

نقد و بررسی کتاب «اکوهیدرولوژی جنگل»

امید فتحی زاده^{۱،۲}

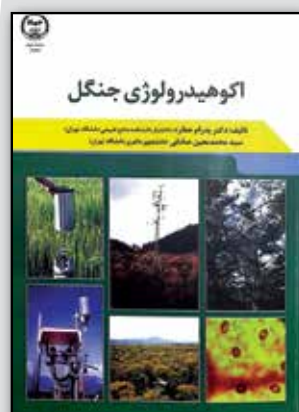
۱- مقدمه

کتاب «اکوهیدرولوژی جنگل» به قلم دکتر پدram عطارد، عضو هیئت علمی گروه جنگل داری و اقتصاد جنگل دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران و سید محمد معین صادقی، دانشجوی دکتری دانشگاه تهران، تألیف شده و در سال ۱۳۹۶ خورشیدی توسط انتشارات سازمان جهاد دانشگاهی تهران در هشت فصل و ۲۶۰ صفحه منتشر شده است. این اثر از معدود منابع منسجم فارسی است که به طور اختصاصی به پیوند میان هیدرولوژی، اکولوژی و جنگل داری می پردازد. نویسندگان در پیش درآمد تصریح می کنند: «در این کتاب سعی شده است به موضوعات مختلف مرتبط با علم اکوهیدرولوژی شامل منابع آب در جهان و ایران، چرخه هیدرولوژی و معرفی اجزای مختلف آن، کلیاتی در زمینه دانش اکوهیدرولوژی، فرآیندهای تبخیر، تعرق و تبخیر-تعرق، توزیع اجزای باران در هنگام برخورد با درختان، ترکیب شیمیایی تاج بارش و ساقاب، پارامترهای اکوهیدرولوژیک درختان و چگونگی محاسبه آنها و در نهایت مدل سازی های اکوهیدرولوژیک و راهکارهای ارزیابی این مدل ها پرداخته شود.» این گزاره نشان می دهد، کتاب با هدف پرکردن خلأ یک منبع جامع آموزشی- پژوهشی در حوزه اکوهیدرولوژی جنگل در ایران نوشته شده است، حوزه ای که در مرور ادبیات بین المللی طی دو دهه اخیر رشد چشمگیری داشته است (McDonnell, 2003; Rodriguez-Iturbe, 2000; Porporato & Rodriguez-Iturbe, 2003; Newman et al., 2006). با این حال، هر اثر علمی در کنار نقاط قوت، محدودیت ها و کاستی هایی دارد که نقد روشمند آن، هم برای بهبود چاپ های بعدی و هم برای جهت دهی به پژوهش های آینده ضروری است. در این نوشتار تلاش می شود، کتاب «اکوهیدرولوژی جنگل» از منظر ساختار، انسجام مفهومی، روش شناسی، پوشش ادبیات و مرور منابع، پیوند با مدیریت منابع آب و جنگل و به ویژه از منظر غیبت تحلیل های الگوهای زمانی- مکانی (Spatio-temporal patterns) در اکوهیدرولوژی جنگل، به صورت نظام مند نقد و ارزیابی شود.

۲- ساختار و معماری محتوایی کتاب

۲-۱- انسجام فصل بندی و توالی مفهومی

کتاب از منظر ساختار کلی، توالی به نسبت منطقی ای را دنبال می کند: از «منابع آب» و «چرخه هیدرولوژی» آغاز می کند، سپس وارد «اکوهیدرولوژی» به عنوان چهارچوب مفهومی می شود، سه فرایند کلیدی «تبخیر، تعرق و تبخیر-تعرق» را تشریح می کند و در ادامه به «توزیع اجزای باران در جنگل»، «ترکیب شیمیایی تاج بارش و ساقاب»، «پارامترهای اکوهیدرولوژیک تاج پوشش و تنه» و



۱- استادیار گروه جنگل داری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی اهر، دانشگاه تبریز، اهر، ایران
۲- گروه پژوهشی منابع طبیعی و گیاهان دارویی، مرکز تحقیقات علوم و فناوری های زیستی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
پست الکترونیک: omid.fathizadeh@yahoo.com

در نهایت «مدل‌سازی‌های اکوهیدرولوژیک و راهکارهای ارزیابی» می‌پردازد. این توالی، از نظر آموزشی، برای دانشجویان منابع طبیعی، جنگل‌داری و آبخیزداری قابل دفاع است، زیرا از مفاهیم عمومی‌تر به سمت مفاهیم تخصصی‌تر حرکت می‌کند. برای مثال، در فصل دوم، نویسندگان چرخه هیدرولوژی را چنین تعریف می‌کنند: «چرخه هیدرولوژی یا چرخه آب، حرکت و جابه‌جایی آب در بخش‌های مختلف کره زمین است (هم در زیرزمین و هم روی آن) ... چرخه آب نقطه آغاز و پایانی ندارد و طی آن، آب از حالت مایع به بخار یا جامد تبدیل می‌شود و دوباره به شکل اول بازمی‌گردد.» این نوع بیان، برای ایجاد درک پایه‌ای از سیستم هیدرولوژیک ضروری است و زمینه را برای ورود به مباحث پیچیده‌تر اکوهیدرولوژی فراهم می‌کند. با این حال، از منظر یک خواننده پژوهشگر، دو نقد مهم به معماری محتوایی وارد است:

• فصل اول و دوم این کتاب، بیش از حد به «هیدرولوژی عمومی» پرداخته است، با توجه به هدف کتاب که «اکوهیدرولوژی جنگل» است، نویسندگان حجم قابل توجهی از متن را به مباحث اختصاص می‌دهند که در کتاب‌های کلاسیک هیدرولوژی (مانند مهدوی، ۱۳۹۰؛ عزیزاده، ۱۳۹۴؛ صفوی، ۱۳۹۳) به تفصیل آمده است. این امر، اگرچه برای دانشجویان کم‌تجربه مفید است، اما از منظر نوآوری و ارزش افزوده علمی، کتاب را تا حدی به تکرار ادبیات موجود نزدیک می‌کند.

