جدول ۴- مقادیر آماره‌های ارزیابی عملکرد مدل برای برآورد مقدار ساقاب کل در توده کاج تهران

مدل	آماره ارزیابی عملکرد مدل		
	IA	CE	RMSE (میلی‌متر)
Gash	۰/۹۷	۰/۸۹	۰/۲۸
Gash-1	۰/۷۹	۰/۵۹	۰/۵۵
Gash-2	۰/۹۵	۰/۸۷	۰/۳۰

برآوردکننده مقدار ساقاب در طبقه باران‌های با مقدار کم (۲/۵۱ تا ۵/۰۰ میلی‌متر) و متوسط (۵/۰۱ تا ۷/۵۰ میلی‌متر) مدل Gash-2 و بهترین مدل برآوردکننده در طبقه باران مقدار زیاد (۷/۵۱ تا ۱۰/۰۰ میلی‌متر) و خیلی زیاد (بیشتر از ۱۰/۰۰ میلی‌متر) مدل Gash تعیین شد (جدول ۵).

برای درک صحیح‌تر قابلیت هر مدل در برآورد ساقاب، نتایج مدل‌های فیزیکی مبنای در طبقه‌های مختلف مقدار باران ارزیابی شد (جدول ۵). بر این اساس، عملکرد هر سه مدل در برآورد مقدار ساقاب در طبقه باران با مقدار خیلی کم (۰/۰۱ تا ۲/۵ میلی‌متر) نامطلوب است (جدول ۵). بهترین مدل

جدول ۵- مقادیر آماره‌های ارزیابی عملکرد مدل برای برآورد مقدار ساقاب در هر طبقه مقدار باران

مدل برآوردی	طبقه مقدار باران (میلی‌متر)	آماره ارزیابی عملکرد مدل		
		IA	CE	RMSE (میلی‌متر)
Gash	۰/۰۱-۲/۵۰	۰/۲۹	-۹۹۹/۰	۰/۰۰
	۲/۵۱-۵/۰۰	۰/۲۸	-۴/۷۶	۰/۵۰
	۵/۰۱-۷/۵۰	۰/۲۲	-۰/۰۹	۰/۷۵
	۷/۵۱-۱۰/۰۰	۰/۱۶	۰/۴۴	۰/۸۵
	بیشتر از ۱۰/۰۰	۰/۳۵	۰/۹۴	۰/۹۸
Gash-1	۰/۰۱-۲/۵۰	۰/۰۴	-۹۹۹/۰	۰/۰۰
	۲/۵۱-۵/۰۰	۰/۰۷	۰/۶۳	۰/۸۱
	۵/۰۱-۷/۵۰	۰/۲۲	-۰/۱۳	۰/۶۴
	۷/۵۱-۱۰/۰۰	۰/۳۹	-۲/۵۷	۰/۵۴
	بیشتر از ۱۰/۰۰	۱/۶۱	-۰/۳۴	۰/۶۵
Gash-2	۰/۰۱-۲/۵۰	۰/۰۷	-۹۹۹/۰	۰/۰۰
	۲/۵۱-۵/۰۰	۰/۰۶	۰/۷۱	۰/۹۰
	۵/۰۱-۷/۵۰	۰/۰۹	۰/۸۰	۰/۹۳
	۷/۵۱-۱۰/۰۰	۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۸۰
	بیشتر از ۱۰/۰۰	۰/۸۸	۰/۶۰	۰/۸۷

