مقاله پژوهشی

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و سوم، شماره ده، دی ماه ۱۴۰۰(۷۱-۶۱)

کارکرد مدل Gash اصلاح شده در برآورد باران‌ربایی جنگل‌کاری اقاقیا در دوره‌های برگ‌دار و بی‌برگی

سینا ضیایی شندرشامی [۱]

آمنه میان‌آبادی [۲*]

a.mianabadi@kgut.ac.ir

سید محمدمعین صادقی [۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۴ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۲۹**

چکیده

زمینه و هدف: *هدف این پژوهش، ارزیابی مدل Gash اصلاح شده در برآورد باران‌ربایی گونه غیربومی اقاقیا (Robinia pseudoacacia L.) در دوره‌های برگ‌دار و بی‌برگی در پارک جنگلی چیتگر بود.*

روش بررسی: یک قطعه‌نمونه دایره‌ای شکل با وسعت ۰/۵ هکتار در پارک جنگلی چیتگر انتخاب شد و باران، تاج‌بارش و ساقاب به مدت دو سال (۱ دی ۱۳۹۲ تا ۳۰ آذر ۱۳۹۴) در این قطعه‌نمونه اندازه‌گیری شد. سپس مبادرت به محاسبه مقادیر پارامترهای اکوهیدرولوژیک تاج‌پوشش و تنه درختان شد و در نهایت کارآیی مدل Gash اصلاح شده در برآورد باران‌ربایی بررسی شدند.

یافته‌ها: مقدار متوسط باران‌ربایی در دوره برگ‌دار (۱۲/۷ درصد) به‌طور معنی‌داری بیشتر از دوره بی‌برگی (۹/۷ درصد) بود. مقدار ضریب R^2 بین مقادیر باران‌ربایی برآورد شده و اندازه‌گیری در دوره بی‌برگی بیشتر از دوره برگ‌دار حاصل شد. براساس کلیه آماره‌های ارزیابی مدل، کارکرد مدل Gash در برآورد باران‌ربایی در دوره بی‌برگی بهتر از دوره برگ‌دار حاصل شد.

بحث و نتیجه‌گیری: براساس یافته‌های این پژوهش، مدل Gash اصلاح شده قابلیت مناسبی در برآورد باران‌ربایی در دوره بی‌برگی از خود نشان داد و دلیل احتمالی خطای زیاد برآوردی مدل در دوره برگ‌دار، عدم اندازه‌گیری مستقیم پارامتر درصد تاج‌پوشش است. تعیین دقیق مقدار باران‌ربایی، به‌عنوان اتلاف آبی تاج‌پوشش، به فرآیند برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری مدیران جنگل و منابع آب در انتخاب گونه مناسب برای جنگلکاری‌ها کمک مهمی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: اکوهیدرولوژی جنگل، پارامترهای اکوهیدرولوژیک تاج‌پوشش، پارامترهای اکوهیدرولوژیک تنه، جنگل دست‌کاشت.

۱- کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲- استادیار گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران. * (مسوول مکاتبات)

۳- پژوهشگر پسادکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکدهٔ جنگل‌شناسی و مهندسی جنگل، دانشگاه ترنسیلوانیا براشوف، براشوف، رومانی.

J. Env. Sci. Tech., Vol 23, No. 10, January, 2022

Performance of Revised Gash Model for Estimating Rainfall Interception in a *Robinia pseudoacacia* plantation during the leafed and leafless periods

Sina Ziaye Shendershami [1]
Ameneh Mianabadi [2*]
a.mianabadi@kgut.ac.ir
Seyed Mohammad Moein Sadeghi [3]

Admission Date:June 19, 2021 Date Received: April 24, 2021

Abstract

Background and Objectives: Therefore, this study aimed to evaluate the revised Gash model in estimating interception by a *Robinia pseudoacacia* (L.) stand during the leafed and leafless periods in Chitgar Forest Park.

Material and Methodology: A circular plot with an area of 0.5 ha in Chitgar Forest Park was selected and rainfall, throughfall, and stemflow were measured for two years (from 22 December 2013 to 21 December 2015). Then, the amounts of canopy and trunks ecohydrological parameters were calculated, and finally, the efficiency of the revised Gash model for estimating interception was evaluated.

Findings: In this study, the mean amount of rainfall interception in the leafed period (12.7%) was significantly higher than the leafless period (9.7%). The determination coefficient (R^2) value between the estimated interception values and the measured in the leafless period was higher than in the leafed period. Based on all model evaluation metrics, the performance of the revised Gash model in estimating interception in the leafless period was better than in the leafed period.

Discussion and Conclusion: Based on the findings of this study, the Revised Gash model showed good ability in estimating interception during the leafless period, and a probable reason for the high estimation error of the model in the leafed period is the lack of direct measurement of the canopy percentage parameter. Accurately determining the amount of interception, as a canopy water loss, contributes significantly to the planning and decision-making process of forest managers and water resources managers for selecting the appropriate species for plantations.

Keywords: Canopy ecohydrological parameters, Forest ecohydrology, Planted forest, Trunk ecohydrological parameters.

1- M.Sc. of Watershed, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2- Assistant Professor, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. **(Corresponding Author)*
3- Postdoctoral Researcher, Faculty of Silviculture and Forest Engineering, Transilvania University of Brasov, Brasov, Romania.