• پیوند بین فصل‌های عمومی و فصل‌های تخصصی، به صورت تحلیلی و مفهومی به خوبی صورت‌بندی نشده است. برای مثال انتظار می‌رفت، در انتهای فصل دوم (چرخه هیدرولوژی)، یک بخش تحلیلی با عنوانی مانند «جایگاه جنگل در چرخه هیدرولوژی» یا «نقش ساختار جنگل در تعدیل بیلان آبی» اضافه شود تا گذار مفهومی به فصل سوم (اکوهیدرولوژی) تقویت شود. در جمع‌بندی فصل دوم آمده است: «اولین گام در مدیریت صحیح منابع آب، شناخت کلیه اجزای چرخه‌های هیدرولوژیک است، در مرحله بعد باید روابط بین این اجزا با هم و نیز با پوشش گیاهی شناخته شود.»

این جمله، نقطه عزیمت بسیار خوبی برای ورود به اکوهیدرولوژی است، اما در ساختار کتاب، این پیوند به صورت تحلیلی بسط داده نشده و بیشتر در حد یک گزاره کلی باقی مانده است.

علاوه بر این، در فصل دوم که به مبانی چرخه هیدرولوژی اختصاص دارد، غیبت ذکر منبع برای برخی شکل‌های مفهومی (همانند نمودار ساده چرخه آب در حوضه آبخیز) مشهود است. با توجه به اینکه این شکل‌ها برگرفته از منابع خارجی هستند، فقدان استناد دقیق به مأخذ اصلی، از دو منظر قابل تأمل است: نخست از منظر اخلاق علمی و امانت‌داری در نشر که غایتی اجتناب‌ناپذیر در آثار پژوهشی است و دوم از منظر کیفیت بصری، زیرا عدم ارجاع به منبع اصلی، امکان ردیابی و دسترسی به نسخه‌های اصلی با کیفیت مناسب را نیز از مخاطب سلب می‌کند. انتظار می‌رود در چاپ‌های آینده، نویسندگان با درج دقیق مرجع برای هر شکل، ضمن رعایت حقوق مادی و معنوی صاحبان آثار، به ارتقای اعتبار علمی و یکپارچگی بصری کتاب نیز کمک کنند.

۲-۲- جایگاه فصل اکوهیدرولوژی در معماری کتاب

فصل سوم، قلب مفهومی کتاب است. نویسندگان اکوهیدرولوژی را چنین تعریف می‌کنند:

«درواقع اکوهیدرولوژی دانشی است که به مطالعه چگونگی حرکت و ذخیره آب در سیستم چرخه آب، محیط و ساختار و کارکرد گیاهی و تعادل متقابل آن در زیست‌بوم‌های مختلف می‌پردازد.» سپس به درستی تأکید می‌کنند: «هسته علم اکوهیدرولوژی جنگل، مطالعه ارتباط متقابل بین پوشش گیاهی، اقلیم و چرخه‌های آبی است.»

این تعریف، با ادبیات بین‌المللی (Newman et al., 2002؛ Zalewski, 2006) همخوان است و نشان می‌دهد، نویسندگان با جریان اصلی این حوزه آشنا هستند. نقطه قوت مهم این فصل، ارجاع به مطالعات روز (تا حدود سال ۲۰۱۵ در زمان چاپ کتاب) و استفاده از منابع معتبر است، برای مثال، به رشد نمایی مقالات اکوهیدرولوژی در Web of Science اشاره می‌شود و این نکته که: «طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ میلادی، تعداد ۳۰۵ مقاله در زمینه اکوهیدرولوژی چاپ شده، در حالی که در دهه پیش از آن، این تعداد ۱۸ مقاله بوده است ...». این نوع استناد، کتاب را از سطح یک متن فقط آموزشی به سطح یک متن نیمه‌پژوهشی ارتقا می‌دهد. با این حال، در همین فصل نیز چند نقد اساسی قابل طرح است:

• اکوهیدرولوژی بیشتر در سطح «تعریف و توصیف» باقی می‌ماند تا «تحلیل و نظریه‌پردازی». برای مثال، اگرچه به نقش تغییر کاربری اراضی، گونه‌های مهاجم و تغییر اقلیم اشاره می‌شود، اما چهارچوب‌های نظری مهمی مانند “Eco-hydrological optimality” یا “Stochastic soil moisture dynamics” یا “Threshold behavior in ecohydrological systems” که در ادبیات بین‌المللی مطرح هستند (Rodriguez-Iturbe, 2000؛ Porporato et al., 2004)، در کتاب غایب هستند.

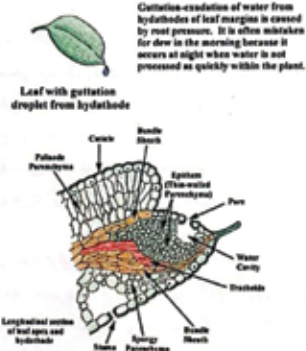
• بعد زمانی - مکانی (Spatio-temporal) متغیرهای اکوهیدرولوژی تقریباً نادیده گرفته شده است. نویسندگان به خوبی به تغییرات اقلیمی در نواحی زاگرس و خزری (با تحلیل روند دما، بارش، رطوبت نسبی، سرعت باد و تبخیر - ترقق مرجع) می‌پردازند، اما این تحلیل‌ها بیشتر در سطح سری زمانی ایستگاهی هستند و به الگوهای مکانی (Spatial patterns) و تعاملات مقیاس (Scale interactions) در اکوهیدرولوژی جنگل پرداخته نمی‌شود. این نکته در بخش‌های بعدی به عنوان یکی از ضعف‌های محوری کتاب بسط داده خواهد شد.

۳- نقد روش‌شناختی: از تبخیر و ترقق تا پارامترهای اکوهیدرولوژیک

۳-۱- فصل تبخیر، ترقق و تبخیر-ترقق: قوت در آموزش، ضعف در تلفیق

فصل چهارم، یکی از فنی‌ترین فصل‌های کتاب است و سه فرایند کلیدی تبخیر، ترقق و تبخیر-ترقق را با جزئیات قابل قبول تشریح می‌کند. تعریف تبخیر: «تبدیل آب به بخار آب یا ورود آب از سطح زمین به داخل هوا سپهر را تبخیر می‌گویند ... فرایند تبخیر، گرما را از محیط اطراف کسب می‌کند، به همین دلیل است که هنگام تبخیر

Hydathode



شکل ۲- روزنه های آبی در انتهای برگ ها که برخلاف روزنه های هوایی، همواره بازند.