بحث

این پژوهش نشان داد که ساقاب سهم زیادی از چرخه توزیع اجزای بارندگی را در متداول‌ترین گونه سوزنی‌برگ استفاده‌شده در فضای سبز شهری و جنگلکاری‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور - کاج تهران - به خود تخصیص می‌دهد. مقدار ساقاب گزارش‌شده در این پژوهش، در دامنه اعداد گزارش‌شده در مورد دیگر سوزنی‌برگان (۰/۲ تا ۲۷/۰ درصد) قرار دارد (Ford & Deans, 1978; Návar, 2013; Van Stan & Gordon, 2018). یکی از دلایل زیاد بودن درصد ساقاب در گونه کاج تهران، می‌تواند خاصیت آب‌گریزی برگ‌های درختان باشد، زیرا این خاصیت در دیگر گونه‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا گزارش شده است (Holder, 2012). هرچند نیاز به بررسی این خاصیت و تعیین مقدار آن برای گونه کاج تهران در تحقیقات آتی دیده می‌شود. در تحقیقی در گونه‌های درختچه‌ای در اقلیم نیمه‌خشک مکزیک نشان داده شده است که گردوغبار و همچنین وجود آلاینده‌ها در هوا، می‌تواند سبب آب‌گریزی برگ‌ها و در نتیجه افزایش مقدار ساقاب و تاج‌بارش و کاهش مقدار باران‌ربایی شود (Navar & Bryan, 1990). از آنجا که پارک جنگلی چیتگر در کنار آزادراه تهران-کرج و کارخانه‌های زیاد واقع شده است، آلودگی هوا می‌تواند سبب آب‌گریزی برگ‌های درختان کاج تهران شود. همچنین از آنجا که در منطقه تحقیق، رخدادهای باران با شدت زیاد، فراوان است و در بارندگی‌های شدید، سهم زیادی از هر رخداد باران به ساقاب تبدیل می‌شود (Mauchamp & Janeau, 1993)، سهم به‌نسبت زیادی از چرخه توزیع اجزای بارندگی به ساقاب تخصیص یافت. همچنین معماری تاج‌پوشش گونه کاج تهران، سبب افزایش مقدار ضریب ساقاب شده است، به طوری که در تحقیق قبلی با دوره دوساله اندازه‌گیری، مقدار ضریب قیف‌شکل تاج‌پوشش توده کاج تهران در منطقه تحقیق ۸/۵۴ حاصل شد که

نشان می‌دهد (Sadeghi & Attarod, 2017) این ضریب ارتباط زیادی با معماری تاج‌پوشش دارد و نشان‌دهنده کارایی تاج‌پوشش در تولید ساقاب است (McKee, 2010). چنانچه مقدار ضریب قیف‌شکل تاج‌پوشش برابر با ۱ باشد، نشان می‌دهد که مقدار ساقاب اندازه‌گیری‌شده درخت برابر است با مقدار باران اندازه‌گیری‌شده در فضای باز با دهانه باران‌سنجی برابر با سطح مقطع تنه درخت. همچنین، مقادیر بیشتر از یک ضریب قیف‌شکل تاج‌پوشش نشان‌دهنده این است که شاخه‌های درختان در تولید ساقاب نقش داشتند و هرچه این مقدار بزرگ‌تر شود، بیانگر این است که تأثیر شاخه‌های درختان در تولید ساقاب افزایش یافته است (Herwitz, 1986; Li et al., 2009)؛ بنابراین مقدار ضریب قیف‌شکل تاج‌پوشش بیشتر از یک نشان می‌دهد که تاج‌پوشش درختان، آب باران را به سمت تنه هدایت می‌کند. بنابراین با توجه به یافته‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که در دیگر پژوهش‌ها، مقدار ساقاب اندازه‌گیری شود.

مقادیر حاصل‌شده پارامترهای اکوهیدرولوژیک درختان در دامنه ارائه‌شده توسط دیگر پژوهشگران در گونه‌های سوزنی‌برگ قرار دارد (برای اطلاعات بیشتر در زمینه پارامترهای اکوهیدرولوژیک درختان سوزنی‌برگ به مقاله (Sadeghi & Attarod, 2017) مراجعه شود).

بر اساس یافته‌های این پژوهش، مدل‌های Gash و Gash-2 به ترتیب قابلیت بسیار مطلوبی در برآورد ساقاب دارند. در دیگر پژوهش‌ها نیز نتایج مشابهی گزارش شده است (Valente et al., 1997; Su et al., 2016; Su et al., 2017). برای نمونه، (Sadeghi et al., 2017) در پژوهش خود در چین درباره جنگل‌های آمیخته پهن‌برگ به این نتیجه رسیدند که مدل Gash-2 مقدار ساقاب را کمتر از مقدار اندازه‌گیری‌شده برآورد می‌کند. در پژوهش دیگر، در گونه عرعر در پارک جنگلی چیتگر تهران،