مقدمه

اکوهیدرولوژی به‌عنوان دانشی نوین در علم جنگل به‌دنبال شناخت ارتباط متقابل بین چرخه‌های هیدرولوژیک و اجزای اکوسیستم‌ها است. در دانش اکوهیدرولوژی، توزیع اجزای باران توسط پوشش جنگلی به تاج‌بارش، ساقاب و باران‌ربایی، بخش مهمی از مطالعات اکوهیدرولوژی جنگل را در بر می‌گیرد و چاپ کتاب تخصصی در این باره در انتشارات اشپرینگر در سال گذشته میلادی، نشان‌دهنده‌ی اهمیت جهانی این موضوع است (۱). دلیل اهمیت فرآیند توزیع اجزای باران در اکوهیدرولوژی جنگل این است که تاج‌پوشش درختان به عنوان اولین مانع برخوردکننده باران در اکوسیستم‌های جنگلی به‌شمار می‌آیند که بر ویژگی‌های کمی و کیفی (منظور خصوصیات شیمیایی) آب رسیده به کف جنگل و هم‌چنین تبخیر آب باران اثرگذار است. از بین اجزای چرخه توزیع مجدد باران هنگام برخورد با تاج‌پوشش درختان، پارامتر باران‌ربایی بیشترین تعداد مطالعات را به خود تخصیص داده است، زیرا به عنوان اتلاف آبی تاج شناخته می‌شود. در واقع باران‌ربایی، قسمتی از هر رخداد باران است که در هنگام بارندگی یا پس از آن، با ذخیره شدن بر روی برگ‌ها، شاخه‌ها و تنه پوشش گیاهی از سطوح یاد شده تبخیر شده و از دسترس پوشش گیاهی کف جنگل خارج می‌شود و به‌عنوان هدررفت یا اتلاف آبی تاج‌پوشش و تنه شناخته می‌شود (۲). از اولین مطالعه درباره باران‌ربایی درختان در اکوسیستم-های جنگلی کشور، حدود ۱۵ سال گذشته است که نشان-دهنده‌ی نوپا بودن مطالعات اکوهیدرولوژی جنگل در داخل کشور است.

نرخ تخریب جنگل‌ها در یک قرن گذشته سبب شده است که انجام عملیات جنگل‌کاری و احیای مناطق تخریب یافته، یکی از راهکارهای مهم اجرایی سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، به‌عنوان متولی اصلی حفظ و توسعه منابع طبیعی کشور به-شمار آید (۳). انتخاب گونه‌های مناسب درختی و درختچه‌ای (چه از نوع بومی یا غیربومی) به‌منظور جنگل‌کاری و توسعه فضای سبز شهری، امری دشوار و بسیار مهم است، زیرا کاشت هر گونه بایستی از نظر سازگاری و تاثیر آن بر محیط اطراف بررسی شود. به‌عنوان یک اصل کلی، باید گونه‌ای انتخاب شود که متناسب با شرایط محیطی محل موردنظر باشد، به‌عبارت‌دیگر، باید بتواند با وضع اقلیمی و خاکی آن محل سازگار باشد و با عامل‌های زنده موجود در آن تطبیق پیدا کند. از سوی دیگر، با توجه به این که دو سوم سطح کشور را اقالیم خشک و نیمه‌خشک در بر گرفته‌اند، از نقطه نظر توزیع اجزای باران، باید گونه‌هایی انتخاب شوند که مقدار باران‌ربایی در آن‌ها کم و مقدار باران خالص (تاج‌بارش + ساقاب) در آن‌ها زیاد باشد (۳، ۴) تا بتوان به صورت بهینه از آب باران بهره گرفت. بنابراین آگاهی از مقدار باران‌ربایی گونه‌های مختلف درختی و درختچه-ای، امری ضروری برای مدیران منابع طبیعی کشور در هنگام انتخاب گونه برای جنگل‌کاری و توسعه فضای سبز شهری محسوب می‌شود و در این بین، مدل‌سازی باران‌ربایی، می‌تواند ابزاری کارا در کمی‌سازی این مولفه چرخه هیدرولوژی به‌شمار بیاید. در واقع با استفاده از مدل‌سازی باران‌ربایی، می‌توان پیش‌بینی کرد که در آینده و با توجه به تغییرات اقلیمی که بر تغییرات خصوصیات باران (مانند شدت و مقدار باران) اثرگذار است، مقدار باران‌ربایی هر گونه درختی و درختچه‌ای چقدر خواهد بود. بسته به هدف و امکانات، مدل‌های مختلفی برای برآورد توزیع اجزای باران در دنیا ارائه‌شده است که نکته مثبت مدل‌سازی، استفاده‌ی آسان، حجم کار پایین و هزینه‌ی استفاده کم (به دلیل عدم نیاز به دستگاه‌های پیچیده برای اندازه‌گیری)، در برآورد باران‌ربایی است (۵).

