ارزیابی مدل Sparse Gash در برآورد باران‌ربایی تودهٔ کاج تهران (*Pinus eldarica*) در منطقهٔ نیمه‌خشک

مریم السادات مطهری[۱] و پدرام عطارد[۲*]

[۱] کارشناس ارشد جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکدهٔ منابع‌طبیعی دانشگاه تهران
[۲] دانشیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۸/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۱۲)

چکیده

آگاهی از اندازهٔ باران‌ربایی توسط تاج‌پوشش درختان در مدیریت منابع آبی جنگلکاری‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک حائز اهمیت است. هدف از اجرای تحقیق حاضر، ارزیابی مدل Sparse Gash در برآورد باران‌ربایی جنگلکاری توده خالص کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw.) در پارک جنگلی چیتگر در منطقهٔ نیمه‌خشک، بود. اندازه‌گیری بارندگی کل در هر بارش (P_G) و تاج‌بارش (*TF*) از مهر ۱۳۸۸ تا اردیبهشت ۱۳۸۹ انجام گرفت. باران‌ربایی از تفاوت بین بارندگی کل در هر بارش و تاج‌بارش محاسبه شد. برآورد باران‌ربایی با استفاده از مدل Sparse Gash، که مدلی کارآمد برای برآورد باران‌ربایی است و در آن از داده‌های در دسترس‌تری مانند ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش (*S*)، تاج‌بارش مستقیم (*p*) و نسبت تبخیر در زمان بارندگی به شدت باران ($\overline{E}/\overline{R}$) استفاده می‌شود، انجام گرفت. در طول دورهٔ بررسی، در مجموع ۱۶۴/۸ میلی‌متر بارندگی طی ۳۰ بارش اندازه‌گیری شد که ۶۱/۲ میلی‌متر آن به باران‌ربایی اختصاص یافت. نتایج نشان داد مقدار باران‌ربایی برآوردشده با مدل Sparse Gash (۶۲/۱۹ میلی‌متر) نسبت به باران‌ربایی اندازه‌گیری‌شده در توده، ۰/۹۹ میلی‌متر تفاوت دارد. رابطه‌ای خطی قوی بین باران‌ربایی برآوردشده با مدل Sparse Gash و باران‌ربایی اندازه‌گیری‌شده در توده به‌دست آمد (R^2=۰/۸۷۷۲). ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE) باران‌ربایی برآوردشده با استفاده از مدل، ۰/۴۹ میلی‌متر در هر بارش محاسبه شد که ۲۳/۷ درصد خطا را در برآورد باران‌ربایی طی هر بارش نشان داد. ارزیابی مدل Sparse Gash در برآورد باران‌ربایی تودهٔ جنگلکاری شدهٔ کاج تهران واقع در منطقهٔ مورد بررسی نتایج قابل قبولی را نشان داد بطوری که می‌توان از آن در مناطقی از جنگلکاری کاج تهران با تاج‌پوشش مشابه با منطقهٔ تحقیق حاضر که اندازه‌گیری باران‌ربایی مشکل و زمان‌بر است، استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: باران‌ربایی، جنگلکاری، کاج تهران، مدل Sparse Gash.

* نویسندهٔ مسئول شماره تماس: ۰۲۶۳۲۲۲۳۰۴۴ ایمیل: attarod@ut.ac.ir

مقدمه و هدف

باران‌ربایی (I)[1] بخشی از بارندگی است که توسط تاج‌پوشش و تنهٔ درختان جذب می‌شود و به دنبال آن با تبخیر از سطح برگ‌ها، شاخه‌ها و تنهٔ درختان، به اتمسفر باز می‌گردد. تاج‌بارش (TF)[2]، بخشی از بارش است که یا به‌طور مستقیم از لابه‌لای تاج‌پوشش درختان به سطح زمین می‌رسد که تاج‌بارش مستقیم[3] نامیده می‌شود، یا پس از برخورد به شاخ‌وبرگ درختان به سطح زمین می‌رسد که به آن ریزش‌های تاجی[4] گفته می‌شود. ساقاب (SF)[5] هم مقداری از بارش است که پس از جاری شدن بر روی تنه و شاخه‌های درختان به سطح جنگل می‌رسد. باران‌ربایی از تفاوت بین بارندگی کل در هر بارش (P_G)[6] و مجموع تاج‌بارش و ساقاب به‌دست می‌آید (Tobón Marin *et al.*, 2000; Herbst *et al.*, 2008).

دانستن اندازه باران‌ربایی گونه‌های مختلف در مناطق خشک و نیمه‌خشک که رطوبت خاک، عامل محدودکنندهٔ رشد و تولید گیاهان محسوب می‌شود، اهمیت فراوانی دارد (Carlyle-Moses, 2004). به‌علاوه آگاهی از مقدار باران‌ربایی جنگلکاری‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک در کنار دیگر عوامل می‌تواند در انتخاب گونهٔ مناسب به‌منظور جنگلکاری و تراکم کاشت مؤثر باشد. با توجه به مشکلات اندازه‌گیری باران‌ربایی در توده، مانند زمان‌بر و هزینه‌بر بودن اندازه‌گیری‌ها برای کسب نتایج مطلوب، مدل‌هایی به‌منظور برآورد باران‌ربایی بدون اندازه‌گیری در توده با استفاده از چند متغیر هواشناسی و مشخصه‌های مربوط به پوشش گیاهی ارائه شدند. دانشمندی به نام Rutter در سال ۱۹۷۱، اولین بار مدلی برای برآورد مقدار باران‌ربایی تاج‌پوشش و تنه درختان، با وارد کردن داده‌های هواشناسی و مشخصه‌های مربوط به ساختمان پوشش گیاهی ارائه داد. متغیرهای هواشناسی به‌کار رفته در این مدل عبارتند از مقدار بارش، تابش خالص خورشید، سرعت باد، دمای هوا و فشار بخار آب که مقدار تبخیر را کنترل می‌کنند. متغیرهای هواشناسی مذکور به‌منظور محاسبهٔ مقدار تبخیر آب باران وقتی تاج‌پوشش اشباع می‌شود، با استفاده از فرمول تبخیر و تعرق مرجع، استفاده می‌شوند (Asdak *et al.*, 1998). مشخصه‌های مربوط به پوشش گیاهی عبارتند از ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش (S)[7]، ضریب تاج‌بارش مستقیم (p)[8]، ظرفیت نگهداری آب روی تنه درخت (S_t)[9] و ضریب ساقاب (p_t)[10]. این مدل، باران‌ربایی، تاج‌بارش و ساقاب را با استفاده از داده‌های هواشناسی برآورد می‌کند. مهم‌ترین مشکل کاربردی این مدل، تعداد زیاد داده‌های مورد نیاز است.