شکل ۲- اندازه گیری ناج بارش و ساقاب درختان کاج تهران (*Pinus eldarica*) در پارک جنگلی چیتگر تهران (صادقی، ۱۳۹۳)



شکل ۲- باران سنج های دستی برای اندازه گیری باران و ناج بارش



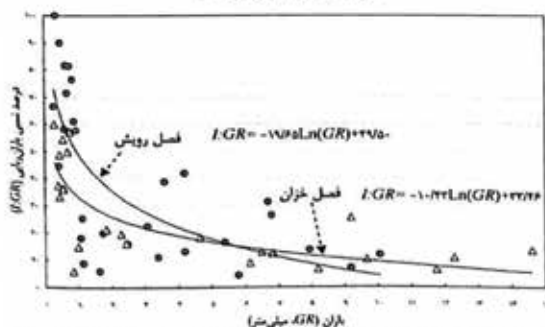
شکل ۳- باران سنج خودکار مدل NOAA II ساخت شرکت ETI Instrument Systems, Inc. ژاپن



شکل ۶- دستگاه LI-1600 Steady State Porometer

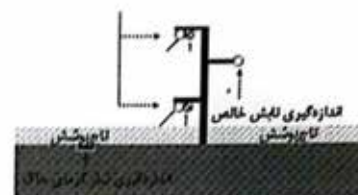


شکل ۹- توده زبان گنجشک (*Fraxinus rotundifolia*) بررسی شده توسط Sadeghi و همکاران (۲۰۱۵) برای اندازه گیری توزیع اجزای باران



شکل ۱۰- رابطه بین مقدار باران و درصد نسبی باران دریا (F:GR) در فصول رویش (دایره های توپر) و فصل خزان (مثلث های توخالی) - ۲۴ رخداد باران، توده زبان گنجشک در پارک جنگلی چیتگر (Sadeghi et al., 2015b)

ترمومترهای خشک و تر



شکل ۱۲- نمایش شماتیک از اندازه گیری نسبت برون و تبخیرتوق واقعی (Attarod, 2005)



شکل ۱۵- اندازه گیری نسبت برون، تبخیرتوق واقعی و متغیرهای هواشناسی برای گندم (*Triticum aestivum* L.) در مزرعه آزمایشی دانشگاه کشاورزی و فناوری توکیو، ژاپن. ناهش خالص خورشی در ارتفاع دو تا چهار متر، حسگرهای خشک و تر برای اندازه گیری اختلاف فشار بخار و دما در دو ارتفاع ۵/۵ تا ۳ و ۲/۵ متر اندازه گیری شدند. مقدار واکنش ۲۵۰ متر محاسبه و در نظر گرفته شد (Attarod, 2005; Attarod et al., 2009)

از روی پوست، احساس خنکی می‌کنید.» تعریف تعرق: «خروج آب به صورت گاز از گیاه را تعرق می‌نامند که اغلب توسط روزنه‌های هوایی انجام می‌شود ... در زمان زیست گیاه، کمتر از ۵ درصد آب جذب شده توسط ریشه‌ها برای رشد آن استفاده می‌شود، به عبارت دیگر، بیشتر از ۹۵ درصد آب جذب شده از طریق فرایندهای تعرق و تعریق از گیاه خارج می‌شود.» این توضیحات، هم از نظر فیزیولوژیک و هم از نظر هیدرولوژیک دقیق هستند و با منابع کلاسیک (Nobel, 1991؛ Allen et al., 1998؛ Taiz & Zeiger, 2002) همخوانی دارند. همچنین، تشریح آناتومی برگ، انواع تعرق (روزنه‌ای، کوتیکولی، عدسکی) و سازوکار بازوبسته شدن روزنه‌ها، کتاب را برای دانشجویان اکوفیزیولوژی و جنگل‌داری جذاب می‌کند، اما از منظر اکوهیدرولوژی جنگل، دو خلأ مهم دیده می‌شود:

۱. فصل تبخیر و تعرق، به طور عمده در سطح «گیاه منفرد» و «فرایندهای فیزیولوژیک» باقی می‌ماند و کمتر به پیامدهای اکوهیدرولوژیک در مقیاس توده جنگلی، حوزه آبخیز و چشم‌انداز می‌پردازد. برای مثال، انتظار می‌رفت پس از تشریح سازوکار تعرق به این پرسش پرداخته شود که تفاوت الگوهای تعرق در جنگل‌های سوزنی‌برگ و پهن‌برگ چگونه بر بیلان آبی حوزه، جریان پایه (Base flow) و حساسیت به خشک‌سالی اثر می‌گذارد (Bosch & Calder, 1979؛ Hewlett, 1982).
۲. مدل‌های تبخیر- تعرق، بیشتر در سطح معرفی فرمول‌ها باقی می‌مانند و ارزیابی انتقادی آن‌ها در شرایط اقلیمی ایران انجام نمی‌شود. برای مثال، روش FAO-Penman-Monteith به عنوان استاندارد جهانی تبخیر- تعرق مرجع معرفی می‌شود، اما بحثی در مورد محدودیت‌های آن در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، حساسیت به کیفیت داده‌های ورودی (رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش)، یا مقایسه آن با روش‌های ساده‌تر (Turc, 1961؛ Hargreaves-Samani, 1985) در شرایط کم‌داده ایران ارائه نمی‌شود. این در حالی است که در ادبیات داخلی و خارجی، بحث‌های جدی در این زمینه وجود دارد (Mohawesh, 2011؛ Alexandris et al., 2008).

