



Evaluation of reference evapotranspiration by empirical-physical models using weight lysimeter (Case study: Tabriz)

Vahdat Ahmadifar¹, Reza Delirhasannia^{✉2}, Ali Ashraf Sadraddini³

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email:

Vahdatahmadifar@yahoo.com

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: delearhasannia@yahoo.com

3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email:

alisadraddini@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 30, 2022

Revised: June. 16, 2022

Accepted: June. 22, 2022

Published online: Aug. 23, 2022

Keywords:

Festuca Arundianacea,
Lolium Perenne,
Models Group,
Performance Evaluation,
Soil Texture,
Weighing Lysimeter.

ABSTRACT

The use of measured data to evaluate reference evapotranspiration (ET_0) estimation models in various studies has been limited due to the problems in the measurements. The types of grass and soil textures used in lysimeters differ in different studies, while these factors affect the amount of lysimetric measurements. This study evaluated 19 physical-experimental and experimental models in the combined, radiation, temperature, and mass transfer groups for three consecutive years (2017-2019) by lysimetric measurements in the Tabriz region with a semi-arid climate located in northwestern Iran. Also, to investigate the effect of reference plant species and soil texture on ET_0 , two grass species including Festuca Arundianacea Schreb and Lolium perenne were applied in three soil textures of sandy loam, clay, and silty loam in weight lysimeters. The Kimberly Penman-1996 (KP), Penman-1963, FAO.ppp.17 Penman (FAO.ppp.17), FAO24 Blaney Criddle (FAO24 BC), and FAO56 Penman-Monteith (FAO 56 PM) had the best performance among used models. Group comparison of models showed that the combination models had the best performance among the studied groups. The ET_0 values estimated by the models were more consistent with the lysimeters filled with sandy loam soil than the ones filled with silt and clay lysimeters. The study of the effect of grass species on the performance of the models showed that the accuracy of the experimental models in lysimeters planted with grass Lolium was higher than the Festuca grass.

Cite this article: Ahmadifar, V., Delirhasannia, R., AliAshraf, S. (2022). Evaluation of reference evapotranspiration by empirical-physical models using weight lysimeter (Case study: Tabriz). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (6), 1403-1421.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.342406.669256>



ارزیابی مدل‌های فیزیکی-تجربی تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از لایسیمتر وزنی (مطالعه موردی: تبریز)

وحدت احمدی فر^۱، رضا دلیر حسن‌نیا^۲، علی‌اشرف صدرالدینی^۳^۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. ایمیل: vahdatahmadifar@yahoo.com^۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. ایمیل: delearhasannia@yahoo.com^۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. ایمیل: alisadraddini@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۴/۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۶/۱

واژه‌های کلیدی:

بافت خاک،

بررسی عملکرد،

فستوکا آروندیناسه،

گروه مدل‌ها،

لایسیمتر وزنی،

لولیوم پرنه.

استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده برای بررسی مدل‌های برآورد کننده تبخیر و تعرق مرجع (ET₀) در مطالعات مختلف به خاطر مشکلات موجود در اندازه‌گیری‌ها به صورت محدود انجام گرفته است. گونه چمن و نوع بافت خاک مورد استفاده در لایسیمترها در مطالعات مختلف با هم متفاوت است در حالی که این عوامل بر مقدار اندازه‌گیری‌های لایسیمتری تأثیرگذار است. در این مطالعه، ۱۹ مدل فیزیکی-تجربی و تجربی در گروه‌های ترکیبی، تابشی، دمایی و انتقال جرم برای سه سال متوالی (۱۳۹۶-۱۳۹۸) با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری در منطقه تبریز با اقلیم نیمه‌خشک واقع در شمالغرب ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین جهت بررسی تأثیر گونه‌های گیاهی مرجع و بافت خاک بر میزان ET₀، دو گونه چمن شامل فستوکا آروندیناسه و لولیوم پرنه در سه بافت خاک لوم شنی، رسی و لوم سیلتی در لایسیمترهای وزنی اندازه‌گیری شدند. مدل‌های (KP) Penman-1996، Penman-1963، FAO56 Penman، FAO24 Blaney Criddle (FAO24 BC)، FAO.ppp.17 Penman (FAO.ppp.17) و Monteith (FAO 56 PM) بهترین عملکرد را در بین مدل‌های مورد استفاده نشان دادند. مقایسه گروهی مدل‌ها نشان داد گروه ترکیبی بهترین عملکرد را داشته است. مقایسه ET₀ برآورد شده با لایسیمترهایی که با خاک لوم شنی پر شده‌اند مطابقت بیشتری نسبت به لایسیمترهای لوم سیلتی و رسی نشان داد. بررسی تأثیر گونه چمن بر عملکرد مدل‌ها بیانگر دقت بالای مدل‌های تجربی در لایسیمترهای با چمن لولیوم نسبت به چمن فستوکا می‌باشد.

استناد: احمدی فر، وحدت؛ دلیر حسن‌نیا، رضا؛ صدرالدینی، علی‌اشرف (۱۴۰۱). ارزیابی مدل‌های فیزیکی-تجربی تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از لایسیمتر وزنی (مطالعه

موردی: تبریز). مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۶)، ۱۴۲۱-۱۴۰۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.342406.669256>