در بین مدل‌های مختلف باران‌ربایی، بیشترین کاربرد را مدل Gash اصلاح شده (۶) دارد که در پیش‌بینی باران‌ربایی گونه-های جنگلی و کشاورزی کارا است (۵، ۷) که تنها در یک پژوهش در داخل کشور، کارآیی این مدل بررسی شده است (۷). در بیشتر مواقع هنگام برآورد باران‌ربایی توده‌های پهن‌برگ خزان‌کننده از مدل‌های فیزیکی‌مبنا بهره می‌گیرند و این مدل-ها در دوره‌های سالانه بررسی می‌شود که غالباً خطای برآوردی مدل از حد مطلوب بالاتر است و شاید با بررسی این مدل‌ها در سنجه‌های زمانی بر مبنای فنولوژی درختان (منظور دوره‌های

برگ‌دار و بی‌برگی) بتوان به بهبود کارکرد این مدل‌ها اقدام نمود. اقاقیا (*Robinia pseudoacacia* L.) درختی از خانواده لگومینوزه است که از زمان قدیم وارد ایران شده است. از نظر خواهش‌های اکولوژیکی، گونه‌ای مقاوم به گرما، سرما و خشکی است و به‌دلیل سازگاری مناسب اقاقیا با بیشتر نقاط کشور، امروزه سطح وسیعی از جنگل‌کاری‌های کشور را این گونه به خود تخصیص داده است. بنابراین هدف این پژوهش، ارزیابی مدل Gash اصلاح شده در برآورد باران‌ربایی توده اقاقیا (*R. pseudoacacia*) در دوره‌های برگ‌دار و بی‌برگی در پارک جنگلی چیتگر است.

روش بررسی

- منطقه پژوهش

به‌منظور محاسبه‌ی مقادیر اجزای بارش، قطعه‌نمونه دست-کاشت ۵۰ ساله‌ی اقاقیا واقع در پارک جنگلی چیتگر، انتخاب شد. پارک جنگلی چیتگر (عرض شمالی ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه و طول شرقی ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه با دامنه‌ی ارتفاع از سطح دریای ۱۲۲۵ تا ۱۳۱۳ متر) در سال ۱۳۴۲ خورشیدی توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع احداث شد. این پارک با وسعتی برابر ۱۴۵۰ هکتار از مهم‌ترین پارک‌های کلان‌شهر تهران است که در غرب تهران قرار داشته و از شمال به منطقه کَن تهران، از غرب به پیکان‌شهر و آزادشهر و مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور و از شرق به منطقه خرگوش دره و از جنوب به اتوبان تهران - کرج محدود می‌شود. هدف از احداث این پارک جنگلی، بالا بردن مقدار اکسیژن هوای تهران (به دلیل اینکه بادهای شهر تهران غالباً از سمت غرب می‌وزند)، تفرّج و جلوگیری از توسعه‌ی شهری بوده است و امروزه این پارک یکی از نمونه‌های موفق از عملیات جنگل‌کاری توسط سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور به شمار می‌آید. بر اساس اطلاعات هواشناسی ایستگاه همدیدی چیتگر (فاصله تقریبی چهار کیلومتر از قطعه‌نمونه مورد بررسی)، میانگین بارندگی سالانه ۲۵۲/۶ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است که مرطوب‌ترین ماه سال اسفند با میانگین بارش ماهانه ۴۹ میلی‌متر و خشک‌ترین ماه سال مرداد با میانگین بارش ماهانه دو میلی‌متر ثبت‌شده است. میانگین دمای سالانه ۱۸/۵ درجه سانتی‌گراد است که گرم‌ترین و سردترین ماه‌های سال به ترتیب مرداد با میانگین ۲۹/۹ درجه سانتی‌گراد و دی با میانگین دمای ۳/۸ درجه سانتی‌گراد هستند.

- روش پژوهش

برای اندازه‌گیری تاج‌بارش و ساقاب در پارک جنگی چیتگر، یک قطعه‌نمونه دایره‌ای شکل با وسعت ۰/۵ هکتار انتخاب شد. در این قطعه‌نمونه، کلیه درختان از نظر سلامت و شادابی در وضعیت سالم قرار داشتند. به‌منظور برآورد مقادیر توزیع اجزای باران، بارندگی‌ها به مدت دو سال (از ۱ دی ماه ۱۳۹۲ تا ۳۰ آذر ۱۳۹۴) اندازه‌گیری شدند. مقدار باران در هر رخداد، با استفاده از ۱۰ باران‌سنج دستی (قطر دهانه هشت سانتی‌متر و عمق ۲۲ سانتی‌متر) در نزدیک‌ترین فضای باز به قطعه‌نمونه که به‌صورت کاملاً عمودی در کف جنگل مستقر گردیدند، جمع‌آوری شد. برای اندازه‌گیری تاج‌بارش، بر اساس طرحی تصادفی (۳، ۴، ۵)، ۶۰ باران‌سنج دستی، در زیر تاج‌پوشش درختان نصب شدند. در پژوهش حاضر، ساقاب ۹ پایه درخت اندازه‌گیری شد؛ بدین‌صورت که از ناودان‌های لاستیکی با قطر شش سانتی‌متر استفاده شد و این ناودان‌ها حداقل ۱/۵ دور به دور تنه‌ی درختان پیچیده شدند (۴). فاصله‌ی بین ناودان‌های لاستیکی جمع‌آوری ساقاب و پوست درختان، توسط چسب سیلیکونی عایق‌بندی و درزگیری شدند. هدف از این کار، جلوگیری از عبور آب از فاصله‌ی بین ناودان‌ها و پوست درختان بود. این ناودان‌های لاستیکی در ارتفاع برابرسینه نصب و خروجی آن‌ها به ظرف‌های جمع‌آوری‌کننده ۲۰ لیتری، توسط یک شلنگ (قطر هفت سانتی‌متر و طول تقریباً یک متر)، متصل گردید. این ناودان‌ها به‌گونه‌ای نصب شدند که با داشتن شیب به سمت پایین و شکل مارپیچی، آب جاری‌شده بر روی تنه را جمع و آن را از طریق شلنگ متصل‌کننده به ظرف‌های جمع‌آوری‌کننده ۲۰ لیتری انتقال دهند. در نهایت، از کسر مجموع تاج‌بارش و ساقاب از مقدار باران در هر رخداد، مقدار باران‌ربایی محاسبه شد.