۳-۲- پارامترهای اکوهیدرولوژیک تاج‌پوشش و تنه: نقطه قوت اصلی کتاب فصل هفتم، شاید از نظر تخصصی، مهم‌ترین سهم کتاب در ادبیات فارسی اکوهیدرولوژی جنگل است. نویسندگان مجموعه‌ای از پارامترهای کلیدی را معرفی و روش محاسبه آن‌ها را با جزئیات ارائه می‌کنند:

- ضریب قیف‌شکل تاج (F)
- نقطه اشباع آب تاج‌پوشش (برآوردی و محاسباتی)
- ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش (S)
- ضریب تاج‌بارش مستقیم (p)
- نسبت تبخیر به شدت باران در طول بارندگی (E/R)

- ظرفیت نگهداری آب تنه (S_t)
- ضریب ساقاب (p_t)
- نقطه اشباع آب تنه (P''_G)

برای مثال، ضریب قیف‌شکل تاج چنین تعریف می‌شود: «صورت این کسر نشان می‌دهد که چه مقدار از باران رسیده به کف جنگل ... از طریق مساحت تاج‌پوشش درخت، متمرکز و تجمع شده است. مخرج این کسر نشان می‌دهد که به طور متوسط چه مقدار از باران رسیده به کف جنگل ... فقط از طریق مساحت تنه درخت به کف جنگل می‌رسد» و سپس با داده‌های تجربی از پارک جنگلی چیتگر، مقدار F برای کاج تهران و سرو نقره‌ای محاسبه و تحلیل می‌شود. این ترکیب «تعریف نظری + مثال میدانی» یکی از نقاط قوت جدی کتاب است و آن را از یک متن صرفاً نظری متمایز می‌کند. همچنین، معرفی و مقایسه روش‌های مختلف برآورد ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش (Pereira, Mean, Morton و Minimum) و بحث در مورد مزایا و محدودیت‌های هر کدام، نشان‌دهنده تسلط نویسندگان بر ادبیات تخصصی است (Gash & Mor-Leyton et al., 1967؛ ton, 1978؛ Pereira et al., 2009؛ Klaassen et al., 1998؛ Sadeghi et al., 2014, 2015). با این وجود، در همین فصل نیز چند نقد قابل طرح است:

- تمرکز شدید بر روش‌های رگرسیونی کلاسیک و غیبت رویکردهای نوین مدل‌سازی. در سال‌های اخیر، اتکای صرف به روش‌های رگرسیونی کلاسیک در مدل‌سازی اکوهیدرولوژیک ناکافی تلقی شده و پژوهش‌ها به طور فزاینده‌ای به سمت رویکردهای نوین حرکت کرده‌اند. مدل‌های فرایندی- مکانیکی (Process-based) به عنوان ابزارهای کلیدی برای بازنمایی واقع‌گرایانه فرایندهای هیدرولوژیک توسعه یافته‌اند و مطالعات جدید نشان داده‌اند، این مدل‌ها با ادغام داده‌های ایزوتوپی و سنجش‌ازدور می‌توانند دقت و سازگاری مکانی را به طور چشمگیری افزایش دهند (Wu, Birkel et al., 2011؛ et al., 2026). هم‌زمان، مدل‌های مبتنی بر داده (Data-driven) مانند شبکه‌های عصبی، LSTM و مدل‌های هیبریدی فیزیک‌محور، نقش مهمی در پیش‌بینی جریان‌ات آبی، رطوبت خاک و تحلیل تخریب اکوهیدرولوژیک ایفا کرده‌اند و در شرایط داده‌کم نیز عملکرد قابل توجهی داشته‌اند (Kratzert et al., 2019). در کنار این دو رویکرد، مدل‌های بیزی به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین ابزارهای برآورد پارامتر و مدیریت عدم قطعیت در مدل‌های اکوهیدرولوژیک مطرح شده‌اند و قادرند پارامترهای مدل‌های پیچیده را با دقت زیاد و کارایی محاسباتی بهتر تخمین بزنند (Jeremiah et al., 2011؛ Vrugt et al., 2009). این مجموعه شواهد نشان می‌دهند، گذار از روش‌های کلاسیک به مدل‌های فرایندی، داده‌محور و بیزی، اکنون به یک ضرورت علمی در اکوهیدرولوژی تبدیل شده است.
- عدم پیوند کافی بین پارامترهای اکوهیدرولوژیک و پیامدهای مدیریتی. برای مثال، ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش (S) و ضریب ساقاب (p_t) می‌توانند به طور مستقیم در طراحی جنگل‌کاری‌ها، انتخاب گونه‌ها برای کاهش سیلاب یا افزایش تغذیه آب زیرزمینی

و ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بیلان آبی جنگل‌ها به کار روند، اما کتاب این پل را به صورت تحلیلی نمی‌سازد و بیشتر در سطح «محاسبه پارامتر» باقی می‌ماند.

۴- نقد محتوایی فصل‌های کاربردی: توزیع اجزای باران، تاج‌بارش، ساقاب و کیفیت آب

۴-۱- توزیع اجزای باران در جنگل: قوت در روش، ضعف در تعمیم فصل پنجم، به‌درستی از نقطه‌ای آغاز می‌شود که هیدرولوژی جنگل را از هیدرولوژی عمومی متمایز می‌کند: «در اکوسیستم‌های جنگلی، تاج و تنه درختان با تأثیر بر توزیع مجدد آب باران، تأثیر مهمی در چرخه آب در سطح محلی و حتی حوزه آبخیز دارند».

سپس، سه جزء اصلی باران در جنگل (باران‌ریایی، تاج‌بارش، ساقاب) تعریف و روابط ساده بیلان ($I = GR - (TF + SF)$) ارائه می‌شود. روش‌های اندازه‌گیری تاج‌بارش و ساقاب با جزئیات عملی (نوع باران‌سنج، نحوه استقرار، استفاده از فویل آلومینیومی برای کاهش تبخیر، استفاده از روغن سبک، طراحی ناودان‌های ماریچی ساقاب، محاسبه عمق ساقاب براساس تصویر تاج) تشریح شده است. این بخش، از نظر کاربردی، برای هر پژوهشگری که قصد طراحی یک مطالعه میدانی را در جنگل‌های ایران دارد، بسیار ارزشمند است، اما از منظر تحلیلی، چند نکته قابل‌نقد است:

۱. تأکید بر روش‌های نقطه‌ای (Plot-scale) و غیبت بحث در مورد تعمیم به مقیاس حوزه، درحالی‌که در مرور منابع و ادبیات بین‌المللی، یکی از چالش‌های اصلی، تعمیم نتایج (Upscale) تاج‌بارش و ساقاب از مقیاس درخت و قطعه‌نمونه به مقیاس حوزه و چشم‌انداز است (Van Dijk & Bruijnzeel, 2001a, b; Muzylo et al., 2009). کتاب تقریباً به این موضوع نمی‌پردازد. این خلأ، به‌ویژه برای مدیریت منابع آب در حوزه‌های جنگلی ایران مهم است.