© نویسندگان

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

بحران آب در قرن اخیر یکی از مهمترین چالش‌هایی می‌باشد که بشر با آن رو به رو است. قسمت اعظم مصرف آب در جهان مربوط به بخش کشاورزی است. افزایش روزافزون جمعیت جهان و نیاز به تامین غذای بشر در بخش کشاورزی متخصصین این امر را به ارائه برنامه‌های مختلف در جهت مصرف بهینه و افزایش بهره‌وری آب سوق داده است. به همین منظور تعیین تبخیر و تعرق گیاهان جهت تعیین آب مورد نیاز شبکه‌های آبیاری و اهداف دیگر از مطالعاتی است که بسیار مورد توجه محققین می‌باشد. در این میان روش شناخته شده دو مرحله‌ای کاربرد بسیار بالایی در تعیین نیاز آبی گیاهان مختلف دارد. در این روش برای تعیین تبخیر و تعرق گیاه (ET_c) از تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) و ضریب گیاهی استفاده می‌گردد ($ET_c = K_c \times ET_0$). مقدار تبخیر و تعرق از سطح کاملاً پوشیده از گیاه چمن به ارتفاع حدود ۸ تا ۱۵ سانتی‌متر که هیچگونه محدودیت آبی نداشته باشد را ET_0 می‌گویند (Allen et al., 1998). تعیین ET_0 مهمترین گام در تعیین آب مورد نیاز گیاهان محسوب می‌شود و بر این اساس تا کنون بیش از ۵۰ مدل برای تخمین ET_0 توسعه یافته و اصلاح شده است. براساس فرضیات و داده‌های ورودی مدل‌های موجود در گروه‌های ترکیبی، تابشی، دمایی، تشت تبخیر و روش انتقال جرم یا آیرودینامیک تقسیم‌بندی می‌شوند (Liu et al., 2017). این مدل‌ها در عین سادگی استفاده دارای دو ضعف عمده هستند: ۱- مدل‌های ارائه شده عمومیت نداشته و باید برای هر منطقه واسنجی و صحت‌سنجی شوند. ۲- استفاده کردن برخی از این مدل‌ها نیاز به اطلاعات زیادی دارد که اغلب در بسیاری از ایستگاه‌ها اندازه‌گیری نمی‌شوند. بنابراین بررسی عملکرد مدل‌ها در شرایط اقلیمی مختلف از موضوعات مهم و اساسی در بسیاری از مطالعات بوده است (Kashyap and Panda, 2001; Yoder et al., 2005; Dinpashoh et al., 2011; Perera et al., 2019; Farzanpour et al., 2017; Liu et al., 2015; et al., 2015). لایسیمترهای وزنی با اندازه‌گیری دقیق وزن میزان تبخیر و تعرق در چمن‌زارها و سایر محصولات را از طریق موازنه جرم اندازه‌گیری می‌کنند (Young et al., 1996). استفاده از داده‌های لایسیمتری یکی از مرسومترین گزینه‌ها برای بررسی عملکرد مدل‌ها، واسنجی آنها و مدل‌سازی جهت تخمین ET_0 است که به صورت خلاصه چند مورد از مطالعات انجام گرفته در این زمینه اشاره می‌گردد. (Bakhtiari et al., 2011). شش مدل را در منطقه جنوب شرقی ایران مورد بررسی قرار دادند که در بین این مدل‌ها فائو ۲۴-تابش دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها داشت. (Liu et al., 2017). در منطقه نیمه‌خشک کشور چین ۱۶ مدل برآورد ET_0 را با نتایج حاصل از اندازه‌گیری لایسیمترها مقایسه نمودند، نتایج آنها نشان داد مدل‌های فائو-پنمن ۱۷، پنمن ۱۹۶۳، فائو ۲۴-بلانی‌کریدل به ترتیب دارای بهترین عملکرد هستند. چمن استفاده شده در لایسیمترها برای این تحقیق از گونه فستوکا بود. (Nazari and Kaviani, 2016) در دشت قزوین با استفاده از داده‌های لایسیمتری روزانه برای یک سال ۲۸ روش تجربی و ترکیبی را برای تخمین ET_0 ارزیابی کردند و نتایج آنها نشان داد روش تشت تبخیر با برآورد ضریب تشت به روش اورنگ بیشترین مطابقت را با داده‌های لایسیمتری داشت. در مطالعه‌ای دیگر در یک چمنزار مرطوب منطقه آلپ واقع در شمال شرقی چینگهای فلات تبت، عملکرد ۱۳ مدل در سه گروه ترکیبی، تابشی و دمایی با داده‌های اندازه‌گیری شده ET_0 توسط لایسیمتر وزنی مقایسه شدند، عملکرد مدل‌های تابشی بهتر از مدل‌های ترکیبی و دمایی بود. مدل دیبروین-کیچمن بهترین عملکرد را داشت، همچنین عملکرد مدل پنمن ۱۹۶۳ بهتر از فائو پنمن مانیتیت بود (Dai et al., 2019). در مطالعه‌ای دیگر در منطقه مرطوب شرق چین مقدار تبخیر و تعرق گندم زمستانه با لایسیمتر وزنی در سه سال متوالی (۲۰۱۶-۲۰۱۹) اندازه‌گیری شد و با پنج مدل مختلف برآورد ET_0 مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان دهنده عملکرد مناسب مدل‌های فائو پنمن مانیتیت و هارگریوز برای منطقه مورد مطالعه بود (He et al., 2022). بافت خاک و گونه گیاه مورد استفاده در لایسیمترها از عوامل تاثیرگذار بر اندازه‌گیری تبخیر و تعرق به شمار می‌رود. (Ghorbanian et al., 2014) در سه نوع خاک با بافت متفاوت، نیاز آبی ذرت را توسط لایسیمتر اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد مقدار ET_c در بافت‌های مختلف خاک باهم تفاوت دارد و مقدار نیاز آبی گیاه از بیشتر به کمتر به ترتیب در بافت‌های لوم رسی سیلتی، لوم و لوم شنی رخ داده است. اندازه‌گیری ET_c گیاه کینوا در دانمارک با سه نوع بافت خاک در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری توسط لایسیمتر انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد در هر دو شرایط آبیاری، حداکثر تبخیر و تعرق در خاک لوم شنی رسی و سپس در خاک‌های لوم شنی و شنی به دست آمده است (Razzaghi et al., 2012). مقادیر تبخیر و تعرق برای ۱۱ گونه مختلف چمن در شمال شرق کلرادو اندازه‌گیری و مورد مقایسه قرار گرفت از مهمترین نتایج آن می‌توان به بالابودن مصرف آب در گونه فستوکا نسبت به لولیوم پرنه اشاره کرد (Crookston and Hattendorf, 2010). مقایسه تبخیر و تعرق برای دو گونه چمن در مطالعه دو ساله نشان داد مقدار آن در چمن فستوکا به اندازه ۳۰٪ بیشتر از برمودا گرس است (Pinnix and Miller, 2019). مروری بر تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد: ۱) عملکرد مدل‌های مختلف ارائه شده برای تخمین ET_0 در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در مناطق و اقلیم‌های گوناگون نتایج متفاوتی ارائه می‌دهند و استفاده از یک مدل مرجع برای مقایسه سایر مدل‌ها شاید نتواند نتایج درستی از عملکرد مدل‌های بررسی شده در مناطق مختلف را منعکس کند. ۲)

در مطالعاتی که از اندازه‌گیری‌های لایسیمتری جهت ارزیابی، واسنجی و مدل‌سازی ET_0 استفاده می‌شود بخاطر عواملی همچون هزینه زیاد، وقت‌گیر بودن و همچنین پر زحمت بودن اندازه‌گیری‌ها تنها از یک گونه چمن و یک نوع بافت خاک استفاده می‌گردد؛ این در حالی است که مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر و تعرق برای بافت‌های خاک و گونه‌های چمن مختلف یکسان نیست. بنابراین دقت مدل‌های مختلف در مقایسه با نوع بافت خاک و گونه چمن استفاده شده در لایسیمترها متفاوت خواهد بود که تاکنون بررسی نشده است. بدین منظور در پژوهش حاضر، جهت ارزیابی مدل‌های مرسوم برآورد کننده ET_0 با ویژگی‌های متفاوت (سادگی و پیچیدگی روابط، استفاده از حدقل و حداکثر داده‌های هواشناسی و ...) و بررسی تاثیر بافت خاک و گونه چمن در اندازه‌گیری‌های لایسیمتری بر دقت مدل‌های مختلف، سه نوع بافت خاک و دو گونه چمن در اندازه‌گیری‌های لایسیمتری استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها در شش حالت مختلف (دو گونه چمن \times سه بافت خاک) برای سه سال پیاپی در منطقه تبریز واقع در شمال غرب ایران با اقلیم نیمه خشک انجام گرفت. از ۱۹ روش تجربی - فیزیکی و تجربی مختلف در چهار گروه ترکیبی، تابشی، انتقال جرم و دمایی برای تخمین ET_0 استفاده شد. در نهایت مدل‌های برتر معرفی و تاثیر استفاده از بافت خاک و گونه چمن مختلف بر دقت مدل‌های استفاده شده مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

اندازه‌گیری‌های لایسیمتری در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی شماره دو دانشگاه تبریز با عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۳ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۶۶۸ متر از سطح دریا واقع در شمال غرب ایران انجام شد. اقلیم منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص خشکی دومارتن به عنوان منطقه نیمه خشک محسوب می‌شود. محصولات کشت شده در این مزرعه ذرت و یونجه می‌باشد. برای انجام آزمایشات، قسمتی از مزرعه با ابعاد 50×50 متر بعد از انجام مراحل آماده‌سازی به کشت چمن اختصاص پیدا کرد. برای چمن محوطه استقرار لایسیمترها از سیستم آبیاری قطره‌ای استفاده شد. به منظور هم‌پوشانی کامل جبهه‌های رطوبتی ایجاد شده توسط قطره‌چکان‌ها در آبیاری قطره‌ای، لوله‌های ۱۶ میلی‌متری با قطره‌چکان‌های داخل خط 0.5 متری با دبی چهار لیتر در ساعت در فواصل 0.5 متر از هم دیگر مستقر گردید (شکل ۱). برای سبز و شادابی چمن کشت شده آبیاری سه بار در هفته (با فواصل دو تا سه روز) انجام گرفت.