Gash در سال ۱۹۷۹ مدل ساده‌تری را بر پایهٔ بارش‌های رخ داده، معرفی کرد. این مدل که مدل تحلیلی Gash[11] نامیده می‌شود، موفقیت زیادی در پیش‌بینی باران‌ربایی جنگل‌های وسیع سوزنی‌برگ و پهن‌برگ معتدله و همچنین جنگل‌های بارانی گرمسیری داشته است (Gash, 1979; Gash *et al.*, 1980; Pearce *et al.*, 1980; Lloyd *et al.*, 1988; Hutjes *et al.*, 1990). ضعف این مدل، کاربرد آن در جنگل‌های با تاج‌پوشش کمتر و به اصطلاح جنگل‌های تنک است که مقدار برآوردی آن بیشتر از مقدار واقعی است (Teklehaimanot *et al.*, 1991; Gash *et al.*, 1995).

Gash برای رفع این نقص، در سال ۱۹۹۵ مدل جدیدتری را به نام Sparse Gash برای جنگل‌های تنک ارائه داد که در پیش‌بینی باران‌ربایی، به نتایج

[1] Rainfall interception
[2] Throughfall
[3] Free throughfall
[4] Canopy drips
[5] Stemflow
[6] Gross rainfall
[7] Canopy (water) storage capacity
[8] Free throghfall coefficient
[9] Trunk water storage capacity
[10] Stemflow partitioning coefficient
[11] Analytical Gash model

بهتری نایل شد. برای مثال، این مدل در تودهٔ *Pinus pinaster* با پوشش تاجی باز در پرتغال و در تودهٔ *Eucalyptus globus* در یک جنگل بارانی در برونئی با تاج‌پوشش باز نتیجهٔ قابل قبولی را نشان داد (Valente *et al.*, 1997). در این مدل، تبخیر از سطح تاج‌پوشش، رابطهٔ خطی با پوشش تاجی (*c*)[1] یعنی سطحی از زمین دارد که توسط تاج‌پوشش درختان پوشانده می‌شود (Gash *et al.*, 1995).

ایران دارای جنگلکاری‌های وسیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است و اندازه‌گیری مقدار باران‌ربایی این جنگلکاری‌ها پرهزینه و زمان‌بر است. در واقع اندازه‌گیری مقدار باران‌ربایی، به زمان طولانی نمونه‌گیری در عرصهٔ جنگل با هزینهٔ زیاد نیاز دارد. در این راستا، ارزیابی مدلی که بتواند با دقت کافی، باران‌ربایی را برآورد کند، اجتناب‌ناپذیر است و به‌ویژه در ایران که دسترسی به دستگاه‌های جمع‌آوری‌کنندهٔ داده‌های هواشناسی امکان‌پذیر نیست، این کار ضروری‌تر به نظر می‌رسد. همچنین در ایران تاکنون در این زمینه تحقیقی صورت نگرفته و این پژوهش می‌تواند در تحقیقات بعدی به‌کار گرفته شود. هدف تحقیق حاضر، ارزیابی مدل Sparse Gash در برآورد باران‌ربایی تودهٔ کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw.) در منطقهٔ نیمه‌خشک است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در تودهٔ خالص جنگلکاری شدهٔ ۴۰ سالهٔ کاج تهران واقع در پارک جنگلی چیتگر تهران با طول و عرض جغرافیایی به‌ترتیب ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی و ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی انجام گرفت. اندازه‌گیری‌ها در پلاتی به مساحت ۲۷۰ متر مربع در ارتفاع متوسط ۱۲۶۹ متر بالاتر از سطح دریا انجام گرفت. تراکم درختان در این پلات ۱۱۸۵ درخت در هکتار و میانگین ارتفاع و قطر درختان به‌ترتیب ۱۱ متر و ۲۳/۵ سانتی‌متر است.

برای تعیین وضعیت اقلیمی منطقه از داده‌های اقلیمی ثبت‌شده طی دورهٔ ۱۶ ساله (۱۳۷۴ تا ۱۳۸۹) ایستگاه هواشناسی سینوپتیک چیتگر (۵۱ درجه و ۱۰ دقیقهٔ شرقی و ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقهٔ شمالی با ارتفاع ۱۲۱۵ متر از سطح دریا) که در فاصلهٔ ۵ کیلومتری از منطقهٔ تحت بررسی قرار دارد، استفاده شد. میانگین دمای سالانه، ۱۷/۲ درجهٔ سانتی‌گراد (±۰/۱۲ خطای معیار) و میانگین بارندگی سالانه، ۲۶۷/۶ میلی‌متر (±۲۰/۴ خطای معیار) گزارش شده است.

میانگین دما و مجموع بارندگی دورهٔ بررسی (از مهر ۱۳۸۸ تا اواسط اردیبهشت ۱۳۸۹) و میانگین درازمدت این دوره به‌همراه حداکثر و حداقل دما و بارندگی طی دورهٔ بررسی و در درازمدت در جدول ۱ نشان داده شده است.