۲. عدم استفاده از ابزارهای تحلیل مکانی مانند GIS و سنجش‌ازدور در مطالعه الگوهای مکانی تاج‌بارش و ساقاب، درحالی‌که در سال‌های اخیر، ترکیب داده‌های میدانی با داده‌های LiDAR، تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک زیاد و مدل‌های سه‌بعدی ساختار تاج، به یکی از محورهای اصلی پژوهش در هیدرولوژی جنگل تبدیل شده است. کتاب در سطح روش‌های کلاسیک «باران‌سنج- ناودان‌های ماریچی دور تنه درختان- استوانه مدرج» باقی می‌ماند. این موضوع، به‌ویژه از منظر نقد «عدم پرداختن به تحلیل‌های زمانی- مکانی» بسیار کلیدی است.

۴-۲- ترکیب شیمیایی تاج‌بارش و ساقاب: نقطه قوت در ورود به کیفیت آب، ضعف در پیوند با چرخه مواد

فصل ششم، یکی از بخش‌های به‌نسبت نوآورانه کتاب است که به ترکیب شیمیایی تاج‌بارش و ساقاب می‌پردازد. نویسندگان به‌درستی اشاره می‌کنند: «درختان از طریق تاج‌پوشش (فرایند تاج‌بارش) و تنه (فرایند ساقاب)، بر کیفیت آب رسیده به کف جنگل (باران خالص) اثرگذارند و سه فرایند اصلی را بر تغییر ترکیب شیمیایی تاج‌بارش و ساقاب مؤثر می‌دانند: ۱) تجمع مواد هواسپهری بر سطح تاج و تنه،

۲) ترشح مواد داخلی گیاه و ۳) جذب عناصر از محلول باران. مطالعات موردی ارائه‌شده (مانند بررسی سرب و کادمیوم در تاج‌بارش کاج تهران و سرو نقره‌ای در پارک چیتگر، یا مقایسه pH و EC در جنگل‌های راش و پیسه‌آ در لاجیم نشان می‌دهد، نویسندگان به‌طور جدی به بعد «کیفیت آب» در اکوهیدرولوژی جنگل توجه کرده‌اند، بعدی که در بسیاری از متون کلاسیک هیدرولوژی جنگل کمتر دیده می‌شود. بااین‌حال، چند نقد مهم وجود دارد:

• تحلیل‌ها به‌طور عمده در سطح «مقایسه میانگین‌ها» باقی می‌مانند و کمتر به چرخه مواد غذایی (Nutrient cycling) و پیامدهای اکولوژیک بلندمدت می‌پردازند. برای مثال، افزایش سرب و کادمیوم در تاج‌بارش کاج تهران، علاوه‌بر کاهش موقت آلودگی هوا، می‌تواند به انباشت فلزات سنگین در خاک، تغییر ترکیب میکروارگانیسم‌ها و انتقال به زنجیره غذایی منجر شود، اما این ابعاد در کتاب به‌صورت نظام‌مند تحلیل نشده است.

• بعد زمانی- مکانی در کیفیت آب نیز غایب است. اگرچه به تفاوت فصلی در EC، pH و غلظت فلزات اشاره می‌شود، اما هیچ تحلیلی از الگوهای مکانی (مثلاً تغییرات در فاصله از جاده، در شیب‌های مختلف و در موقعیت‌های توپوگرافی متفاوت) ارائه نمی‌شود. این در حالی است که در اکوهیدرولوژی مدرن، پیوند بین الگوهای مکانی رسوب‌گذاری هواسپهری، ساختار تاج و کیفیت آب، یکی از محورهای مهم پژوهش است (Staelens et al., 2008; Lovett, 1994).

۵- غیبت تحلیل‌های زمانی- مکانی: مهم‌ترین ضعف مفهومی کتاب یکی از نقدهای محوری که می‌توان به کتاب «اکوهیدرولوژی جنگل» وارد کرد، عدم پرداختن نظام‌مند به تحلیل‌های زمانی- مکانی (Spatial-temporal analysis) در اکوهیدرولوژی جنگل است، درحالی‌که خود نویسندگان در فصل سوم، به‌طور گسترده به تغییرات اقلیمی در نواحی زاگرس و خوزی می‌پردازند و ذکر می‌کنند: «در دهه اخیر، بارندگی سالانه در این ناحیه، ۱۷/۵ درصد کاهش یافته است ... نمایه خشکی دومارتن ... کاهش یافته و اقلیم به سمت خشک‌تر شدن پیش رفته است». این نوع تحلیل روند، اگرچه ارزشمند است، اما در چند سطح نیازمند تعمیق است:

۵-۱- بعد زمانی: فراتر از روندهای خطی
تحلیل‌های ارائه‌شده در کتاب، به‌طور عمده بر مقایسه دو دوره زمانی (مثلاً ۱۹۸۷-۱۹۹۹ و ۲۰۰۰-۲۰۱۰) و محاسبه درصد تغییرات میانگین‌ها استوار است. این رویکرد، چند محدودیت دارد:

- عدم بررسی نوسانات درون‌دوره‌ای (Intra-period variability)، برای مثال، تغییر در فراوانی رخداد‌های حدی (Extreme events)، تغییر در توزیع فصلی بارش یا تغییر در طول دوره‌های خشک متوالی.
- عدم استفاده از روش‌های پیشرفته تحلیل سری زمانی مانند آزمون من‌کنندال، تحلیل موجک (Wavelet analysis)، یا مدل‌های ARIMA برای بررسی ساختار وابستگی زمانی.