اندازه‌گیری‌های لایسیمتری

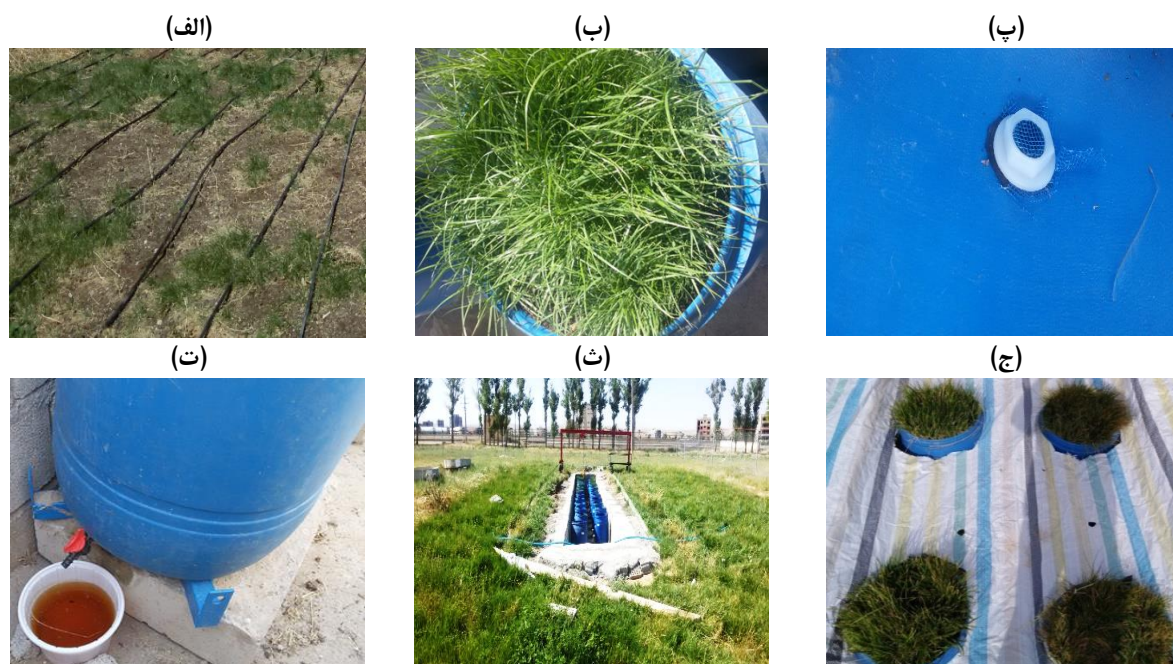
برای اندازه‌گیری لایسیمتری از بشکه‌های پلیمری با قطر 0.5 متر و ارتفاع یک متری استفاده شد. در قسمت میانی زمین چمن برای استقرار لایسیمترها کانالی با عمق $1/2$ متر و عرض $1/4$ متر از جنس بلوک و سیمان احداث گردید. لایسیمترها از طریق استقرار روی سکوهایی بتنی با چمن محوطه به صورت تقریبی در یک سطح قرار گرفتند و برای جلوگیری از انتقال حرارت فضاهای خالی بین لایسیمترها پوشانده شد. برای پر کردن لایسیمترها از سه نوع بافت خاک رسی، لوم سیلتی و لوم شنی استفاده شد که اطلاعات آنها در جدول (۱) ارائه شده است. بافت خاک به روش هیدومتری تعیین گردید (Gee and Or, 2002).

جدول ۱- بافت خاک‌های استفاده شده در لایسیمترها

رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	بافت خاک
۵۹	۱۳	۲۸	رسی
۲۴	۵۶	۲۰	لوم سیلتی
۱۲	۱۸	۷۰	لوم شنی

با توجه به این که بافت‌های خاک اشاره شده از نوع سبک (لوم شنی)، متوسط (لوم سیلتی) و سنگین (رسی) می‌باشند و تفاوت زیادی از نظر اندازه ذرات تشکیل دهنده (رس، شن و سیلت) با هم دارند؛ بنابراین تاثیر استفاده سه نوع بافت سبک، متوسط و سنگین بر مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتری و به دنبال آن بررسی دقت عملکرد مدل‌های مختلف در مقایسه با این بافت‌ها می‌تواند نتایج مفید و کاربردی برای مزارع کشاورزی با بافت‌های خاک متفاوت داشته باشد. برای جلوگیری از ماندابی شدن آب در قسمت تحتانی لایسیمترها به ارتفاع ۱۰ سانتیمتر در کف هر یک از آنها شن (با شماره ۱۶) ریخته شد و در قسمت تحتانی بشکه‌های پلیمری شیر تعبیه و آب‌بندی گردید. زه آب خارج شده از لایسیمترها بعد از عملیات آبیاری یا بارندگی به ظروف مدرج هدایت شده و اندازه‌گیری شد. نحوه پر کردن خاک لایسیمترها به صورت لایه لایه انجام گرفت به این صورت که با مشخص بودن جرم مخصوص ظاهری خاک در تراکم طبیعی، ابتدا وزن خاک لازم

در هر لایسیمتر با لایه‌های ۲۵ سانتی‌متری محاسبه شد و سپس تراکم خاک با رها کردن وزنه ۲/۵ کیلوگرمی از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری انجام گرفت (Ghorbanian *et al.*, 2014). چمن کاشته شده در لایسیمترها از دو گونه فصل سرد بنام‌های فستوکا آروندیاناسه و لولیوم پرنه می‌باشد. در اغلب مطالعات استفاده شده از اندازه‌گیری لایسیمتری جهت مدل‌سازی، واسنجی و بررسی عملکرد مدل‌ها یکی از این گونه‌ها استفاده شده است (Ahmadifar *et al.*, 2022). با در نظر گرفتن سه نوع بافت خاک و دو گونه چمن برای کاشت در لایسیمترها شش حالت (گونه گیاه-مرجع-بافت خاک) وجود دارد که هر یک از حالت‌ها در سه لایسیمتر تکرار و در نهایت اندازه‌گیری‌ها در ۱۸ لایسیمتر انجام شد (شکل ۱). برای رعایت شرایط گیاه مرجع (Allen *et al.*, 1998) چمن در محوطه و داخل لایسیمترها در ارتفاع ۸-۱۵ سانتی‌متری نگه داشته شد و آبیاری لایسیمترها نیز در هر هفته سه مرتبه (دو یا سه روز یک بار) انجام شد. با نصب تانسیمتر در هر یک از بافت‌های خاک در عمق ۰/۳ متری حد ظرفیت زراعی (FC) در لایسیمترها کنترل شد. آبیاری لایسیمترها با ظرف مدرج بصورت دستی انجام می‌شد. اندازه‌گیری لایسیمترها از طریق جرثقیل متحرک و باسکول آویز متصل به آن صورت گرفت. مقدار بارندگی از طریق باران سنج ثبات مستقر شده در مجاورت محل انجام آزمایش‌ها ثبت می‌شد. به منظور اندازه‌گیری تبخیر و تعرق در هر دوره تمامی لایسیمترها به صورت جداگانه وزن شده و با معلوم بودن آب داده شده (آبیاری یا وجود بارش)، خارج شده (زهکشی) و اختلاف وزن بین دوره‌های متوالی هر لایسیمتر مقدار آب مصرف شده توسط گیاه چمن (نزدیکترین حالت به گیاه مرجع فرضی) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری تبخیر-تعرق گیاه چمن نزدیکترین حالت به ET_0 بر مبنای بیلان آبی در دوره‌های یک روزه انجام گرفت.