مطابق منحنی آمبروترمیک به‌دست‌آمده از آمار هواشناسی ایستگاه سینوپتیک چیتگر، دورهٔ خشکی در این منطقه شش ماه از سال، از اردیبهشت تا آبان است.

طی دورهٔ بررسی، میانگین روزانهٔ تبخیر و تعرق با استفاده از فرمول فائو پنمن- مونتیث، ۳/۴ میلی‌متر محاسبه شد که حداقل میانگین تبخیر و تعرق در آذر ماه (۱/۴۳ میلی‌متر در روز) و حداکثر مقدار آن در مهر ماه (۵/۳۸ میلی‌متر در روز) رخ داده است. همچنین میانگین رطوبت نسبی هوا طی دورهٔ اندازه‌گیری ۴۷/۴ درصد بوده است که حداکثر ماهیانه در آذر ماه (۶۳ درصد) و حداقل ماهیانه در مهر ماه (۲۹ درصد) روی داده است.

- روش اندازه‌گیری در توده

بارندگی کل در هر بارش با استفاده از شش عدد جمع‌آوری‌کننده (از جنس پلاستیک) با قطر دهانهٔ ۹ سانتی متر، که در فضای باز مجاور توده مورد نظر نصب شدند، اندازه‌گیری شد و تاج‌بارش هم با نصب ۴۵ عدد جمع‌آوری‌کننده (مشابه جمع‌آوری‌کننده‌های بارندگی)

[1] Canopy cover

که به‌طور تصادفی در زیر تودهٔ کاج تهران (با مساحت ۲۷۰ متر مربع) قرار گرفتند، جمع‌آوری شد. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از استوانهٔ مدرج دو ساعت پس از پایان بارندگی و در بارندگی‌های شبانه، قبل از طلوع خورشید انجام گرفت (Carlyle-Moses *et al.*, 2004). میانگین باران به‌دست‌آمده از جمع‌آوری‌کننده‌ها در هر بارندگی، مقدار تاج‌بارش را نشان می‌دهد. در این تحقیق مقدار ساقاب اندازه‌گیری نشد، زیرا این مقدار برای گونهٔ کاج تهران و دیگر سوزنی‌برگان ناچیز است (Geiger, 1965; Lankreijer *et al.*, 1993). باران‌ربایی در هر بارش از تفاضل بارندگی و تاج‌بارش محاسبه شد.

جدول ۱- داده‌های اقلیمی بارندگی و دما در درازمدت و طی دورهٔ بررسی (مهر ۱۳۸۸ تا اردیبهشت ۱۳۸۹) برگرفته از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک چیتگر

دادهٔ اقلیمی	میانگین سالانهٔ درازمدت (۱۳۷۴ تا ۱۳۸۹)	خطای معیار	دورهٔ بررسی	میانگین درازمدت دورهٔ بررسی
بارندگی کل (میلی‌متر)	۲۶۷/۶	±۲۰/۴	۲۶۷/۷	۲۶۱
حداکثر ماهانه (میلی‌متر)	۴۵/۴ (اسفند)	±۱۰/۷	۷۵/۵ (بهمن)	۴۵/۴ (اسفند)
حداقل ماهانه (میلی‌متر)	۰/۹ (مرداد)	±۰/۴	۱۰/۵ (مهر)	۱۲/۴ (اردیبهشت)
میانگین دما (درجهٔ سانتی‌گراد)	۱۷/۲	±۰/۱۲	۱۲/۹	۱۱/۹
حداکثر ماهانه (درجهٔ سانتی‌گراد)	۲۹/۴ (مرداد)	±۰/۳	۲۰/۲ (مهر)	۲۱/۸ (اردیبهشت)
حداقل ماهانه (درجهٔ سانتی‌گراد)	۳/۸ (دی)	±۰/۸	۵/۵ (آذر)	۳/۸ (دی)

- مدل Sparse Gash

در این تحقیق از مدل Sparse Gash استفاده شد، زیرا داده‌های هواشناسی مورد استفاده در آن، محدودند و داده‌های در دسترس‌تری به‌کار می‌روند، مانند ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش، تاج‌بارش مستقیم و نسبت تبخیر در زمان بارندگی به شدت باران[1] ($\overline{E}/\overline{R}$) (Gash *et al.*, 1995). در واقع، مدل Sparse Gash نسبت به مدل اولیه Gash در سال ۱۹۷۹، تغییراتی دارد که امکان استفاده از آن را در این تحقیق فراهم کرده است.

فرضیه‌هایی که در مدل اولیهٔ Gash وجود دارند عبارتند از: ۱- بارندگی توسط چند بارش[2] مشخص و مجزا با فواصل کافی و زمان کافی برای خشک شدن کامل تاج‌پوشش، از هم تفکیک شده‌اند؛ ۲- شرایط آب‌وهوایی در تمام دورهٔ بارندگی ثابت و پایدار است؛ ۳- هنگام پر شدن ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش (مرطوب شدن تاج‌پوشش)، آبی از تاج‌پوشش به کف جنگل نمی‌چکد. واضح است که فرضیه‌های ۲ و ۳ طی یک بارندگی، بارها نقض می‌شوند. برای مثال شرایط آب‌وهوایی مثل سرعت باد، شدت باران و کاهش فشار بخار در طول بارندگی، ممکن است تغییر کنند. سرعت باد تاج‌پوشش را حرکت می‌دهد و سبب ریزش قطرات آب باران از تاج‌پوشش به سطح زمین می‌شود. بنابراین در این پژوهش مدل اولیهٔ Gash استفاده نشد و مدل Sparse Gash که فرضیه‌های ۲ و ۳ در آن مطرح نیستند، به کار گرفته شد.