- مدل Gash اصلاح شده

برای راه‌اندازی مدل Gash اصلاح شده (۶)، محاسبه مقادیر پارامترهای اکوهیدرولوژیک تاج‌پوشش شامل نقطه اشباع آب تاج‌پوشش برآوردی ($P'_{g\text{-}Estimated}$)، نقطه اشباع آب تاج‌پوشش محاسباتی (P'_g)، ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش (S)، ضریب تاج‌بارش مستقیم (p)، نسبت تبخیر در زمان بارندگی به شدت باران ($\overline{E}/\overline{R}$)، ظرفیت نگهداری آب تنه (S_t)، ضریب ساقاب (p_t)، نقطه اشباع آب تنه (P''_G) و هم‌چنین مقدار باران (P_G) در هر رخداد نیاز است که نحوه محاسبه این پارامترها در پژوهش‌های قبلی در داخل کشور به دفعات عنوان شده است (۸). پس از محاسبه پارامترهای اکوهیدرولوژیک، باران‌ربایی با استفاده از مدل Gash اصلاح شده از مجموعه باران‌ربایی تعداد m رخداد باران ناکافی برای اشباع تاج‌پوشش (I_c) و تعداد n رخداد باران کافی برای تاج‌پوشش (I_n) برآورد شد.

برای راه‌اندازی این مدل، باران‌ربایی کل (I_t) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$I_t = I_c + I_n + I''_t + I'''_t \qquad (۱)$$

که در این رابطه، I_c باران‌ربایی در زمان رخدادهای باران که برای اشباع آبی تاج‌پوشش کافی نیستند (رابطه ۲)، I_n باران‌ربایی تعداد n رخداد باران کافی برای اشباع آب تاج‌پوشش (رابطه ۳)، I''_t باران‌ربایی از سطح تنه در زمان تعداد q رخداد باران کافی برای اشباع آب تنه (رابطه ۴) و I'''_t باران‌ربایی از سطح تنه در زمان تعداد $m + n - q$ رخداد باران ناکافی برای اشباع آب تنه است (رابطه ۵).

$$I_c = c\sum_{j=1}^{m} P_{g\,j} \qquad (۲)$$

$$I_n = I_w + I_a + I_s \qquad (۳)$$

$$I''_t = qS_t \qquad (۴)$$

$$I'''_t = (qS_t + p_t)\sum_{j=1}^{m+n-q} P_{g\,j} \qquad (۵)$$

در این روابط، c تاج‌پوشش (درصد)، m تعداد رخدادهای باران ناکافی برای اشباع آب تاج‌پوشش، P_g مقدار باران در هر رخداد (میلی‌متر)، I_w باران‌ربایی مقدار بارانی است که صرف مرطوب کردن تاج‌پوشش می‌شود (میلی‌متر، رابطه ۶)، I_a مقدار تبخیر از تاج‌پوشش بعد از توقف باران (میلی‌متر، رابطه ۷)، I_s مقدار تبخیر بعد از اشباع شدن آب تاج‌پوشش، امّا قبل از قطع بارندگی -یعنی تبخیر در زمان بارندگی- است (میلی‌متر، رابطه ۸)، q تعداد رخدادهای باران کافی برای اشباع آب تنه، S_t ظرفیت نگهداری آب تنه (میلی‌متر)، p_t ضریب ساقاب (بدون واحد) و $m + n - q$ تعداد رخدادهای باران ناکافی برای اشباع آب تنه است.

$$I_w = ncP'_g - ncS_c \qquad (۶)$$

$$I_a = ncS_c \qquad (۷)$$

$$I_s = (\overline{E}/\overline{R})\sum_{j=1}^{n}(P_{g\,j} - P'_g) \qquad (۸)$$

در این روابط، n تعداد رخداد باران کافی برای اشباع آب تاج‌پوشش، P'_g نقطه اشباع آب تاج‌پوشش (میلی‌متر)، S ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش (میلی‌متر)، S_c نسبت S به c (میلی‌متر بر درصد) و $\overline{E}/\overline{R}$ نرخ تبخیر در زمان بارندگی به شدت باران (بدون واحد) است.