شکل ۱- اندازه‌گیری‌های لایسیمتری: (الف) سیستم آبیاری قطره‌ای محوطه (ب) چمن داخل لایسیمتر (پ) آب‌بندی شیر خروجی زهکش (ت) جمع‌آوری آب زهکشی شده (ث) نحوه استقرار لایسیمترها داخل کانال (ج) پوشش فواصل بین لایسیمترها

مدل‌های برآورد ET_0

برای برآورد ET_0 ، ۱۹ مدل انتخاب شد که در انتخاب آنها نکاتی مانند استفاده از مدل‌هایی با کاربرد وسیع، روش‌های تجربی-فیزیکی مختلف (ترکیبی، تابشی، انتقال جرم و دمایی)، مدل‌های پیچیده و ساده با بیشترین و کمترین پارامترهای هواشناسی مورد نیاز در نظر گرفته شد. مدل‌ها شامل: پنج مدل گروه ترکیبی (Penman (1963؛ فائو ۲۴ پنمن (Doorenbos and Pruitt, 1977)؛ فائو- پنمن ۱۷ (Frère and Popov, 1979)؛ کریمبلی پنمن- ۱۹۹۶ (Liu *et al.*, 2017) و روش فائو ۵۶ پنمن مامنتیث (Allen *et al.*, 1998)، شش مدل گروه تابشی پرستلی-تیلور (Priestley and Taylor, 1972)؛ دبروین-کیجمن (De Bruin and Keijman, 1979)؛ ماکینک (Makkink, 1957)؛ جنسن-هیز (Jensen and Haise, 1963)؛ فائو ۲۴-تابشی (Doorenbos and Pruitt, 1977) و (Turc (1961)؛ چهار مدل گروه انتقال جرم (Penman (1948)؛ Meyer (1926)؛ Mahringer (1970) و WMO (1966) و چهار مدل دمایی هارگریوز (Hargreaves and Samani, 1985)؛ مک کلود (Liu *et al.*, 2017)؛ فائو ۲۴- بلانی کریدل (Doorenbos and Pruitt, 1977) و (Blaney Criddle (1950) می‌باشد. معادله مدل‌های استفاده شده برای برآورد ET_0 در جدول (۲) ارائه شده است. در روابط ارائه شده

ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع $(mm\ d^{-1})$; R_n تابش خالص خورشیدی $(MJ\ m^{-2}\ d^{-1})$; G شار گرمای خاک $(MJ\ m^{-2}\ d^{-1})$; Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع $(kPa\ ^\circ C^{-1})$; γ ضریب ثابت سایکرومتری $(kPa\ ^\circ C^{-1})$; a_w, b_w ضرایب تابع باد؛ u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری هوا $(m\ s^{-1})$; e_s, e_a فشار بخار واقعی و اشباع (kPa) ; λ گرمای نهان تبخیر $(MJ\ kg^{-1})$; ΔT اختلاف بین بیشینه و کمینه مقدار دمای هوا $(^\circ C)$; J شماره روز ژولوسی؛ T متوسط دمای هوا $(^\circ C)$; R_s تابش خورشیدی $(MJ\ m^{-2}\ d^{-1})$; RH, RH_n کمینه و متوسط رطوبت نسبی روزانه هوا $(\%)$; T_x, T_n بیشینه دمای هوای روزانه $(^\circ C)$; R_a تابش فرازمینی $(mm\ d^{-1})$; H ارتفاع از سطح دریا (m) ; e_2, e_1 فشار بخار اشباع (kPa) مربوط به T_x و T_n ; n ساعت آفتابی واقعی (h) ; N بیشینه ساعات آفتابی ممکن (h) ; p درصد ساعت روشنایی برای هر روز از سال؛ U_d سرعت باد در طول روز $(m\ s^{-1})$. همچنین برخی از ضرایب که در محاسبات ثابت در نظر گرفته شدند عبارتند از: ضریب آلیبدو $(\alpha=0.23)$ ؛ ضریب ون کارمن $(k=0.41)$ ؛ ضریب استفان بولتزمن $(\sigma=4/3 \times 10^{-8}\ MJ\ K^{-4}\ m^{-2}\ d^{-1})$ ؛ گرمای ویژه آب در دمای ثابت $(C_p=1/0.13 \times 10^{-3}\ MJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1})$ ؛ گرمای نهان تبخیر آب $(\lambda=2/45\ MJ\ kg^{-1})$ و شار گرمای خاک $(G=0\ MJ\ m^{-2}\ d^{-1})$ که برای دوره های روزانه ناچیز بوده و می توان از آن صرف نظر کرد (Allen et al., 1998). پارامترهایی که به صورت مستقیم قابل اندازه گیری نیستند با دستورالعمل نشریه فائو ۵۶ محاسبه می شوند (Allen et al., 1998). لازم به ذکر است در مورد محاسبه تابش خورشیدی، ضرایب انگسترم $(R_s = (a_s + b_s (n / N)) R_a)$ به جای مقادیر پیشنهاد شده در این نشریه از مقادیر کالیبره شده در ایستگاه سینوپتیک تبریز استفاده شد (Ahmadifar et al., 2022) $(0.542$ و 0.264 به ترتیب برابر as و bs).

 جدول ۲- روابط مدل های استفاده شده برای برآورد ET_0

گروه	مدل	رابطه
	Penman (1963)	$\lambda \cdot ET_0 = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + 6.43 \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (a_w + b_w u_2) (e_s - e_a) \right], a_w = 1, b_w = 0.537$
	FAO24 Penman (FAO-24 Pen)	$\lambda \cdot ET_0 = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + 2.7 \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (1 + 0.864 u_2) (e_s - e_a) \right]$
ترکیبی	FAO.ppp.17 Penman (FAO.ppp.17)	مدل Penman (1963) $a_w = 1, b_w = \begin{cases} 0.54 & \Delta T < 12 \\ 0.54 + 0.35(\Delta T - 12)/4 & \Delta T \geq 12 \end{cases}$
	Kimberly Penman-1996 (KP)	مدل Penman (1963) $a_w = 0.3 + 0.58 \exp\left(-\left(\frac{J-170}{45}\right)^2\right), b_w = 0.32 + 0.54 \exp\left(-\left(\frac{J-228}{67}\right)^2\right)$
	FAO56 Penman Monteith (FAO 56 PM)	$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$
	Priestley Taylor (PT)	$\lambda \cdot ET_0 = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G)$
	De Bruin Keijman (DK)	$\lambda \cdot ET_0 = \frac{\Delta}{0.85\Delta + 0.63\gamma} (R_n - G)$
	Makkink (Mak)	$\lambda \cdot ET_0 = 0.63 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s$
تابشی	Jensen Haise (JH)	$\lambda \cdot ET_0 = C_T (T - T_x) R_s, C_T = 1 / (C_1 + C_2 C_H), C_1 = 38 - (2H / 305)$ $C_2 = 7.3^\circ C, C_H = 5 / (e_2 - e_1), T_x = -2.5 - 1.4(e_2 - e_1) - H / 550$
	FAO24 radiation (FAO24 Rad)	$ET_0 = b \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s / \lambda - 0.3$ $b = 1.066 - 0.0013RH + 0.045U_d - 0.0002RH - 0.315 \times 10^{-4} RH^2 + 0.0011U_d^2$ $\lambda \cdot ET_0 = a_r 0.013 \frac{T}{T + 15} (23.8856R_s + 50)$
	Turc	$a_r = \begin{cases} 1 & RH \geq 50\% \\ 1 + (50 - RH) / 70 & RH < 50\% \end{cases}$
انتقال جرم	WMO	$ET_0 = (1.298 + 0.934 \times U_2) \times (e_s - e_a)$
	Meyer	$ET_0 = (3.75 + 0.5026 \times U_2) \times (e_s - e_a)$
	Mahringer	$ET_0 = 2.859 \times (U_2)^{0.5} \times (e_s - e_a)$
	Penman (1948)	$ET_0 = [2.625 + (0.000479 / U_2)] \times (e_s - e_a)$
	Hargreaves (Har)	$ET_0 = 0.0023 (T + 17.8) \sqrt{T_x - T_n} R_a$
	McCloud (Mcl)	$ET_0 = 0.254 \times 1.07^{1.8T}$
دمایی	FAO24 Blaney Criddle (FAO24 BC)	$ET_0 = a + bp(0.46T + 8.13), a = 0.0043RH_n - n / N - 1.41, p = N_j / (\sum_{i=1}^{365} N_i) \times 100$
	Blaney Criddle (BC)	$b = 0.82 - 0.0041RH_n + 1.07n / N + 0.066U_d - 0.006RH_n \cdot n / N - 0.0006RH_n \cdot U_d$ $ET_0 = p(0.46T + 8.13)$