• عدم پیوند مستقیم بین تغییرات زمانی اقلیم و پاسخ‌های اکوهیدرولوژیک جنگل. برای مثال، چگونه افزایش تبخیر-تعرق مرجع در زاگرس جنوبی، الگوی تاج‌بارش، باران‌رایی، یا تعرق واقعی توده‌های بلوط را تغییر می‌دهد؟

در مرور منابع و ادبیات بین‌المللی، این نوع پیوندها به‌طور گسترده بررسی شده‌اند (D'Odorico et al., 2006; Rodriguez-Iturbe, Breshears et al., 2009). اما کتاب بیشتر در سطح «گزارش تغییرات اقلیمی» (2000)، باقی می‌ماند و آن را به‌طور سیستماتیک به پارامترهای اکوهیدرولوژیک جنگل متصل نمی‌کند.

۵-۲- بعد مکانی: غیبت تحلیل‌های مکانی و مقیاس

از منظر مکانی، کتاب تقریباً به‌طور کامل بر مطالعات نقطه‌ای (ایستگاه هواشناسی، توده جنگلی منفرد، پارک جنگلی خاص) تکیه دارد. هیچ‌گونه استفاده‌ای از:

- نقشه‌های مکانی بارش، دما، تبخیر-تعرق،
 - نقشه‌های پوشش زمین و کاربری اراضی،
 - مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) برای تحلیل نقش توپوگرافی در الگوهای اکوهیدرولوژیک،
 - یا ابزارهای GIS و سنجش‌ازدور برای تعمیم نتایج،
- در کتاب دیده نمی‌شود. این در حالی است که خود نویسندگان در پیش‌درآمد تأکید می‌کنند:

«در علم اکوهیدرولوژی، کلیه اجزای اکوسیستم‌ها که بر معادله بیلان آبی تأثیرگذارند، بررسی می‌شوند» و در فصل اول، به‌خوبی به مفهوم «مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM)» و ضرورت نگاه جامع به حوزه آبخیز اشاره می‌کنند، اما این نگاه یکپارچه، در سطح تحلیل‌های مکانی اکوهیدرولوژیک جنگل، به‌صورت عملیاتی پیاده نشده است.

در ادبیات مدرن اکوهیدرولوژی، تحلیل‌های مکانی-زمانی، قلب بسیاری از پژوهش‌ها از جمله موارد زیر است:

- مدل‌سازی مکانی تبخیر-تعرق و جنگل با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای (MODIS, Landsat);
- تحلیل الگوهای مکانی تاج‌بارش و ساقاب با استفاده از LiDAR و مدل‌های سه‌بعدی تاج؛
- بررسی ارتباط بین ناهمگنی مکانی خاک، پوشش گیاهی و رطوبت خاک در مقیاس حوزه (Rodriguez-Iturbe, 2000).

غیبت این بعد در کتاب باعث می‌شود، اثر، باوجود قوت‌های جدی در سطح «درخت-توده-ایستگاه»، نتواند به‌طور کامل با جریان اصلی اکوهیدرولوژی جهانی همگام شود.

۶- مدل‌سازی‌های اکوهیدرولوژیک و ارزیابی مدل‌ها: گامی مهم، اما نیمه‌تمام

فصل هشتم، به مدل‌سازی‌های اکوهیدرولوژیک و راهکارهای ارزیابی می‌پردازد. این فصل، از چند جهت قابل‌تحسین است:

• تعریف روشن مدل و مدل‌سازی و تأکید بر این نکته که «رسیدن به مدلی که دقیقاً مشابه سیستم واقعی عمل کند، غیرممکن است» و مدل‌ها همواره ساده‌سازی واقعیت‌اند.

• معرفی طیف گسترده‌ای از مدل‌های هیدرولوژیک و اکوهیدرولوژیک برای تبخیر، تعرق، تبخیر-تعرق و باران‌رایی (Rutter, Gash, Sellers, Liu, Valente, Penman, Massman, Thornthwaite, Priestley-Taylor, Hargreaves, Dooren-bos-Pruitt, FAO-Penman-Monteith) و غیره.

• پرداختن به‌نسبت دقیق به مفاهیم واسنجی (Calibration) و اعتبارسنجی (Validation) و معرفی مجموعه‌ای از شاخص‌های آماری برای ارزیابی مدل‌ها (MAE, MFPE, RMSE, FB, MBE, NMPE, MAPE, R², WIA, Nash-Sutcliffe E, AIC).

• ارائه یک مطالعه موردی برای ارزیابی مدل اصلاح‌شده Gash در برآورد باران‌رایی در توده‌های کاج تهران و سرو نقره‌ای در پارک چیتگر، همراه با محاسبه شاخص‌های خطا و کارایی.

این فصل از نظر آموزشی، برای دانشجویانی که می‌خواهند وارد مدل‌سازی اکوهیدرولوژیک شوند، بسیار مفید است و در ادبیات و مرور منابع فارسی، کمتر متنی با این سطح از جزئیات در ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیک وجود دارد. با این حال، چند نقد اساسی مطرح است:

• مدل‌ها به‌طور عمده در سطح «مدل‌های نقطه‌ای و ساده» باقی می‌مانند و به مدل‌های توزیعی (Distributed) و نیمه‌توزیعی (Semi-distributed) که در حوزه‌های جنگلی کاربرد دارند (مانند RHESSys, MIKE-SHE, SWAT و مدل‌های Ecohy-drological landscape) اشاره‌ای نمی‌شود. این خلأ، پیوند بین اکوهیدرولوژی جنگل و مدیریت حوزه آبخیز را تضعیف می‌کند.

• تحلیل حساسیت، اگرچه به‌صورت مفهومی معرفی می‌شود، اما در عمل، تنها در حد ارائه فرمول شاخص حساسیت (SI) باقی می‌ماند و هیچ مطالعه موردی برای نشان‌دادن اینکه کدام پارامترها در مدل‌های اکوهیدرولوژیک جنگل ایران حساس‌ترند، ارائه نمی‌شود. درحالی‌که دانستن اینکه مثلاً ظرفیت نگهداری آب تاج‌پوشش، ضریب ساقاب، یا نسبت E/R کدام‌یک بیشترین تأثیر را بر برآورد باران‌رایی دارند، برای طراحی طرح‌های اندازه‌گیری میدانی و تخصیص منابع پژوهشی بسیار مهم است.