- ارزیابی مدل و تجزیه و تحلیل آماری

در این پژوهش، ۷۰ درصد داده‌ها برای راه‌اندازی مدل و ۳۰ درصد داده‌ها برای ارزیابی مدل استفاده شدند (۵). برای ارزیابی مدل، از سه آماره‌ی درصد خطا ($Error$)، ریشه دوم میانگین مربع خطا ($RMSE$)، و ضریب کارآیی (CE) بهره گرفته شد (روابط ۹ تا ۱۱) (۹، ۱۰).

$$Error(\%) = \left(\frac{\left|\overline{O} - \overline{P}\right|}{\overline{O}}\right)\times 100 \qquad (۹)$$

$$RMSE = \left[N^{-1}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2\right]^{0.5} \qquad (۱۰)$$

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \overline{O})^2} \qquad (۱۱)$$

در این روابط، $\overline{O}$ میانگین داده‌های مشاهداتی، $\overline{P}$ میانگین داده‌های برآوردی، N تعداد داده‌ی مشاهده شده، P_i مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل (مقدار برآورد شده) و O_i مقدار

مشاهده‌شده (مقدار اندازه‌گیری شده) است. *RMSE* آماره‌ای هستند که برای ارزیابی خطای مدل استفاده می‌شود، بازه‌ی آن بین صفر تا مثبت بی‌نهایت بوده و هر چه مقدار آن‌ها به صفر نزدیک‌تر باشد، خطای مدل کمتر است. *RMSE* متناسب با واحد اندازه‌گیری متغیر است و مقایسه مقدار آن بین مدل‌های ساخته شده برای دو متغیر با واحدهای متفاوت (مثلاً قطر براساس سانتی‌متر با ارتفاع براساس متر) درست نخواهد بود. *Error* آماره‌ای است که برای ارزیابی درصد خطای مدل استفاده می‌شود و مقدار آن از مثبت بی‌نهایت تا منفی بی‌نهایت است و علایم مثبت و منفی به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی بیش-برآوردی و کم‌برآوردی مدل هستند و هرچه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد، خطای مدل کمتر است. *CE* که به نام ضریب Nash و Sutcliffe's نیز شناخته می‌شود، آماره‌ای است که برای ارزیابی کارکرد مدل استفاده می‌شود و بازه‌ی این ضریب بین منفی بی‌نهایت تا مثبت یک است و هرچه مقدارش به مثبت یک نزدیک‌تر باشد، مدل دارای کارآیی بهتری است و مقادیر بالاتر از ۰/۵+، نشان‌دهنده‌ی کارکرد مناسب مدل است (۹، ۱۰). برای مقایسه بین مقادیر برآورد شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده باران‌ربایی در مرحله ارزیابی مدل، از آزمون t-جفتی در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد استفاده شد و برای این کار از نرم‌افزار R بهره گرفته شد.

یافته‌ها

- خصوصیات باران و باران‌ربایی

طی دوره دوساله اندازه‌گیری، ۷۳ رخداد باران با مقدار تجمعی ۳۸۲/۳ میلی‌متر جمع‌آوری شد که ۲۸ رخداد باران در دوره برگ‌دار (با مقدار تجمعی ۱۳۳/۰ میلی‌متر) و ۴۵ رخداد در دوره بی‌برگی (با مقدار تجمعی ۲۴۹/۳ میلی‌متر) جمع‌آوری شدند. در دوره برگ‌دار، مقدار رخداد باران بین ۰/۶ تا ۱۴/۱ میلی‌متر در نوسان بود و در دوره بی‌برگی این بازه بین ۰/۵ تا ۱۸/۱ میلی‌متر بود. میانگین مقدار باران در دوره برگ‌دار ۴/۸ میلی‌متر (±خطای معیار: ۱/۲ میلی‌متر) و در دوره بی‌برگی ۵/۵ میلی‌متر (±۰/۷ میلی‌متر) بدست آمد. مقدار متوسط باران‌ربایی در دوره برگ‌دار (۱۲/۷ درصد) به‌طور معنی‌داری بیشتر از دوره بی‌برگی (۹/۷ درصد) بود ($P < ۰/۰۵$).

- پارامترهای اکوهیدرولوژیک تاج‌پوشش و تنه

در جدول ۱، مقادیر مشخصه‌های اکوهیدرولوژیک تاج‌پوشش و تنه درختان اشاره شده است. براین اساس، مقادیر پارامترهای اکوهیدرولوژیک تاج‌پوشش شامل ظرفیت نگهداری آب تاج-پوشش، ضریب تاج‌بارش مستقیم و نسبت تبخیر در زمان بارندگی به شدت باران در دوره بی‌برگی بیشتر از دوره برگ‌دار است و تنها پارامتر نقطه اشباع آب تاج‌پوشش در دوره برگ‌دار بیشتر از بی‌برگی حاصل شد (جدول ۱). درباره پارامترهای اکوهیدرولوژیک تنه، مقادیر ظرفیت نگهداری آب تنه و نقطه اشباع آب تنه در دوره برگ‌دار بیشتر از بی‌برگی حاصل شد (جدول ۱).