داده‌های هواشناسی برای محاسبه ET_0 و آزمون‌های آماری

داده‌های اقلیمی مورد نیاز برای محاسبه ET_0 با مدل‌های ارائه شده در جدول (۲) از طریق سوابق ایستگاه هواشناسی احداث شده در مجاورت محل استقرار لایسیمترها به دست آمد. پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل عبارتند از: دمای هوا (T)، رطوبت نسبی (RH)، سرعت باد در ارتفاع دو متری (U_2) ساعت آفتابی (n) و بارش که هر ۱۰ دقیقه یک بار گزارش و ذخیره می‌شود. حداکثر و حداقل دمای هوا (T_n, T_x) و حداکثر و حداقل رطوبت هوا (RH_n, RH_x) از میان داده‌های ذخیره شده برای هر روز استخراج گردید. داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده بررسی شد و در هیچ یک از داده‌ها $T_x < T_n$ ، $RH_n > RH_x$ و $n/N > 1$ (حداکثر ۰/۹۸) مشاهده نشد که نشان از کیفیت بالای داده‌های اندازه‌گیری شده دارد. خصوصیات آماری داده‌های روزانه هواشناسی منطقه برای طول دوره مطالعه با استفاده از شاخص‌های حداکثر (max)، حداقل (min)، میانگین (mean)، انحراف معیار (SD)، خطای استاندارد (SE) و ضریب تغییرات (Cv) در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- خلاصه آماری داده‌های هواشناسی مورد استفاده در ورودی مدل‌ها

پارامتر هواشناسی	واحد	X_{max}	X_{min}	X_{mean}	SD	SE	C_v
T_n	°C	۲۸/۸۰	-۰/۲۰	۱۶/۲۰	۶/۰۲	-۰/۲۶	-۰/۳۷
T_x	°C	۴۱/۰۰	۴/۶۰	۲۹/۳۱	۶/۷۳	-۰/۳۰	-۰/۲۳
T	°C	۳۵/۱۰	۲/۷۰	۲۲/۵۱	۶/۲۳	-۰/۲۷	-۰/۲۸
RH_x	%	۹۷/۰۰	۱۹/۰۰	۵۵/۱۴	۱۶/۷۵	-۰/۷۳	-۰/۳۰
RH_n	%	۶۷/۰۰	۵/۰۰	۲۲/۰۹	۱۰/۹۷	-۰/۴۸	-۰/۵۰
RH	%	۸۳/۲۵	۱۴/۵۰	۳۷/۳۸	۱۳/۴۸	-۰/۵۹	-۰/۳۶
U_2	m/s	۶/۵۵	-۰/۷۵	۳/۰۰	۱/۰۹	-۰/۰۵	-۰/۳۶
R_n	MJ/m ² day	۱۷/۴۳	۳/۸۰	۱۱/۹۶	۳/۴۰	-۰/۱۵	-۰/۲۸
n	h	۱۳/۴۰	-۰/۰۰	۱۰/۲۶	۲/۶۲	-۰/۱۲	-۰/۲۶
R_s	MJ/m ² day	۳۱/۸۱	۵/۸۲	۲۴/۴۳	۵/۲۴	-۰/۲۳	-۰/۲۱

شاخص‌های آماری استفاده شده در این تحقیق جهت بررسی دقت مدل‌ها به شرح زیر می‌باشد.

ضریب تبیین^۱:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

میانگین خطای اریبی^۲:

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

ریشه میانگین مربعات خطا^۳:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

میانگین مطلق خطا^۴:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{N} \quad \text{رابطه (۴)}$$

نمایه پراکندگی^۵:

۱ determination coefficient

۲ Mean bias error

۳ Root mean square error

۴ Mean absolute error

۵ Scatter Index

$$SI = \frac{RMSE}{O}$$

رابطه (۵)

در روابط فوق، P_i مقدار برآورد شده تبخیر و تعرق توسط مدل، O_i مقدار اندازه‌گیری شده توسط لایسیمترها، N تعداد مشاهدات، \bar{P} میانگین مقادیر برآورد شده و \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمترها می‌باشد. نزدیک بودن مقادیر SI ، MBE ، $RMSE$ ، MAE به صفر و R^2 به یک، کارایی بهتر مدل را نشان می‌دهد (Liu *et al.*, 2017; Shiri *et al.*, 2019). بر این اساس، جهت مشاهده بهتر کارایی مدل‌ها در هر گروه، رتبه دقت هر یک از مدل‌ها در مقایسه با سایر مدل‌های آن گروه با استفاده از مقادیر به‌دست آمده برای شاخص‌های آماری ارائه شد.

نتایج و بحث

بررسی عملکرد مدل‌های ترکیبی در مقابل اندازه‌گیری‌های لایسیمتری

عملکرد پنج مدل گروه ترکیبی با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری در شش حالت (سه بافت خاک و دو گونه چمن) مورد بررسی قرار گرفت. برای مشخص کردن عملکرد مدل‌های استفاده شده در گروه ترکیبی میانگین شاخص‌های آماری به‌دست آمده از هر شش حالت داده‌های روزانه لایسیمتری در جدول (۴) نشان داده شده است. مقادیر R^2 برای مدل‌های ترکیبی ۰/۷۹۲ (مدل Penman-1963) تا ۰/۸۱۱ (FAO-24 Pen) می‌باشد. اختلاف میانگین بین مدل‌های برآورد کننده و اندازه‌گیری‌های لایسیمتر (MBE) ۰/۱۴۳ تا ۱/۵۶۵- میلی‌متر بر روز است. در بین مدل‌های ترکیبی رابطه FAO24 Pen کمترین و FAO-ppp-17 بیشترین برآورد را نسبت به اندازه‌گیری لایسیمتری داشت. مقادیر $RMSE$ بین ۱/۴۴۵ تا ۲/۴۱۵ میلی‌متر بر روز به ترتیب برای مدل‌های KP و FAO-24 Pen به‌دست آمد. کمترین و بیشترین مقدار MAE و SI نیز برای مدل‌های KP و FAO-24 Pen به‌دست آمد. کمترین و بیشترین رتبه دقت مدل‌ها در جدول (۵) ارائه شد. در حالت کلی بین مدل‌های مقایسه شده در گروه ترکیبی، KP بهترین عملکرد را داشت و مدل‌های Penman-1963، FAO-ppp-17، FAO-56PM و FAO-24pen در رده‌های بعدی قرار گرفتند.