صرف‌نظر از فرضیه‌هایی که در مدل اولیهٔ Gash باید مورد توجه قرار گیرند، این مدل در پیش‌بینی سالانهٔ باران‌ربایی از اهمیت زیادی برخوردار است و کاربرد زیادی دارد (Gash *et al.*, 1995).

برای برآورد باران‌ربایی با استفاده از مدل Sparse Gash از فرمول‌هایی متشکل از چند مشخصهٔ مربوط به پوشش گیاهی استفاده می‌شود و برای

[1] The ratio of mean evaporation rate from the wet canopy to the mean rainfall intensity
[2] Storm

استفاده از فرمول‌ها باید مشخصه‌های به‌کار رفته در آنها محاسبه شوند:

۱- دسته‌بندی باران‌های اندازه‌گیری‌شده به دو گروه باران‌های کافی[1] و باران‌های ناکافی[2] برای تکمیل تکمیل ظرفیت آب تاج‌پوشش (نقطه اشباع تاج پوشش برآوردی): مقدار باران لازم برای تکمیل ظرفیت آب تاج‌پوشش از روی ابر نقاط نمودار بارندگی در هر بارش (محور x) و تاج‌بارش (محور y) به‌طور تخمینی تعیین می‌شود. در واقع نقطه‌ای از نمودار که شیب منحنی ابر نقاط افزایش می‌یابد، مقدار بارانی را نشان می‌دهد که برای اشباع تاج‌پوشش کافی است و در باران‌های بیش از این مقدار، سهم بیشتری از باران به تاج‌بارش اختصاص می‌یابد. کمتر از این حد را باران‌های ناکافی برای اشباع تاج‌پوشش، و بیشتر از آن را باران‌های کافی برای اشباع تاج‌پوشش در نظر می‌گیرند (Jackson, 1975; Klaassen *et al*., 1998).

۲- ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش (S): ابتدا باران بر اساس اندازه‌های آن دسته‌بندی می‌شود و سپس در نمودار بین تاج‌بارش و بارندگی در هر بارش، دو خط رگرسیون رسم می‌شود. رگرسیون (الف) بین تاج‌بارش و بارندگی در هر بارش برای بارندگی‌هایی است که برای اشباع تاج‌پوشش کافی نیستند. رگرسیون (ب) رابطهٔ بین بارندگی در هر بارش و تاج بارش برای بارندگی‌هایی است که برای اشباع تاج‌پوشش کافی و مناسبند. تفاوت بین تاج‌بارش و بارندگی در هر بارش در محل برخورد دو خط رگرسیون، مقدار ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش را نشان می‌دهد (Pypker *et al*., 2005; Jackson, 1975).

۳- نقطهٔ اشباع تاج پوشش (P_s)[3] و نسبت تبخیر در زمان بارندگی به شدت باران ($\overline{E}/\overline{R}$): با حل دو معادلهٔ خط به‌دست آمده در رگرسیون‌های مربوط به اندازه‌گیری ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش، مقدار بارندگی به‌دست‌آمده، نقطهٔ اشباع تاج پوشش نامیده می‌شود. همچنین برای به‌دست آوردن نسبت متوسط تبخیر در زمان بارندگی به شدت باران، کافی است شیب رگرسیون (ب) را از عدد یک کم کنیم (Pypker *et al*., 2005).

۴- ضریب تاج‌بارش مستقیم: برآورد ضریب تاج‌بارش مستقیم مانند برآورد مقدار ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش با روش رسم خط رگرسیون امکان‌پذیر است. به‌این ترتیب که در نمودار بین تاج‌بارش و بارندگی در هر بارش، برای باران‌هایی که برای تکمیل ظرفیت آب تاج‌پوشش کافی نیستند، شیب رگرسیون خطی، ضریب تاج‌بارش مستقیم را نشان می‌دهد (Leyton, 1967; Jackson, 1975; Klaassen *et al*., 1998; Llorens and Gallart, 2000; Pypker *et al*., 2005).

پس از محاسبهٔ مشخصه‌های ذکرشده، باران‌ربایی با استفاده از مدل Sparse Gash از مجموع باران‌ربایی تعداد m باران ناکافی برای اشباع تاج‌پوشش (I_c) و تعداد n باران کافی برای اشباع تاج‌پوشش (I_n) برآورد می‌شود. پس از تعیین دو گروه بارندگی، برای محاسبهٔ باران‌ربایی برای تعداد m باران ناکافی برای اشباع تاج‌پوشش (I_c)، رابطهٔ زیر به‌کار گرفته شد:

$$I_c = c\sum_{j=1}^{m} P_{G,j} \qquad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، c: پوشش تاجی است و از رابطهٔ p-1 محاسبه می‌شود (Gash *et al*., 1995; Herbst *et al*., 2008) و $P_{G,j}$: مقدار بارندگی در هر بارش j است.

به‌منظور محاسبهٔ باران‌ربایی برای تعداد n باران کافی برای اشباع تاج‌پوشش (I_n)، از رابطهٔ زیر استفاده شد:

$$I_n = I_W + I_a + I_S \qquad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه:

I_w: بارانی که صرف مرطوب کردن تاج‌پوشش شده و از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$I_w = n\,cP_s - n\,cS_c \qquad \text{رابطه ۳}$$

[1] Sufficient rainfall for canopy saturation
[2] Insufficient rainfall for canopy saturation
[3] Canopy saturation point

n: تعداد باران کافی برای اشباع تاج‌پوشش

S_c: نسبت ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش به پوشش تاجی: S/c

I_a: تبخیر بعد از اشباع تاج‌پوشش، اما قبل از قطع باران که از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$I_a = \mathrm{n}\, cS_c \qquad \text{رابطه ۴}$$

I_s: تبخیر بعد از قطع باران است و در این تحقیق، از رابطه ۵ محاسبه شد:

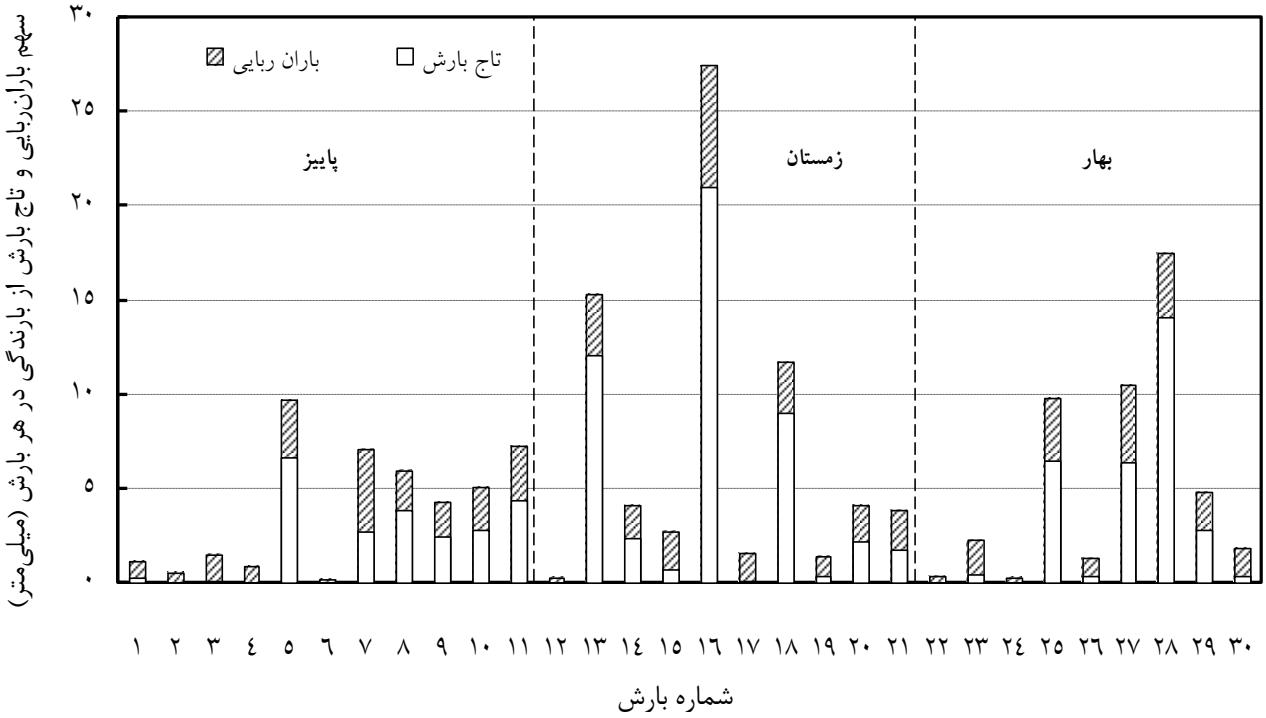
$$I_S = (\overline{E}/\overline{R})\sum_{j=1}^{n}(P_{G,j} - P_s) \qquad \text{رابطه ۵}$$

(Gash *et al.*, 1995).

نتایج

- باران‌ربایی اندازه‌گیری‌شده در توده

در طول دورهٔ بررسی (مهر ۱۳۸۸ تا اواسط اردیبهشت ۱۳۸۹)، ۳۰ مورد بارندگی اندازه‌گیری شد و مجموع عمق بارندگی، طی این دوره ۱۶۴/۸ میلی‌متر بود. از این مقدار، ۶۱/۲ میلی‌متر آن به باران‌ربایی اختصاص یافت. در شکل ۱ سهم باران‌ربایی در هر بارش طی دورهٔ بررسی نشان داده شده است. همچنین رابطهٔ لگاریتمی معنی‌داری بین نسبت باران‌ربایی به بارندگی در هر بارش و بارندگی در هر بارش به‌دست آمد (r^2 =۰/۸۶۱; p value ≤ 0.01).



شکل ۱- مقدار بارندگی و سهم باران‌ربایی و تاج‌بارش در هر بارش طی دورهٔ بررسی (مهر ۱۳۸۸ تا اردیبهشت ۱۳۸۹)

- باران‌ربایی برآوردشده با مدل Sparse Gash

اجزای محاسبه‌شده در مدل Sparse Gash در جدول ۲ نشان داده شده است.

مقایسهٔ باران‌ربایی برآورد شده با مدل Sparse Gash با باران‌ربایی اندازه‌گیری‌شده در توده (۶۱/۲ میلی‌متر) نشان داد که باران‌ربایی برآوردشده با مدل، تنها ۰/۹۹ میلی‌متر از باران‌ربایی اندازه‌گیری‌شده در توده (۶۲/۱۹ میلی‌متر) بیشتر است.

جدول۲- مقادیر اجزای باران‌ربایی در مدل Sparse Gash در جنگلکاری تودهٔ کاج تهران

اجزای باران‌ربایی	مقدار
نقطهٔ اشباع تاج پوشش (P_s)	۲/۰۶ (میلی‌متر)
ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش (S)	۱/۷۷ (میلی‌متر)
ضریب تاج‌بارش مستقیم (p)	۰/۱۴
پوشش تاجی (c)	۰/۹
نسبت ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش به پوشش تاجی (S_c)، (S/c)	۱/۹۶
نسبت متوسط تبخیر به شدت باران ($\overline{E}/\overline{R}$)	۰/۱۶
تعداد باران‌های ناکافی برای اشباع تاج‌پوشش (m)	۱۲
تعداد باران‌های کافی برای اشباع تاج‌پوشش (n)	۱۸
باران‌ربایی تعداد باران‌های ناکافی برای اشباع تاج‌پوشش (I_c)	۱۰/۰۹ (میلی‌متر)
باران‌ربایی طی مرطوب شدن تاج‌پوشش (I_w)	۱/۶ (میلی‌متر)
تبخیر بعد از اشباع تاج‌پوشش و قبل از قطع باران (I_a)	۳۱/۹ (میلی‌متر)
تبخیر بعد از قطع باران (I_s)	۱۸/۶ (میلی‌متر)
باران‌ربایی باران‌های کافی برای اشباع تاج‌پوشش ($I_n=I_a+I_w+I_s$)	۵۲/۱ (میلی‌متر)
باران‌ربایی کل ($I_c+ I_n$)	۶۲/۱۹ (میلی‌متر)