• باز هم بعد زمانی-مکانی در مدل‌سازی غایب است. مدل‌ها به‌طور عمده در سطح سری زمانی یک نقطه‌ای (ایستگاه، توده) ارزیابی می‌شوند و هیچ بحثی در مورد مدل‌سازی مکانی-زمانی، عدم قطعیت مکانی یا ادغام داده‌های میدانی با داده‌های سنجش‌ازدور در چهارچوب مدل‌سازی اکوهیدرولوژیک مطرح نمی‌شود.

۷- سخن پایانی

کتاب «اکوهیدرولوژی جنگل» باوجود کاستی‌های محتوایی و ساختاری، به‌واسطه چند نقطه قوت اساسی، جایگاه مهمی در مرور منابع علمی فارسی دارد. این اثر نخستین متن منسجم فارسی است

کتاب بیش از آنکه در «کمال» آن باشد، در «گشودن مسیر» نهفته است، مسیری که تداوم آن مستلزم پژوهش‌های میدانی گسترده‌تر، ادغام داده‌های مکانی- زمانی و توسعه مدل‌های اکوهیدرولوژیک سازگار با شرایط اقلیمی و جنگلی ایران است و اگر در چاپ‌های آینده با نگاه انتقادی و توسعه‌محور بازآفرینی شود، می‌تواند به مرجع نظری- کاربردی مدیریت پایدار جنگل‌ها و منابع آب کشور تبدیل شود.

منابع مورد استفاده

- صفوی، ح. ر.، ۱۳۹۳. هیدرولوژی مهندسی. انتشارات ارکان دانش، تهران، ۷۱۲ صفحه.
- علیزاده، ا.، ۱۳۹۴. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد، ۹۴۶ صفحه.
- مهدوی، م.، ۱۳۹۰. هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۳۴۲ صفحه.
- Alexandris, S., Stricevic, R. and Petkovic, S., 2008. Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula. *European Water*, 21(22): 17-28.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Rome.
- Birkel, C., Soulsby, C. and Tetzlaff, D., 2011. Modelling catchment-scale water storage dynamics: Reconciling tracer data with hydrological theory. *Hydrological Processes*, 25(25): 3924-3936.
- Bosch, J.M. and Hewlett, J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55(1-4): 3-23.
- Breshears, D.D., Cobb, N.S., Rich, P.M., Price, K.P., Allen, C.D., Balice, R.G., Romme, W.H., Kastens, J.H., Floyd, M.L., Belnap, J., Anderson, J.J., Myers, O.B. and Meyer, C.W., 2009. Tree die-off in response to global change-type drought: Mortality insights from a decade of plant water potential measurements. *New Phytologist*, 182(3): 765-779.
- Calder, I.R., 1979. The measurement of water losses from a forested area using a "natural" lysimeter. *Journal of Hydrology*, 41(1-2): 127-138.
- D'Odorico, P. and Porporato, A., 2006. Ecohydrology of arid and semiarid ecosystems: An introduction. In: D'Odorico, P. and Porporato, A. (Eds.), *Dryland Ecohydrology*. Springer, Dordrecht, pp. 1-28.
- Gash, J.H.C. and Morton, A.J., 1978. An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford Forest. *Journal of Hydrology*, 38(1-2): 49-58.
- Jeremiah, E., Sisson, S., Marshall, L., Mehrotra, R. and Sharma, A., 2011. Bayesian calibration and uncertainty analysis of hydrological models: A comparison of adaptive Metropolis and sequential Monte Carlo samplers. *Water Resources Research*, 47(7): W07547.
- Metropolis and sequential Monte Carlo samplers. *Water Resources Research*, 47(7): W07547.
- Klaassen, W., Bosveld, F. and de Water, E., 1998. Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, 212-213: 36-50.

که به‌طور اختصاصی به پیوند میان جنگل، آب و اقلیم می‌پردازد و مفاهیم بنیادین اکوهیدرولوژی را با بیانی علمی و درعین‌حال قابل‌فهم ارائه می‌کند. ترکیب سنجیده‌ای از مباحث نظری و داده‌های میدانی به‌ویژه در فصل‌های مرتبط با توزیع اجزای بارش، پارامترهای اکوهیدرولوژیک تاج‌پوشش و تنه و ترکیب شیمیایی تاج‌بارش و ساقاب، بر پایه مشاهدات واقعی از جنگل‌های ایران (چیتگر، زاگرس، هیرکانی، لاجیم) ارائه شده و ارزش تجربی کتاب را افزایش داده است. اتکای گسترده به منابع معتبر بین‌المللی و به‌روز بودن بخش قابل‌توجهی از ارجاعات تا حدود سال ۲۰۱۵ نیز کتاب را از سطح یک متن آموزشی داخلی فراتر می‌برد. افزون‌براین، پرداخت به‌نسبت دقیق به مباحث واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها و معرفی شاخص‌های آماری متنوع برای ارزیابی عملکرد مدل‌های اکوهیدرولوژیک، نقطه قوت دیگری است که به ارتقای کیفیت علمی اثر کمک کرده است. با این‌حال، کتاب در سطوح شکلی و محتوایی با کاستی‌هایی روبه‌روست. از منظر ساختار شکلی، هرچند تصاویر و نمودارهای اختصاصی برگرفته از یافته‌های میدانی مؤلفان از وضوح قابل‌قبولی برخوردار است، اما کیفیت بسیاری از نمودارها و شکل‌های اقتباسی از منابع دیگر به‌دلیل کپی‌برداری غیراصولی (احتمالاً اسکرین‌شات یا اسکن با کیفیت کم) از نسخه‌های چاپی، به‌شدت افت کرده و وضوح لازم برای تشخیص جزئیات ظریف را از خواننده سلب کرده است. همچنین، فقدان واژه‌نامه فارسی انگلیسی در پایان کتاب، به‌ویژه برای دانشجویان و پژوهشگرانی که با متون تخصصی انگلیسی سروکار دارند، کارایی آموزشی اثر را کاهش می‌دهد و با توجه به گستردگی اصطلاحات تخصصی در این حوزه، تدوین واژه‌نامه‌ای جامع می‌توانست به درک بهتر مفاهیم و تسهیل دسترسی به مراجع بین‌المللی کمک شایانی نماید.