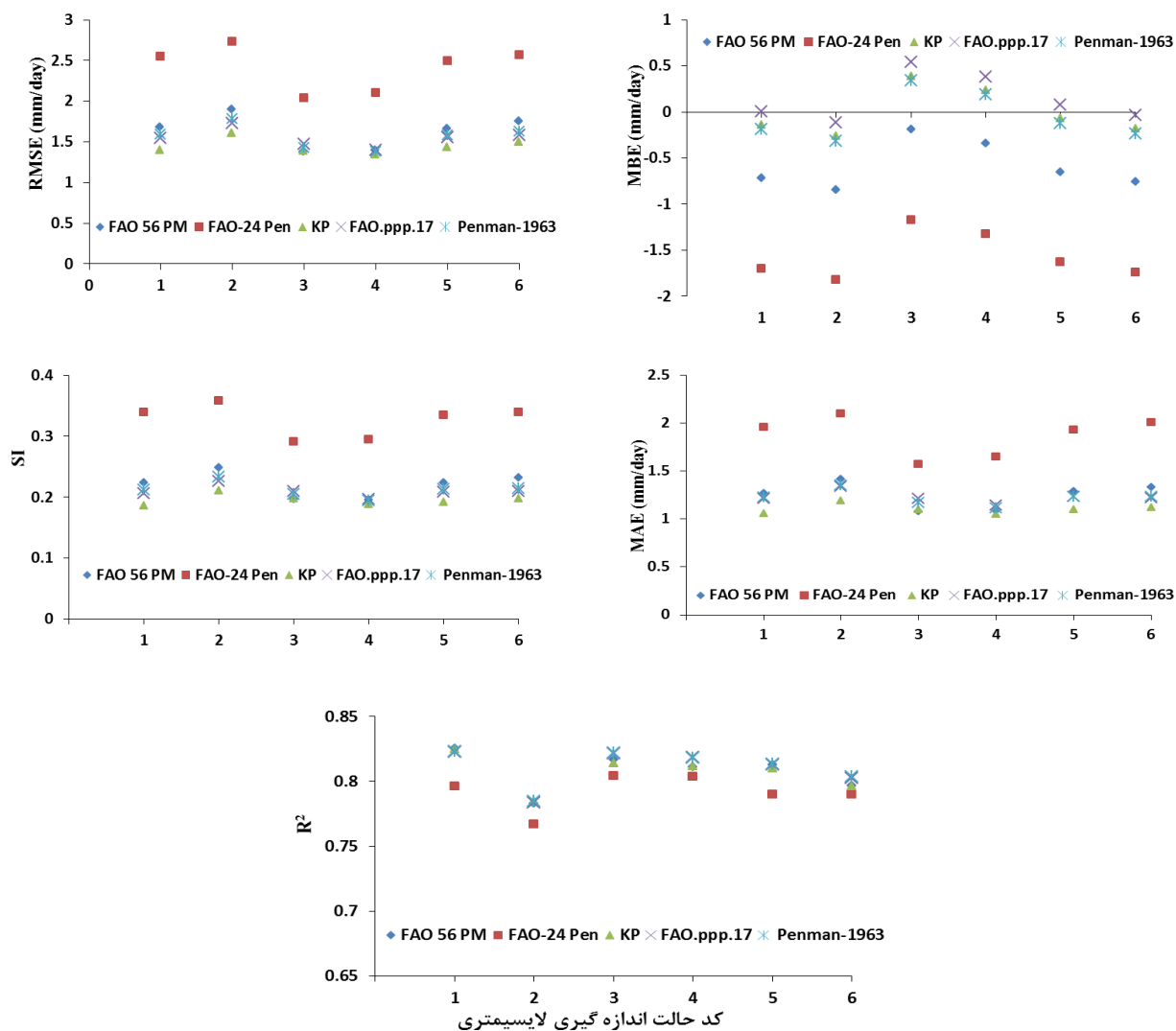
(Liu *et al.*, 2017) گزارش کردند که تفاوت‌های اصلی بین مدل‌های ترکیبی در توابع تجربی باد نهفته است. بنابراین، تفاوت در عملکرد مدل‌های ترکیبی ممکن است مربوط به نحوه عملکرد تابع باد تعریف شده برای آنها باشد. مدل FAO-56PM به عنوان مدل مرجع در اغلب تحقیقات استفاده می‌شود و برخی از مطالعه‌های انجام شده در اقلیم‌های مختلف عملکرد مناسب مدل FAO-56 PM را گزارش کرده‌اند (Vaughan *et al.*, 2007; Cid *et al.*, 2018; Shiri *et al.*, 2019). البته در برخی از مطالعات دیگر، سایر مدل‌های ترکیبی بهتر از FAO-56PM عمل کرده‌اند که با نتایج به‌دست آمده در این مطالعه همخوانی دارد. در این رابطه به چند مورد از مطالعات انجام شده اشاره می‌شود. (Bakhtiari *et al.*, 2011) داده‌های لایسیمتری و مدل‌های ET_0 را در جنوب شرق ایران با اقلیم نیمه‌خشک مقایسه کرده‌اند. آنها مدل KP را بهتر از FAO-56PM گزارش کردند. مقایسه مدل‌های مبتنی بر ترکیب با داده‌های لایسیمتری در آب و هوای مشابه (نیمه خشک) در کشور چین نشان داد عملکرد FAO PPP-17، Penman-1963 و KP بهتر از FAO-56PM بوده و مدل FAO-24pen پایین‌ترین دقت را بین مدل‌های ترکیبی داشته است (Liu *et al.*, 2017). بررسی مطالعات نشان داد دقت FAO-56PM در برخی از مطالعات مشابه نیز پایین گزارش شده است (Fooladmand and spaskhah, 2005; Sabziparvar *et al.*, 2008; Ghamarnia *et al.*, 2013). به منظور بررسی تاثیر بافت خاک و گونه‌های چمن استفاده شده در دقت مدل‌های ترکیبی، نتایج به‌دست آمده از شاخص‌های آماری برای حالت‌های مختلف اندازه‌گیری شده در شکل (۲) ارائه شد. بررسی‌ها نشان داد دقت مدل‌ها در مقایسه با اندازه‌گیری در لایسیمترهای مختلف متفاوت بوده ولی ترتیب آنها از لحاظ عملکرد در لایسیمترهای مختلف تفاوت چندانی با هم نداشته است.

جدول ۴- متوسط عملکرد مدل‌های ترکیبی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری

مدل	RMSE (mm/day)	MBE (mm/day)	MAE(mm/day)	SI	R ²
FAO 56 PM	۱/۶۳۰	-۰/۵۸۴	۱/۲۳۷	۰/۲۲۰	۰/۸۰۸
FAO-24 Pen	۲/۴۱۵	-۱/۵۶۵	۱/۸۶۶	۰/۳۲۶	۰/۷۹۲
KP	۱/۴۴۵	-۰/۰۰۵	۱/۰۹۶	۰/۱۹۶	۰/۸۰۷
FAO.ppp.17	۱/۵۴۷	۰/۱۴۳	۱/۲۲۶	۰/۲۰۹	۰/۸۱۰
Penman-1963	۱/۵۶۷	-۰/۰۵۷	۱/۲۲۲	۰/۲۱۲	۰/۸۱۱

جدول ۵- رتبه دقت عملکرد مدل‌های ترکیبی

مدل	MBE	MAE	RMSE	SI	R ²	متوسط
FAO 56 PM	۴	۴	۴	۴	۳	۳/۸
FAO-24 Pen	۵	۵	۵	۵	۵	۵
KP	۱	۱	۱	۱	۴	۱/۶
FAO.ppp.17	۳	۳	۲	۲	۲	۲/۴
Penman-1963	۲	۲	۳	۳	۱	۲/۲



شکل ۲- شاخص‌های آماری مدل‌های ترکیبی بر اساس داده‌های لایسیمتری در حالت‌های مختلف (گونه چمن و بافت خاک) ۱- چمن لولیوم، خاک رسی ۲- چمن فستوکا، خاک رسی ۳- چمن لولیوم، خاک لوم شنی ۴- چمن فستوکا، خاک لوم شنی ۵- چمن لولیوم، خاک لوم سیلتی ۶- چمن فستوکا، خاک لوم سیلتی

بررسی عملکرد مدل‌های تابشی در مقابل اندازه‌گیری‌های لایسیمتری

مقادیر برآورد شده برای ET_0 توسط مدل‌های گروه تابشی با مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتری مورد مقایسه قرار گرفت. میانگین شاخص‌های آماری به‌دست آمده بین شش حالت داده‌های روزانه لایسیمتری و مدل‌های تابشی در جدول (۶) ارائه شده است. مقادیر R^2 برای مدل‌های تابشی بین ۰/۵۵۱ (مدل DK) تا ۰/۷۳۰ (مدل FAO-24 Rad) به‌دست آمد. مقدار MBE در رنج ۰/۴۲۴ تا ۲/۶۸۳- میلی‌متر بر روز بود که در بین مدل‌های تابشی رابطه DK کمترین و FAO-24 Rad بیشترین برآورد را نسبت به اندازه‌گیری‌های



لایسیمتری داشتند. مقادیر RMSE مابین ۱/۷۸۶ تا ۳/۵۹۲ میلی‌متر بر روز به ترتیب برای مدل‌های FAO-24 Rad و DK به دست آمد همچنین کمترین و بیشترین مقدار MAE و SI نیز مربوط به مدل‌های FAO-24 Rad و DK بود.

جدول ۶- متوسط عملکرد مدل‌های تابشی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری

مدل	RMSE (mm/day)	MBE (mm/day)	MAE(mm/day)	SI	R ²
DK	۳/۵۹۲	-۲/۶۸۳	۲/۸۵۶	۰/۴۸۶	۰/۵۵۱
JH	۲/۰۳۵	-۱/۰۹۴	۱/۵۹۵	۰/۲۷۵	۰/۷۲۷
Turc	۲/۲۸۸	-۱/۳۳۵	۱/۷۳۳	۰/۳۰۹	۰/۷۰۹
PT	۳/۵۴۴	-۲/۶۶۸	۲/۸۲	۰/۴۷۹	۰/۵۷۸
Mak	۳/۵۴۸	-۲/۶۶۳	۲/۸۲۳	۰/۴۸۰	۰/۶۶۸
FAO-24 Rad	۱/۷۸۶	۰/۴۲۴	۱/۴۲۰	۰/۲۴۲	۰/۷۳۰

با توجه به رتبه دقت مدل‌های تابشی مورد استفاده در حالت کلی بین مدل‌های مقایسه شده FAO-24 Rad بهترین عملکرد را داشت و مدل‌های JH، Turc، PT، Mak و DK در رده‌های بعدی قرار گرفتند (جدول ۷).