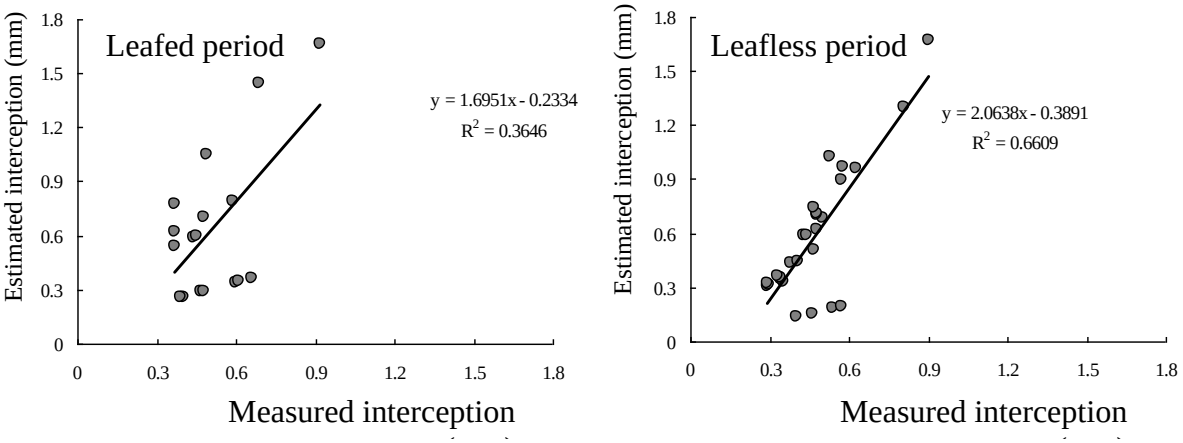
جدول ۱- مقادیر مشخصه‌های اکوهیدرولوژیک تاج‌پوشش و تنه درختان اقاقیا در دوره‌های برگ‌دار و بی‌برگی

Table 1. Amounts of canopy and trunk ecohydrological parameters of *Robinia pseudoacacia* trees in leafed and leafless periods

مشخصه‌های اکوهیدرولوژیک		دوره برگ‌دار	دوره بی‌برگی
تاج‌پوشش	نقطه اشباع آب تاج‌پوشش (P'_g، میلی‌متر)	۱/۳۱	۱/۱۲
	ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش (S، میلی‌متر)	۰/۱۸	۰/۲۲
	ضریب تاج‌بارش مستقیم (p)	۰/۵۳	۰/۵۴
	نسبت تبخیر در زمان بارندگی به شدت باران ($\overline{E}/\overline{R}$)	۰/۰۴	۰/۰۵
تنه	ظرفیت نگهداری آب تنه (S_t، میلی‌متر)	۰/۱۰	۰/۰۶
	ضریب ساقاب (p_t)	۰/۰۷	۰/۰۹
	نقطه اشباع آب تنه (P''_G، میلی‌متر)	۱/۳۶	۰/۶۳

- راه‌اندازی مدل Gash اصلاح شده

برای راه‌اندازی مدل، ۲۷ رخداد باران در دوره بی‌برگی و ۱۷ رخداد باران در دوره بی‌برگی به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. براساس شکل ۱، مقدار ضریب تبیین (R^2) بین مقادیر باران‌ربایی برآورد شده و اندازه‌گیری شده در دوره بی‌برگی بیشتر از دوره برگ‌دار حاصل شد.



شکل ۱- مقادیر باران‌ربایی اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل Gash اصلاح شده

Figure 1. Measured and estimated rainfall interception amount via revised Gash model

- ارزیابی مدل Gash اصلاح شده

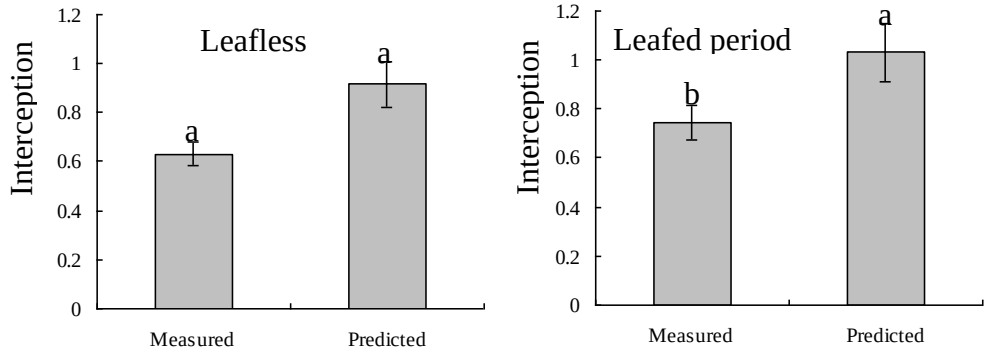
برای ارزیابی مدل، ۱۸ رخداد باران در دوره بی‌برگی و ۱۱ رخداد باران در دوره بی‌برگی به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. در جدول ۲، مقادیر آماره‌های ارزیابی مدل Gash اصلاح شده محاسبه شده است. براساس این جدول، کلیه آماره‌های ارزیابی مدل در دوره بی‌برگی بهتر از دوره برگ‌دار حاصل شد.

جدول ۲- مقادیر آماره‌های کارکرد مدل در دوره‌های برگ‌دار و بی‌برگی

Table 2. Performance metrics values during the leafed and leafless periods

آماره ارزیابی مدل	دوره برگ‌دار	دوره بی‌برگی
درصد خطا (*Error*)	۷/۳	۴/۷
ریشه دوم میانگین مربع خطا (*RMSE*، میلی‌متر)	۰/۱۰	۰/۰۵
ضریب کارآیی (*CE*)	۰/۹۴	۰/۶۶

براساس شکل ۲، مقادیر باران‌ربایی برآورد شده و اندازه‌گیری شده در مرحله ارزیابی مدل در دوره بی‌برگی، تفاوت معنی‌داری نداشتند ($P > ۰/۰۵$) که حاکی از برآورد مناسب مدل در پیش‌بینی مقدار باران‌ربایی است. هرچند در دوره برگ‌دار، مقادیر باران‌ربایی پیش‌بینی توسط مدل به‌صورت معنی‌داری از مقدار واقعی باران‌ربایی بیشتر برآورد شد که حاکی از دقت پایین‌تر مدل در این دوره زمانی است (شکل ۲).