زیرا مناطق حاصلخیز خاک در اطراف تنه درختان را مشخص می‌کند و نشان می‌دهد که در صورت عملیات اصلاحی خاک، در چه نقاطی نیاز به دخالت انسانی دیده می‌شود. اندازه‌گیری دقیق ساقاب، کاری وقتگیر و پرهزینه است که امکان آن در همه نقاط کشور وجود ندارد. از این‌رو پژوهشگران همواره به دنبال مدل‌هایی با دقت بیشتری در برآورد صحیح مقدار این پارامتر اکوهیدرولوژیک پوشش گیاهی بوده‌اند. برآورد مقدار ساقاب، به‌عنوان یک ورودی نقطه‌ای در چرخه آب و چرخه زیست‌شیمیایی جنگل، تا کنون تنها در یک پژوهش مورد توجه پژوهشگران داخل کشور قرار گرفته است که باید در تحقیقات آتی در دیگر بوم‌سازگان‌ها بررسی شود. تاکنون سه مدل فیزیکی مبنای در برآورد ساقاب در جهان معرفی شده که نتایج این پژوهش نشان داد مدل Gash و اصلاح‌شده Gash-2 در برآورد ساقاب گونه کاج تهران، کارایی بسیار مطلوبی دارند، هرچند که قابلیت آنها در طبقه‌های مختلف مقدار باران متفاوت است؛ به‌طوری که در مقدار باران‌های کم و متوسط مدل Gash-2 و در مقدار باران‌های زیاد و خیلی زیاد مدل Gash عملکرد بسیار مناسبی از خود نشان دادند. در یک جمع‌بندی می‌توان بیان داشت که مدل Gash به‌دلیل نیاز به ورودی‌های کم‌تر، می‌تواند کاربردی‌تر باشد. مدل‌های فیزیکی مبنای به‌دلیل بهره‌گیری از ترکیبی از پارامترهای اقلیمی (مقدار باران و شدت باران) و پارامترهای پوشش گیاهی (درصد تاج‌پوشش)، توانایی مناسبی در برآورد ساقاب جنگلکاری‌های کاج تهران از خود نشان دادند. با توجه به تغییر پارامترهای اقلیمی که فراوانی رخدادهای باران در طبقه‌های مختلف مقدار باران تحت تأثیر آن قرار می‌گیرد، باید از مدل‌های مناسب فیزیکی مبنای برای برآورد مقدار ساقاب استفاده شود.

(Sadeghi et al., 2017) به این نتیجه رسیدند که مدل Gash-2 دارای صحت مناسبی در برآورد مقدار ساقاب است و به‌صورت کلی، مقدار ساقاب را کمتر از مقدار مشاهده‌شده برآورد می‌کند.

تفاوت بین عملکرد مدل اصلاح‌شده Gash-2 با مدل Gash در برآورد ساقاب در طبقه‌های مختلف مقدار باران این است که در مدل اصلاح‌شده، درصد تاج‌پوشش (C) وارد مدل شده است و مرور منابع نشان می‌دهد که پارامترهای پوشش گیاهی (مانند C)، در باران‌های با مقدار کم، تأثیرگذارند (Pypker et al., 2005, 2011; Sadeghi et al., 2017, 2018)؛ بنابراین ورود پارامتر درصد تاج‌پوشش، سبب بهبود پیش‌بینی مدل در باران‌های با مقدار کم و متوسط شده است (جدول ۵). همچنین مدل Gash-2 در باران‌های با اندازه زیاد و خیلی زیاد، صحت کمتر (هرچند مناسبی) نسبت به مدل Gash دارد که دلیل احتمالی آن، اهمیت بیشتر این مدل به درصد تاج‌پوشش است، زیرا باید توجه داشت که پارامتر درصد تاج‌پوشش در باران‌های با مقدار زیاد، تأثیر اندکی دارد (Pypker et al., 2011; Sadeghi et al., 2018). در یک جمع‌بندی می‌توان پیشنهاد داد که در صورت وفور رخدادهای باران با مقدار کمتر از ۷/۵ میلی‌متر، از مدل Gash-2 و در صورت فراوانی رخدادهای باران با مقدار بیشتر از ۷/۵ میلی‌متر، از مدل Gash در برآورد ساقاب گونه کاج تهران استفاده شود.