ریشهٔ میانگین مربعات خطای[1] باران‌ربایی برآوردشده در هر بارندگی با استفاده از مدل Sparse Gash، ۰/۴۹ میلی‌متر محاسبه شد. با در نظر گرفتن میانگین باران‌ربایی در هر بارش (۲/۰۷ میلی‌متر) می‌توان گفت طی هر بارش ۲۳/۷ درصد خطا در برآورد باران‌ربایی وجود دارد (درصد ۲۳/۷= ۱۰۰ × (۲/۰۷÷۰/۴۹).

مقایسهٔ مقدار برآوردشده با مدل با مقدار اندازه‌گیری‌شده در توده نشان داد که عرض از مبدأ رگرسیون خطی نسبت به محور y از نظر آماری با صفر تفاوت معنی‌داری ندارد (p-value = 0.06) (شکل ۲).

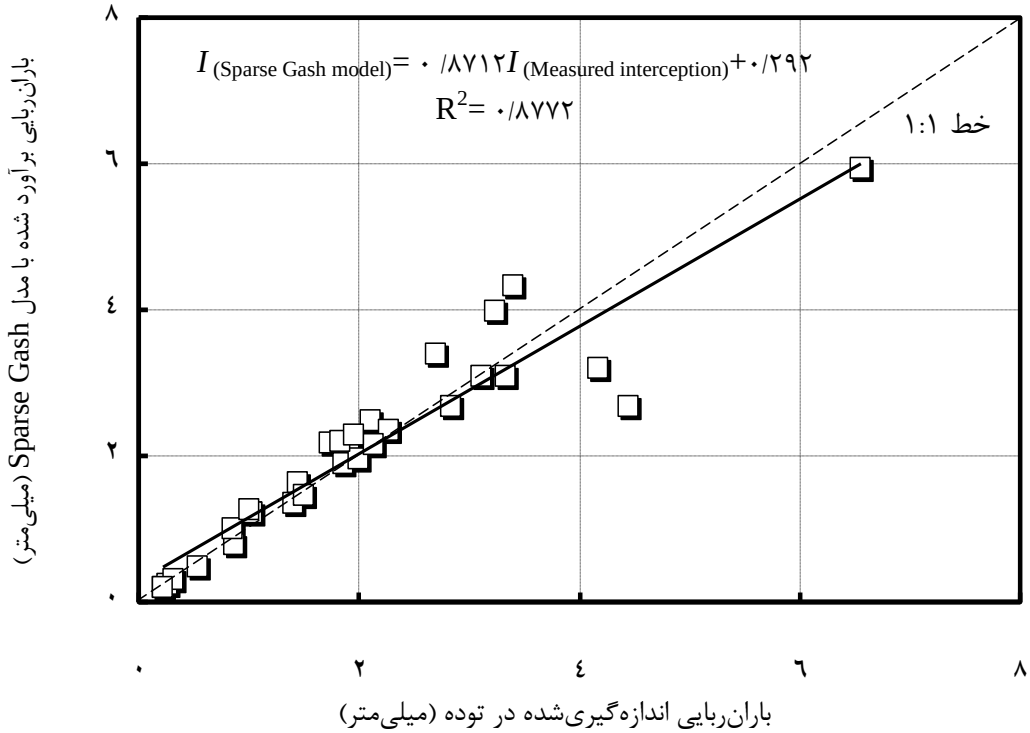
بحث

تحقیق حاضر در یک تودهٔ جنگلکاری‌شدهٔ کاج تهران در منطقهٔ نیمه‌خشک انجام گرفت. مقدار باران‌ربایی با اندازه‌گیری در توده، ۶۱/۲ میلی‌متر (به‌طور متوسط ۶۱/۴ درصد در هر بارندگی) از مجموع ۱۶۴/۸ میلی‌متر بارش کل در طول دورهٔ بررسی به‌دست آمد.

مرور تحقیقات انجام گرفته برای اندازه‌گیری اجزای بارندگی (باران‌ربایی، تاج‌بارش و ساقاب) در توده‌های متشکل از گونه‌های مختلف کاج نشان می‌دهد که نسبت باران‌ربایی به بارندگی در هر بارش به‌دست آمده در تحقیق حاضر (۶۱/۴ درصد) تفاوت زیادی با مقدار ۲۰ درصد تا ۴۰ درصد اندازه‌گیری‌شده در جنگل‌های همیشه‌سبز متشکل از گونه‌های دیگر سوزنی‌برگ دارد (Hibbert, 1967; Zinke, 1967). برای مثال، نسبت باران‌ربایی به بارندگی در هر بارش در یک تودهٔ

[1] Root mean square error (RMSE)

Pinus nigra در جنوب انگلستان ۳۵ درصد (Rutter *et al.*, 1971)، در یک تودهٔ *Pinus strobus* در کانادا، ۳۰/۷ درصد (Mahendrappa, 1990) و در یک تودهٔ *Pinus pinaster* در جنوب غربی اروپا ۱۲/۶ تا ۲۱ درصد (Loustau *et al.*, 1992) گزارش شده است. توزیع بارندگی به اجزای بارش، وابستگی کمی و کیفی به متغیرهای اقلیمی، خصوصیات باران و ویژگی‌های پوشش گیاهی دارد (Crockford and Richardson, 2000; Pypker *et al.*, 2005; Staelens *et al.*, 2008; Muzylo *et al.*, 2009) که این عوامل باید در دسته‌بندی اجزای بارش در جنگلکاری‌ها در منطقهٔ نیمه‌خشک مورد توجه قرار گیرند.