جدول ۷- رتبه دقت عملکرد مدل‌های تابشی

مدل	MBE	MAE	RMSE	SI	R ²	متوسط
DK	۶	۶	۶	۶	۶	۶
JH	۲	۲	۲	۲	۲	۲
Turc	۳	۳	۳	۳	۳	۳
PT	۵	۴	۴	۴	۵	۴/۴
Mak	۴	۵	۵	۵	۴	۴/۶
FAO-24 Rad	۱	۱	۱	۱	۱	۱

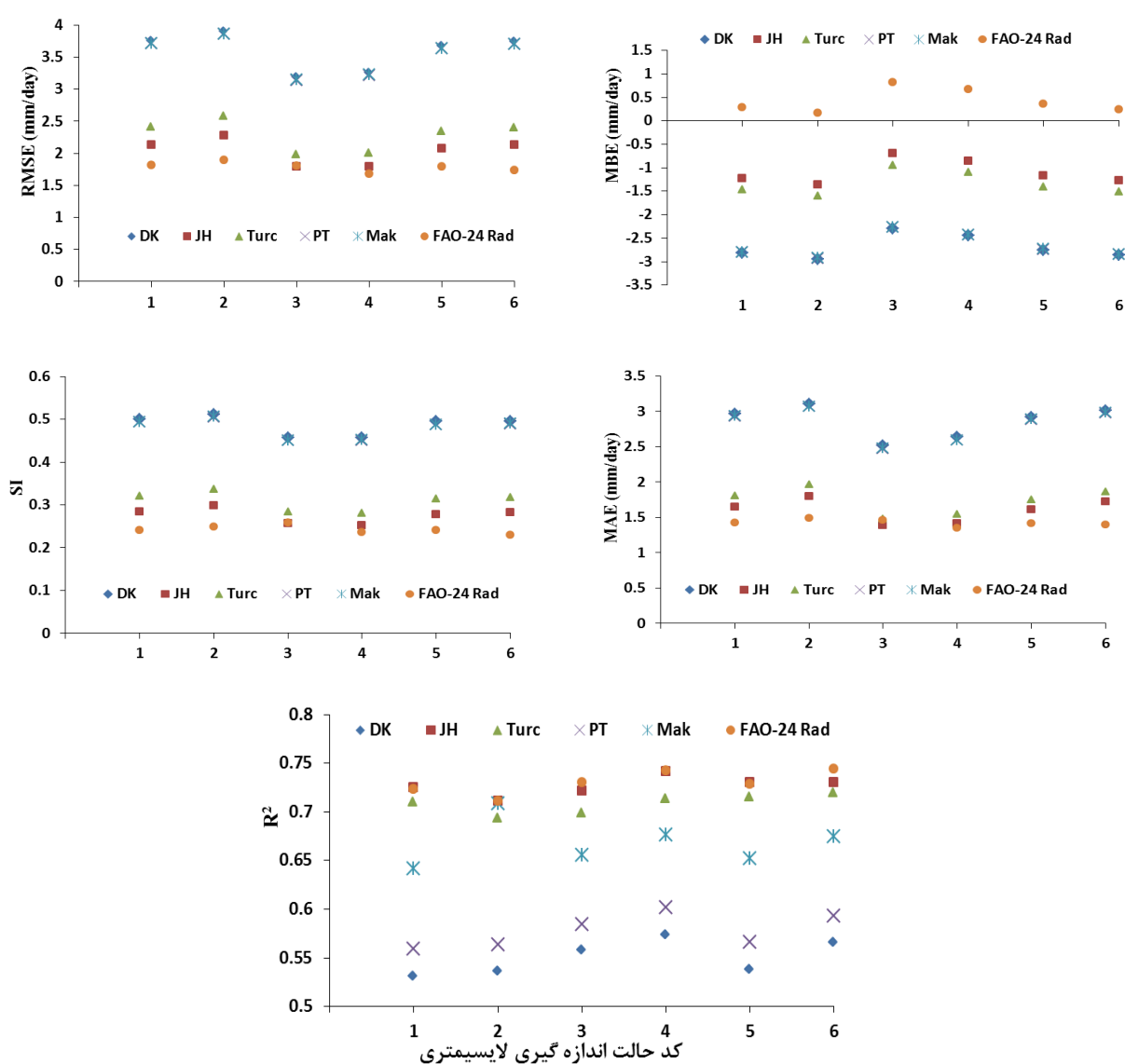
Bakhtiari *et al.* (2011) شش مدل تبخیر و تعرق را با داده‌های لایسیمتری مقایسه کردند و مدل‌های FAO-24 Rad و Mak را به ترتیب مناسب‌ترین و ضعیف‌ترین مدل‌ها از نظر عملکرد گزارش کردند. تحقیقات Liu *et al.* (2017) عملکرد ضعیف مدل PT و تخمین دقیق توسط مدل FAO24-Rad را در مقایسه با سایر مدل‌های تابشی گزارش کردند. (Keykhamoghaddam 2018) عملکرد مدل Turc را در مناطق گرم و خشک مناسب گزارش نمود. همچنین Heidari Motlagh *et al.* (2021) عملکرد مدل‌های تابشی JH و Turc را نسبت به سایر مدل‌های تابشی مناسب گزارش کردند. نتایج مطالعات اشاره شده با نتایج پژوهش حاضر که در شرایط اقلیمی مشابه (نیمه خشک) انجام شده است هم‌خوانی دارد. نتایج به دست آمده از مقادیر شاخص‌های آماری در لایسیمترهای مختلف (شکل ۳) نشان می‌دهد دقت مدل‌ها در مقایسه با اندازه‌گیری لایسیمتری متفاوت است ولی ترتیب آنها از لحاظ عملکرد در لایسیمترهای مختلف تفاوتی محسوسی باهم ندارد.

بررسی عملکرد مدل‌های دمایی در مقابل اندازه‌گیری‌های لایسیمتری

مقادیر تخمین زده شده برای ET₀ توسط مدل‌های گروه دمایی با مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتری در شش حالت مختلف (دو گونه چمن و سه بافت خاک) مورد مقایسه قرار گرفت. میانگین شاخص‌های آماری به دست آمده بین شش حالت داده‌های روزانه لایسیمتری و مدل‌های دمایی در جدول (۸) ارائه شده است. مقادیر R² برای مدل‌های دمایی ۰/۶۱۰ (مدل Mcl) تا ۰/۷۷۰ (مدل FAO24 BC) می‌باشد. اختلاف میانگین بین مدل‌های برآوردکننده و اندازه‌گیری‌های لایسیمتری (MBE) ۰/۱۷۰- تا ۲/۴۴۲- میلی‌متر بر روز بود. در بین مدل‌های دمایی رابطه Har کمترین و FAO24 BC بیشترین برآورد را نسبت به اندازه‌گیری لایسیمتری داشتند. مقادیر RMSE مابین ۱/۵۹۷ تا ۳/۲۹۲ میلی‌متر بر روز به ترتیب برای مدل‌های FAO24 BC و Har به دست آمد. کمترین مقدار MAE و SI نیز برای مدل FAO-24 BC به دست آمد در حالی که بیشترین مقدار MAE و SI به ترتیب مربوط به Har و Mcl است.