تعیین دقیق اجزای چرخه‌های اکوهیدرولوژیک در سطوح کوچک و بزرگ مقیاس، به فرایند برنامه‌ریزی دقیق‌تر کمک می‌کند و در نتیجه سبب مدیریت صحیح‌تر منابع آبی می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، با وجود سهم کم ساقاب (نسبت به تاج‌بارش) در هر رخداد باران، به‌دلیل غلظت زیاد عناصر در ساقاب، آگاهی از مقادیر آن در جنگلکاری‌ها بسیار مفید است،

References

- Attarod, P., Sadeghi, S.M.M., Pypker, T.G., Bagheri, H., Bagheri, M., & Bayramzadeh, V. (2015). Needle-leaved trees impacts on rainfall interception and canopy storage capacity in an arid environment. *New Forests*, 46, 339-355.
- Carlyle-Moses, D.E., Flores Laureano, J.S., & Price, A.G. (2004). Throughfall and throughfall spatial variability in Madrean oak forest communities of northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*, 297, 124-135.
- Dawson, C.W., Abrahart, R.J., & See, L.M. (2007). HydroTest: a web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. *Environmental Modelling and Software*, 22, 1034-1052.
- Ford, E.D., & Deans, J.D. (1978). The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young sitka spruce plantation. *Journal of Applied Ecology*, 15, 905-917.
- Gash, J.H.C. (1979). An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105, 43-55.
- Gash, J.H.C., Lloyd, C.R., & Lachaud, G. (1995). Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 170, 79-86.
- Ghorbani, S., & Rahmani, R. (2009). Estimating of interception loss, stemflow and throughfall in a natural stand of oriental Beech (Shastkalateh forest). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 16(4), 638-648.
- Hakimi, L., Sadeghi, S.M.M., Van Stan, J.T., Pypker, T.G., & Khosropour, E. (2018). Management of pomegranate (*Punica granatum*) orchards alters the supply and pathway of rain water reaching soils in an arid agricultural landscape. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 259, 77-85.
- Helvey, J.D., & Patric, J.H. (1965). Design criteria for interception studies. *International Association of Hydrological Sciences*, 67, 131-137.
- Herwitz, S.R. (1986). Infiltration-excess caused by stemflow in a cyclone-prone tropical rainforest. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11(4), 401-412.
- Holder, C.D. (2012). The relationship between leaf hydrophobicity, water droplet retention, and leaf angle of common species in a semi-arid region of the western United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152, 11-16
- Levia, D.F., & Frost, E.E. (2003). A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *Journal of Hydrology*, 274, 1-29.
- Levia, D.F., & Germer, S. (2015). A review of stemflow generation dynamics and stemflow-environment interactions in forest and shrublands. *Review of Geophysics*, 53(3), 673-714.
- Li, X.Y., Yang, Z.P., Li, Y.T., & Lin, H. (2009). Connecting ecohydrology and hydrogeology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential flow in soils. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(7), 1133-1144.
- Mauchamp, A., & Janeau, J.L. (1993). Water funnelling by the crown of *Flourensia cernua*, a Chihuahuan Desert shrub. *Journal of Arid Environments*, 25, 299-306.
- McKee, A.J. (2010). The quantitative importance of stemflow: an evaluation of past research and results from a study in lodgepole pine (*Pinus contorta* Var. *latifolia*) stands in southern British Columbia. Master's Thesis. University of British Columbia. Columbia, Canada, 113 pp.
- Muzylo, A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J.J., Domingo, F., & Gash, J.H.C. (2009). Review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology*, 370, 191-206.
- Návar, J. (2013). The performance of the reformulated Gash's interception loss model in Mexico's northeastern temperate forests. *Hydrological Processes*, 27, 1626-1633.