شکل ۲- مقایسه متوسط باران‌ربایی برآورد شده توسط مدل Gash اصلاح شده با مقادیر اندازه‌گیری شده باران‌ربایی. بارها دلالت بر خطا معیار دارند.

Figure 2. Comparison between mean values of revised Gash model interception for the leafed and leafless periods with observed interception. Bars denotes standard error.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که باران‌ربایی سهم اندکی از چرخه‌ی توزیع اجزای بارندگی را در جنگل‌کاری اقاقیا به خود تخصیص داده است؛ به‌طوری که میانگین درصد باران‌ربایی در سنجه‌های زمانی برگ‌دار و بی‌برگی به‌ترتیب ۱۲/۷ و ۹/۷ درصد از باران حاصل شد. تفاوت سه درصدی بین میانگین درصد باران‌ربایی در دوره‌های برگ‌دار و بی‌برگی و هم‌چنین تفاوت بین مقادیر پارامترهای اکوهیدرولوژیک تاج‌پوشش و تنه در دوره‌های برگ‌دار و بی‌برگی (جدول ۱) نشان می‌دهد که نیاز است بررسی‌های اکوهیدرولوژی تاج‌پوشش و تنه درختان، در دوره‌های برگ‌دار و بی‌برگی به‌طور مجزا انجام گیرد (۱۳-۱۱). بنابراین براساس یافته‌های این پژوهش می‌توان اذعان داشت که بررسی اکوهیدرولوژیک گونه‌های درختی خزان-کننده، نیازمند بررسی آن‌ها در سنجه‌های زمانی برگ‌دار و بی-برگی است (۴). در همین راستا، حکیمی و همکاران (۴) به این نتیجه دست یافتند که پارامترهای اکوهیدرولوژیک و مقادیر توزیع اجزای باران بین دوره‌های برگ‌دار و بی‌برگی در انار تفاوت معنی‌داری دارد. صادقی و همکاران (۵) به این نتیجه دست یافتند که سنجه‌های زمانی مورد بررسی، تاثیر معنی-داری بر پارامترهای اکوهیدرولوژیک تاج‌پوشش و تنه درختان پهن‌برگ خزان‌کننده عرعر می‌گذارد که در نتیجه مقادیر توزیع اجزای باران را به‌صورت چشمگیری بین دوره برگ‌دار و دوره بی‌برگی متفاوت می‌سازد. بررسی مشخصه‌های اکوهیدرولوژیک

درختان خزان‌کننده بایستی با توجه به وضعیت فنولوژیک آن‌ها انجام بگیرد تا بتوان برآورد دقیقی از ورود آب به جنگل و تبخیر آب باران داشت. در دوره برگ‌دار، وجود برگ سبب افزایش مساحت رباییش‌کننده تاج می‌شود که در نهایت سبب افزایش باران‌ربایی و در نتیجه کاهش مقدار تاج‌بارش می‌شود. در واقع با ثابت بودن تمام شرایط اثرگذار بر مقدار تاج‌بارش، وجود برگ سبب کاهش مقدار تاج‌بارش در دوره بی‌برگی نسبت به دوره برگ‌دار می‌شود.

براساس یافته‌های این پژوهش، کارکرد مدل مورد بررسی برای برآورد مقدار باران‌ربایی در دو دوره زمانی مختلف، متفاوت است و یافته‌ها حاکی از این است که کارکرد مدل در دوره بی‌برگی مطلوب است، هرچند در دوره برگ‌دار، مقدار برآوردی به‌طور معنی‌داری بیشتر از مقدار اندازه‌گیری حاصل شد. دلیل احتمالی خطای زیاد برآوردی مدل در دوره برگ‌دار، عدم اندازه‌گیری پارامتر درصد تاج‌پوشش است، بنابراین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی، درصد تاج‌پوشش به صورت مستقیم بررسی شود و نتایج آن با روش غیرمستقیم درصد تاج‌پوشش مقایسه شود. درصد تاج‌پوشش پارامتر تاثیرگذاری در اکوهیدرولوژی جنگل است (۱۱) که اندازه‌گیری مستقیم آن نیازمند وسایل گران قیمت است. در این پژوهش از روش غیرمستقیم که مبتنی بر رگرسیون خطی بین مقادیر تاج‌بارش و باران در رخدادهای باران کمتر از نقطه اشباع آب تاج‌پوشش است، برای برآورد آن استفاده شد و این روش در پژوهش‌های متعددی استفاده می‌شود.