در بعد محتوایی نیز، غلبه نگاه ایستگاهی بر تحلیل‌های حوزه‌ای و تحلیل‌های مکانی-زمانی، نبود پیوند عمیق میان فیزیولوژی گیاهی و بیلان آب در مقیاس‌های بالاتر، غیبت رویکردهای نوین مدل‌سازی (همچون مدل‌های داده‌محور، مدل‌های توزیعی و رویکردهای بیزی)، و همچنین پرداخت محدود به چرخه مواد غذایی و کیفیت آب، فاصله‌ای محسوس میان کتاب و جریان اصلی اکوهیدرولوژی جهانی ایجاد کرده است. برای ارتقای کتاب در چاپ‌های بعدی، افزودن فصلی مستقل درباره الگوهای زمانی- مکانی، تقویت پیوند میان فیزیولوژی گیاهی و بیلان آبی حوزه، گسترش مباحث مربوط به مدل‌های توزیعی و نیمه‌توزیعی و کاربرد پارامترهای میدانی در این مدل‌ها، توسعه بحث کیفیت آب و چرخه مواد غذایی با تأکید بر نقش جنگل در تنظیم ورودی عناصر و آلاینده‌ها و افزودن بخش‌های تحلیلی- کاربردی در انتهای هر فصل می‌تواند مسیر توسعه علمی اثر را هموار کند. درنهایت، کتاب «اکوهیدرولوژی جنگل» را می‌توان نقطه عطفی در مرور منابع فارسی این حوزه دانست، اثری که برای نخستین‌بار مجموعه‌ای از مفاهیم، روش‌ها و مطالعات میدانی را در قالبی منسجم گرد آورده است، اما همچنان برای همگامی با افق‌های جدید اکوهیدرولوژی نیازمند بازنگری و توسعه است. ارزش واقعی

- Van Dijk, A.I.J.M. and Bruijnzeel, L.A., 2001b. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 2: Model validation. *Journal of Hydrology*, 247(3-4): 239-262.
- Vrugt, J.A., ter Braak, C.J.F., Diks, C.G.H., Robinson, B.A., Hyman, J.M. and Higdon, D., 2009. Accelerating Markov chain Monte Carlo simulation by differential evolution with self-adaptive randomized subspace sampling. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 10(3): 273-290.
- Wu, S., Tetzlaff, D., Zheng, Y. and Soulsby, C., 2026. EcoTWIN 1.0: A fully distributed tracer-aided ecohydrological model tracking water, isotopes, and nutrients. *Geoscientific Model Development*, 19: 2257-2290.
- Zalewski, M., 2002. Ecohydrology-the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability. *Ecological Engineering*, 18(1): 7-18.
- Kratzert, F., Klotz, D., Brenner, C., Schulz, K. and Herrnegger, M., 2019. Towards learning universal, regional, and local hydrological behaviors using long short-term memory neural networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(12): 5089-5110.
- Leyton, L., Reynolds, E.R.C. and Thompson, F.B., 1967. Rainfall interception in forest and moorland. In: Sopper, W.E. and Lull, H.W. (Eds.), *Forest Hydrology*. Pergamon Press, pp. 163-178.
- Lovett, G.M., 1994. Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North America: An ecological perspective. *Ecological Applications*, 4(4): 629-650.
- McDonnell, J.J., 2003. Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response. *Hydrological Processes*, 17(9): 1869-1875.
- Mohawesh, O.E., 2011. Evaluation of evapotranspiration models for estimating daily reference evapotranspiration in arid and semiarid environments. *Plant, Soil and Environment*, 57(4): 145-152.
- Muzylo, A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J.J., Domingo, F. and Gash, J.H.C., 2009. A review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology*, 370(1-4): 191-206.
- Newman, B.D., Wilcox, B.P., Archer, S.R., Breshears, D.D., Dahm, C.N., Duffy, C.J., ... and Vivoni, E.R., 2006. Ecohydrology of water-limited environments: A scientific vision. *Water Resources Research*, 42(6): W06302.
- Nobel, P.S., 1991. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. Academic Press.
- Pereira, F.L., Gash, J.H.C., David, J.S., David, T.S., Monteiro, P.R. and Valente, F., 2009. Modelling interception loss from evergreen oak Mediterranean savannas: Application of the Gash analytical model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(3-4): 680-688.
- Porporato, A. and Rodriguez-Iturbe, I., 2003. Ecohydrology: A new paradigm. *Advances in Water Resources*, 26(1): 1-2.
- Porporato, A., Daly, E. and Rodriguez-Iturbe, I., 2004. Soil water balance and ecosystem response to climate change. *American Naturalist*, 164(5): 625-632.
- Rodriguez-Iturbe, I., 2000. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research*, 36(1): 3-9.
- Sadeghi, S.M.M., Attarod, P., Pypker, T.G. and Bagheri, H., 2014. Interception loss in a deciduous forest stand in northern Iran. *Journal of Hydrology*, 519: 2967-2977.
- Sadeghi, S.M.M., Attarod, P., Pypker, T.G. and Bagheri, H., 2015. Rainfall partitioning in a Pinus eldarica plantation in Tehran, Iran. *Ecohydrology*, 8(2): 356-367.
- Staelens, J., De Schrijver, A., Verheyen, K. and Verhoest, N.E.C., 2008. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: Influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrological Processes*, 22(1): 33-45.
- Taiz, L. and Zeiger, E., 2002. *Plant Physiology* (3rd ed.). Sinauer Associates.
- Turc, L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Annales Agronomiques*, 12: 13-49.
- Van Dijk, A.I.J.M. and Bruijnzeel, L.A., 2001a. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1: Model description. *Journal of Hydrology*, 247(3-4): 230-238.



نقشه کتاب