شکل ۲- رابطهٔ بین باران‌ربایی اندازه‌گیری شده در توده و باران‌ربایی برآورد شده با مدل Sparse Gash. خط ممتد رگرسیون بارندگی‌های مشاهده‌شده را نشان می‌دهد. هر مربع نشان‌دهنده یک بارش است.

مقدار باران‌ربایی در طول دورهٔ بررسی با استفاده از مدل Sparse Gash، ۶۲/۱۹ میلی‌متر برآورد شد. در واقع این مدل، باران‌ربایی را تنها ۱/۵ درصد بیشتر از باران‌ربایی اندازه‌گیری‌شده در توده برآورد کرده است.

تحقیقات گذشته در زمینهٔ مدل‌های باران‌ربایی در جنگل‌های سوزنی‌برگ دیگر نتایج خوبی را در استفاده از مدل اولیهٔ Gash و همچنین مدل Sparse Gash نشان دادند (Gash *et al.*, 1980; Gash *et al.*, 1999). مدل Sparse Gash مقدار باران‌ربایی را با دقت خوبی برآورد می‌کند (Llorens, 1997; Asdak *et al.*, 1998; Ubarana, 1996). برای مثال در تحقیق Asdak و همکارانش در سال ۱۹۹۸ نشان داده شد که مدل Sparse Gash مقدار باران‌ربایی را طی دوره اندازه‌گیری، با تفاوت کمی در حدود ۶ تا ۱۴ درصد بیش از مقدار اندازه‌گیری‌شدهٔ آن در جنگل بارانی برآورد می‌کند (Asdak *et al.*, 1998). همچنین Ubarana (۱۹۹۶)، مقدار باران‌ربایی با استفاده از این

مدل را، تنها ۵ درصد بیش از مقدار اندازه‌گیری‌شدهٔ آن در جنگل آمازون برآورد کرد. بنابراین این مدل همیشه بیش برآورد (over estimate) دارد.

با توجه به اینکه در این تحقیق، تفاوت باران‌ربایی برآورد شده با مدل Sparse Gash با مقدار اندازه‌گیری‌شده در توده تنها ۱/۵ درصد است، می‌توان گفت استفاده از مدل Sparse Gash با دقت زیاد، برای برآورد باران‌ربایی در جنگلکاری‌های کاج تهران با سن درختان و تراکم کاشت مشابه و نیز در شرایط اقلیمی تقریباً یکسان با شرایط اقلیمی پارک جنگلی چیتگر، کاربرد دارد.

با توجه به زمان‌بر و هزینه‌بر بودن اندازه‌گیری باران‌ربایی به‌ویژه در ایران که امکانات سیستم‌های اتوماتیک وجود ندارد و اندازه‌گیری‌ها به‌صورت دستی با حضور در منطقه بعد از وقوع هر بارندگی و در زمان مشخص، انجام می‌گیرد، مدل‌های باران‌ربایی می‌توانند کاربرد زیادی داشته باشند، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که زمان بیشتری نیاز است تا تعداد بارندگی لازم برای دست‌یافتن به میانگین باران‌ربایی توده‌های جنگلکاری تحت بررسی اندازه‌گیری شود. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که باران‌ربایی مقدار چشمگیری از باران را در جنگلکاری کاج تهران در منطقه نیمه‌خشک که رشد و تولید گیاهان به‌شدت تحت تأثیر مقدار آب در دسترس است، به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین در انتخاب گونه و تراکم کاشت برای پروژه‌های جنگلکاری در مناطق نیمه‌خشک باید به مقدار باران‌ربایی گونهٔ مورد نظر توجه کافی شود، گرچه عوامل دیگر مانند تعرق گونه که می‌تواند بخش شایان توجهی از بودجهٔ آب طی دوره‌های خشکی را تشکیل دهد (Savenije, 2004)، نیز اهمیت بسزایی دارند.

منابع

Asdak, C., P. Jarvis and P. Gardingen, 1998. Modelling rainfall interception in unlogged and logged forest areas of Central Kalimantan, Indonesia, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2: 211–220.

Carlyle-Moses, D.E., 2004. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental Matorral community, *Journal of Arid Environments*, 58: 181–202.

Carlyle-Moses, D.E., J.S. Flores Laureano and A.G. Price, 2004. Throughfall and throughfall spatial variability in Madrean oak forest communities of northeastern Mexico, *Journal of Hydrology*, 297: 124–135.

Crockford, R.H. and D.P. Richardson, 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate, *Hydrological Processes*, 14: 2903–920.

Gash, J.H.C., 1979. An analytical model of rainfall interception by forest, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105: 43–55.

Gash, J.H.C., I.R. Wright and C.R. Lloyd, 1980. Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain, *Journal of Hydrology*, 48: 89–105.

Gash, J.H.C., C.R. Lloyd and G. Lachaud, 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model, *Journal of Hydrology*, 170: 79–86.

Gash, J.H.C., F. Valente and J.S. David, 1999. Estimates and measurements of evaporation from wet, sparse pine forest in Portugal, *Agricultural and Forest Meteorology*, 94: 149–158.

Geiger, R., 1965. The Climate Near the Ground, Harvard University Press, 611 pp.

Herbst, M., P.T.W. Rosier, D.D. McNeil, R.J. Harding and D.J. Gowing, 2008. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest, *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 1655–1667.

Hibbert, A.R., 1967. Forest treatment effects on water yield, in Proceedings International Symposium on Forest Hydrology, (Eds.): Sopper, W. E. and Lull, H. W., Pergamon Press, Oxford, 527–544.