یکی از یافته‌های این پژوهش این است که مقدار برآوردی مدل Gash اصلاح شده در هر دو دوره مورد بررسی، در مقادیر باران با مقدار رخداد کوچک، دارای دقت و کارکرد مناسبی است، حال آنکه با افزایش مقدار باران، خطای برآورد مدل بیشتر می‌شود. که همسو با یافته‌های دیگر پژوهش‌گران است (۱۶-۱۴). در برخی مطالعات نشان داده شده است که مدل Gash اصلاح شده در رخدادهای باران‌های با مقدار کم، برآوردی دقیق دارد، حال‌آن‌که در رخدادهای باران با مقدار برابر و یا بزرگتر از نقطه اشباع آبی تاج‌پوشش، غالباً این مدل، باران‌ربایی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. برای اصلاح برآورد مدل در باران‌هایی با مقدار رخداد زیاد، نیاز است که پارامتر نسبت تبخیر در زمان بارندگی به شدت باران –به‌عنوان اصلی‌ترین پارامتر تاثیرگذار بر مقدار باران‌ربایی در رخدادهای باران با مقدار زیاد– به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری شود (۸). هم‌چنین برای بهبود برآورد مدل در باران‌های با مقدار رخداد کم، نیاز به اندازه‌گیری مستقیم پارامتر درصد تاج‌پوشش است.

تعیین دقیق مقدار باران‌ربایی، به‌عنوان اتلاف آبی تاج‌پوشش، به فرآیند برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری مدیران منابع طبیعی و منابع آب کشور کمک قابل ملاحظه‌ای می‌کند و در نتیجه سبب آگاهی بهتر از چرخه هیدرولوژی در سطح حوزه آبخیز می‌شود (۱۷). اندازه‌گیری فرآیند توزیع اجزای باران، امری زمان‌بر و پرهزینه است که امکان اندازه‌گیری آن در همه نقاط کشور وجود ندارد. از این رو پژوهشگران همواره به‌دنبال مدل‌هایی با دقت بیشتری در برآورد صحیح مقدار پارامترهای اکوهیدرولوژیک پوشش گیاهی بوده‌اند. هدف اصلی مدل‌سازی اکوهیدرولوژی جنگل، درک بهتر از چگونگی توزیع اجزای مختلف چرخه هیدرولوژی در بوم‌سازگان‌های جنگلی است. براساس یافته‌های این پژوهش، مدل Gash اصلاح شده قابلیت مناسبی در برآورد باران‌ربایی در دوره بی‌برگی در جنگل‌های دست‌کاشت اقاقیا در پارک جنگلی چیتگر تهران از خود نشان داد که این یافته می‌تواند به تکمیل شکاف اطلاعاتی درباره کارآیی مدل‌های مختلف در برآورد باران‌ربایی توده‌های جنگلی کمک نماید. براساس یافته‌های این پژوهش، مدلسازی باران‌ربایی در درختان پهن‌برگ خزان‌کننده بایستی در سنجه‌های زمانی برگ‌دار و بی‌برگی به صورت مجزا انجام شود و نمی‌توان در سنجه‌های زمانی سالانه این مدل‌ها را به کار برد.

References

1. Van Stan, J. T., Gutmann, E., & Friesen, J. (2020). Precipitation Partitioning by Vegetation. Springer. 281 p.
2. Sadeghi, S. M. M., Gordon, D. A., & Van Stan II, J. T. (2020). A global

synthesis of throughfall and stemflow hydrometeorology. In Precipitation partitioning by vegetation (pp. 49-70). Springer, Cham.

3. Sadeghi, S. M. M., Attarod, P., Van Stan, J. T., & Pypker, T. G. (2016). The importance of considering rainfall partitioning in afforestation initiatives in semiarid climates: A comparison of common planted tree species in Tehran, Iran. Science of the Total Environment, 568, 845-855.
4. 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 & Environment, 259, 77-85.
5. Sadeghi, S. M. M., Van Stan II, 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.
6. 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.
7. Nazari, M., Sadeghi, S. M. M., Van Stan II, J. T., & Chaichi, M. R. (2020). Rainfall interception and redistribution by maize farmland in central Iran. Journal of Hydrology: Regional Studies, 27, 100656.
8. Attarod, P., & Sadeghi, S. M. M. (2018). Forest Ecohydrology, Tehran: Jahad Daneshgahi.
9. 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.
10. Nazari, M., Chaichi, M. R., Kamel, H., Grismer, M., & Sadeghi, S. M. M. (2020). Evaluation of estimation methods for monthly reference evapotranspiration in arid climates. Arid Ecosystems, 10(4), 329-336.
11. 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.
12. Sadeghi, S. M. M., Attarod, P., & Pypker, T. G., 2015. 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.
13. Fathizadeh, O., Sadeghi, S.M.M., Holder, C.D., & Su, L. (2020). Leaf phenology drives spatio-temporal patterns of throughfall under a single *Quercus castaneifolia* C.A.Mey. Forests, 11, 688.
14. Sadeghi, S.M.M., Attarod, P., Van Stan II, J.T., Pypker, T.G., and Dunkerley, D. (2015). Efficiency of the reformulated Gash's interception model in semiarid afforestations. Agricultural and Forest Meteorology, 201, 76-85.
15. Lankreijer, H., Lundberg, A., Grelle, A., Lindroth, A., & Seibert, J. (1999).

Evaporation and storage of intercepted rain analysed by comparing two models applied to a boreal forest. Agricultural and Forest Meteorology, 98–99, 595–604.

16. 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.
17. Sivakumar, M. V. K. (2021). Climate change and water productivity. Water Productivity Journal, 1, 1-12.