- Návar, J., & Bryan, R. (1990). Interception loss and rainfall redistribution by three semi-arid growing shrubs in northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*, 115, 51-63.
- Pypker, T.G., Bond, B.J., Link, T.E., Marks, D., & Unsworth, M.H. (2005). The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: Examples from a young and an old-growth Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130, 113-129.
- Pypker, T.G., Levia, D.F., Staelens, J., & Van Stan, J.T. (2011). Canopy structure in relation to hydrological and biogeochemical fluxes. XVII. In: *Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of past research and future directions*, (Eds.): Levia, D.F., Carlyle-Moses, D.E. & Tanaka, T., Ecological Studies Series, No. 216, Springer–Verlag, Heidelberg, Germany, 371-388 pp.
- Sadeghi, S.M.M., & Attarod, P. (2017). Estimation of ecohydrological parameters of trunk and canopy of a *Pinus eldarica* plantation. *Journal of Forest Research and Development*, 3(3), 207-220.
- Sadeghi, S.M.M., Attarod, P., & Pypker, T.G. (2015a). Differences in rainfall interception during the growing and non-growing seasons in a *Fraxinus rotundifolia* Mill. plantation located in a semiarid climate. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17, 145-156.
- Sadeghi, S.M.M., Attarod, P., Van Stan, J.T., Pypker, T.G., & Dunkerley, D. (2015b). Efficiency of the reformulated Gash's interception model in semiarid afforestations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201, 76-85.
- Sadeghi, S.M.M., Attarod, P., Van Stan, J.T., & Pypker, T.G. (2016). The importance of considering rainfall partitioning in afforestation initiatives semiarid climates: A comparison of common planted tree species in Tehran, Iran. *Science of the Total Environment*, 568, 845-855.
- Sadeghi, S.M.M., Van Stan, J.T., Pypker, T.G., & Friesen, J. (2017). Canopy hydrometeorological dynamics across a chronosequence of a globally invasive species, *Ailanthus altissima* (Mill., tree of heaven). *Agricultural and Forest Meteorology*, 240, 10-17
- Sadeghi, S.M.M., Van Stan, J.T., Pypker, T.G., Tamjidi, J., Friesen, J., & Farahnaklangroudi, M. (2018). Importance of transitional leaf states in canopy rainfall partitioning dynamics. *European Journal of Forest Research*, 137, 121–130.
- Shachnovich, Y., Berniler, P., & Bar, P. (2008). Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid zone. *Journal of Hydrology*, 349, 168-177.
- Su, L., Zhao, C., Xu, W., & Xie, Z. (2016). Modelling interception loss using the revised Gash model: a case study in a mixed evergreen and deciduous broadleaved forest in China. *Ecohydrology*, 9, 1580-1589.
- 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, 141-162.
- Van Stan, J.T., & Gordon, D.A. (2018). Stemflow as a resource limitation to near-stem soils. *Frontiers in Plant Science*, 9, 248. DOI:10.3389/fpls.2018.00248.
- Van Stan, J.T., & Stubbins, A. (2018). Tree-DOM: Dissolved organic matter in throughfall and stemflow. *Limnology and Oceanography Letters*, DOI: 10.1002/lol2.10059.



Comparison of different Gash physically-based models for estimating stemflow in an elder pine stand in the Chitgar forest park

S.M.M. Sadeghi¹, P. Attarod^{2*}, O. Bozorg-Haddad³, J.T. Van Stan⁴, and T.G. Pypker⁵

¹PhD Candidate of Silviculture and Forest Ecology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran

²Associate Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran

³Professor, Dept. of Irrigation & Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, University of Tehran, I. R. Iran

⁴Associate Prof., Dept. of Geology and Geography, Georgia Southern University, USA

⁵ Associate Prof., Dept. of Natural Resource Sciences, Faculty of Science, Thompson Rivers University, Canada

(Received: 21 May 2018, Accepted: 1 July 2018)

Abstract

In plant ecohydrology studies, stemflow considered as point input of rainfall into plant ecosystems. To date, due to field measurement, time-consuming and the high cost of stemflow measurements, models are used to estimate the stemflow amounts. The study aimed to test the performance of three physically-based model of Gash and revised versions (Gash-1 and Gash-2) to estimate the stemflow in an elder pine (*Pinus eldarica* Medw.) stand in the Chitgar Forest Park for the three-years study period. Rainfall magnitude and throughfall were measured with 10 and 60 rain-gauges, respectively. Stemflow was measured for 9 trees in each stand that were considered representative of the stand. According to the validation step, Gash and Gash-2 models were found to be the best models to estimate the stemflow, respectively, however the performance of each model was different at each rainfall magnitude class. For the very small rainfall class (lower than 2.50 mm), estimation of all models was incorrect. For the small (2.51-5.00 mm) and medium (5.01-7.50 mm) rainfall classes, Gash-2 was the best model, while Gash model estimated very well for the large (7.51-10 mm) and very large (more than 10.00 mm) rainfall classes. In conclusion, Gash model requires few input variables, hence would be more applicable than to other models. Due to climate change, which is affected by the frequency of rainstorms in different rainfall magnitude classes, it is necessary to use appropriate models to estimate the amount of stemflow.

Keywords: Forest ecohydrology, plantation, *Pinus eldarica*, rain water input.