Hutjes, R., A. Wierda and A. Veen, 1990. Rainfall interception in the Tai Forest, Ivory Coast: application of two simulation models to a humid tropical system, *Journal of Hydrology*, 114: 259–275.

Jackson, I.J., 1975. Relationships between rainfall parameters and interception by tropical rainforest, *Journal of Hydrology*, 24: 215-238.

Klaassen, W., F. Bosveld and E. deWater, 1998. Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception, *Journal of Hydrology*, 212-213: 36-50

Lankreijer, H.J.M., M.J. Hendriks and W. Klaassen, 1993. A comparison of models simulating rainfall interception of forests, *Agricultural and Forest Meteorology*, 64: 187–199.

Leyton, L., E.R.C. Reynolds and F.B. Thompson, 1967. Rainfall interception in forest and moorland. In: Sopper, W.E., Lull, H.W. (Eds.), International Symposium on Forest Hydrology, Pennsylvania State University, Pergamon Press: 163-178.

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 (3–4): 346–359.

Llorens, P., and F. Gallart, 2000. A simplified method for forest water storage capacity measurement, *Journal of Hydrology*, 240: 131–144.

Loustau, D., P. Bergigier and A. Granier, 1992. Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. II. An application of Gash's analytical model of interception, *Journal of Hydrology*, 138: 469–485.

Lloyd, C., J. Gash, W. Shuttleworth and F.A. Marques, 1988. The measurement and modelling of rainfall interception by Amazonian rain forest, *Agricultural and Forest Meteorology*, 43: 277–294.

Mahendrappa, M.K., 1990. Partitioning of rainwater and chemical into throughfall and stemflow in different forest stands, *Forest Ecology and Management*, 30: 65–72.

Muzylo, A., P. Llorens, F. Valente, J.J. Keizer, F. Domingo and J.H.C. Gash, 2009. Review of rainfall interception modeling, *Journal of Hydrology*, 370: 191–206.

Pearce, A., J. Gash and J. Stewart, 1980. Rainfall interception in a forest stand estimated from grassland meteorological data, *Journal of Hydrology*, 46: 147–163.

Pypker, T.G., B.J. Bond, T.E. Link, D. Marksand M.H. Unsworth, 2005. The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: examples from a young and an old-grown Douglas-fir forest, *Agricultural and Forest Meteorology*, 130: 113–129.

Rutter, A.J., K.A. Kershaw, P.C. Robins and A.J. Monton, 1971. A predictive model of rainfall interception forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine, *Agricultural Meteorology*, 9: 367–384.

Savenije, H.H.G., 2004. The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary?, *Hydrological Processes*, 18 (8): 1507–1511.

Staelens, J., A.D. Schrijver, K. Verheyen and N. Verhoest, 2008. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvestris* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology, *Hydrological Processes*, 22: 33–45.

Teklehaimanot, Z., and P.G. Jarvis, 1991. Direct measurement of evaporation of intercepted water from forest canopies, *Journal of Applied Ecology*, 28: 603-618.

Tobón Marin, C., W. Bouten and J. Sevink, 2000. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia, *Journal of Hydrology*, 237: 40–57.

Ubarana, V.N., 1996. Observations and modeling of rainfall interception at two experimental sites in Amazonia, In J.H.C. Gash, C.A. Nobre, J.M. Roberts, R.L. Victoria (eds): Amazonian Deforestation and Climate, Institute of Hydrology, Wallingford, pp. 151–162.

Valente, F., David, J.S., Gash and J.H.C., 1997. Modelling interception loss for sparse eucalypt and pine forest in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models, *Journal of Hydrology*, 237: 40-57.

Zinke, P.J., 1967. Forest interception study in the United States, in W.E. Sopper, and H.W. Lull, eds., Forest Hydrology, Pergamon Press, Oxford, 137–161.

Evaluation of the Sparse Gash interception model in a *Pinus eldarica* plantation located in a semi-arid climate zone

M. Motahari[1], and P. Attarod[2*]

[1]M.Sc. Graduated, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I.R. Iran
[2]Associate Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I.R. Iran

(Received: 13 November 2012, Accepted: 3 March 2014)

Abstract

Research of the rainfall intercepted by trees is crucial in the management of water resources of afforestation in arid and semi-arid regions. The goal of this study was to evaluate the Sparse Gash model for estimation of rainfall interception (*I*) in a mature *Pinus eldarica* afforestation located in the Chitgar Forest Park in a semi-arid climate zone. Measurements of gross precipitation (P_G) and throughfall (*TF*) were recorded on an event basis from 2009, September to 2010, April. *I* was calculated as the difference between P_G and *TF*. Estimation of *I* was made by the Sparse Gash model, a powerful tool for estimating *I*, which uses canopy water storage capacity (*S*), free throghfall (*p*), and the ratio between evaporation rate from the wet canopy to the mean rainfall intensity ($\overline{E}/\overline{R}$). For the measurement period, P_G totaled 164.8 mm during 30 rainfall events and rainfall interception loss totaled 61.2 mm. The model predicted *I* to be 62.19 mm for all the storms analyzed. This only differed from the measured *I* (61.2 mm) by 0.99 mm. A linear significant relationship (r^2 = 0.8772) was found between estimated *I* by the model and the measured *I*. Root mean square error (*RMSE*) of the estimation was 0.49 mm in a storm scale corresponds to 23.7% error. We concluded that the Sparse Gash model successfully predicted *I* for *P. eldarica* afforested regions of the semi-arid climate zone of Iran where a field measurement of rainfall interception is time-consuming and laborious.

Keywords: Afforestation, Interception, *Pinus eldarica*, Sparse Gash model.

* Corresponding Author Tel: +982632223044 Email: attarod@ut.ac.ir