با توجه به رتبه دقت چهار مدل دمایی استفاده شده در این تحقیق، FAO-24 BC بهترین عملکرد را داشت و مدل‌های Mcl، BC و Har در رده‌های بعدی قرار گرفتند (جدول ۹). مدل Har به طور گسترده‌ای در بین مدل‌های برآورد ET₀ استفاده شده است. در صورتی

که داده‌های هواشناسی محدود به دمای هوا باشد، مدل Har به عنوان روش مناسب جهت تخمین ET_0 استفاده می‌گردد (Allen et al., 1998). در این مطالعه مدل Har دقت پایین‌تری نسبت به مدل‌های دیگر نشان داد. برخی از مطالعات انجام شده عملکرد ضعیف این مدل را گزارش کرده‌اند که با نتایج این مطالعه همخوانی دارد. Nazari and Kaviani (2016) عملکرد مدل BC را بهتر از Har در اقلیم نیمه خشک ایران بر اساس داده‌های لایسیمتری ET_0 گزارش کردند. همچنین مطالعه Li et al. (2016) در منطقه خشک چین نشان می‌دهد که خطای مدل Har در بین مدل‌های مورد مطالعه بیشتر است. عملکردهای مختلف این مدل می‌تواند تحت تأثیر ویژگی‌های جغرافیایی مناطق مختلف، به ویژه تفاوت‌های آب و هوایی مکان‌های مختلف باشد (Gavilán et al., 2006). FAO-24 BC یک شکل اصلاح شده از مدل BC است (Jensen et al., 1990) که به ظاهر ساده و تنها وابسته به دما است؛ در حالی که سایر پارامترهای موثر هواشناسی بر ET_0 مانند ساعات آفتابی (n)، رطوبت و سرعت باد در محاسبه ضرایب a و b در نظر گرفته می‌شود. با وجود عملکرد خوب این روش در محاسبه ET_0 ، اعمال پارامترهای متعدد در این مدل از جذابیت استفاده از آن می‌کاهد.



شکل ۳- شاخص‌های آماری مدل‌های تابشی بر اساس داده‌های لایسیمتری در حالت‌های مختلف (گونه چمن و بافت خاک) ۱- چمن لولیوم، خاک رسی ۲- چمن فستوکا، خاک رسی ۳- چمن لولیوم، خاک لوم شنی ۴- چمن فستوکا، خاک لوم شنی ۵- چمن لولیوم، خاک لوم سیلتی ۶- چمن فستوکا، خاک لوم سیلتی

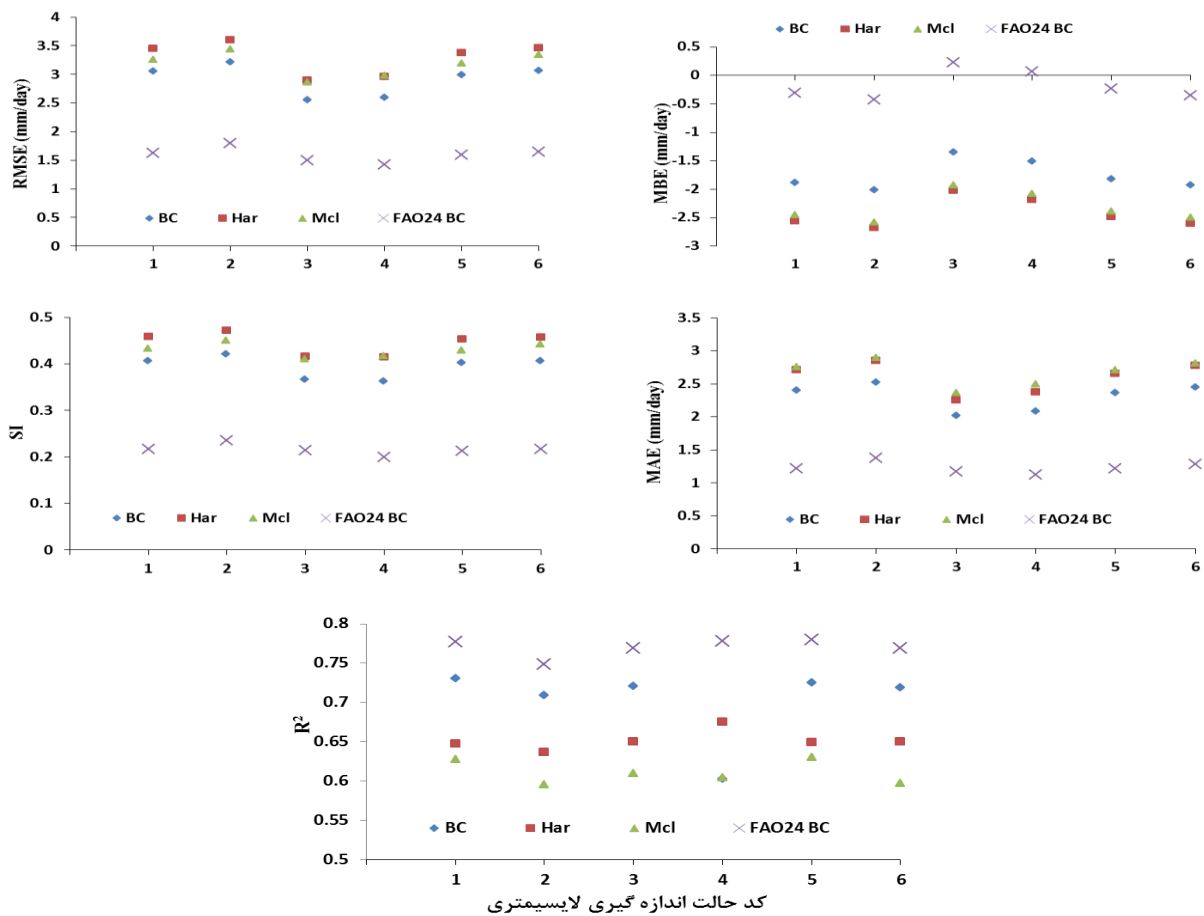
جدول ۸- متوسط عملکرد مدل‌های دمایی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری

مدل	RMSE (mm/day)	MBE (mm/day)	MAE(mm/day)	SI	R ²
BC	۲/۹۱۶	-۱/۷۵۸	۲/۳۰۹	۰/۳۹۴	۰/۷۰۰
Har	۳/۲۹۲	-۲/۴۴۲	۲/۶۰۴	۰/۴۴۵	۰/۶۵۱
Mcl	۳/۱۸۳	-۲/۳۳۱	۲/۶۷۴	۰/۴۳۱	۰/۶۱۰
FAO24 BC	۱/۵۹۷	-۰/۱۷۰	۱/۲۳۰	۰/۲۱۶	۰/۷۷۰

جدول ۹- رتبه دقت عملکرد مدل‌های دمایی

مدل	MBE	MAE	RMSE	SI	R ²	متوسط
BC	۲	۲	۲	۲	۲	۲
Har	۴	۳	۴	۴	۳	۳/۶
Mcl	۳	۴	۳	۳	۴	۳/۴
FAO24 BC	۱	۱	۱	۱	۱	۱

بررسی تاثیر بافت خاک و گونه‌های چمن استفاده شده در دقت مدل‌های دمایی نشان داد، دقت مدل‌ها در حالت‌های مختلف اندازه‌گیری متفاوت است و ترتیب برخی از آنها از لحاظ عملکرد در لایسیمترها با هم فرق دارند (شکل ۴). عملکرد مدل Har در خاک لوم شنی در هر دو گونه چمن کمی بهتر از Mcl است این در حالی است که در خاک‌های رسی و لوم سیلتی این چنین نیست.



شکل ۴- شاخص‌های آماری مدل‌های دمایی بر اساس داده‌های لایسیمتری در حالت‌های مختلف (گونه چمن و بافت خاک) ۱- چمن لولیوم، خاک رسی ۲- چمن فستوکا، خاک رسی ۳- چمن لولیوم، خاک لوم شنی ۴- چمن فستوکا، خاک لوم شنی ۵- چمن لولیوم، خاک لوم سیلتی ۶- چمن فستوکا، خاک لوم سیلتی

بررسی عملکرد مدل‌های انتقال جرم در مقابل اندازه‌گیری‌های لایسیمتری

میانگین شاخص‌های آماری به‌دست آمده بین داده‌های روزانه لایسیمتری و مدل‌های انتقال جرم در جدول (۱۰) ارائه شده است. مقادیر R^2 برای مدل‌های انتقال جرم بین ۰/۶۴۷ (مدل Penman (1948)) تا ۰/۶۹۸ (مدل Mahringer) مشاهده شد. اختلاف میانگین بین مدل‌های برآوردکننده و اندازه‌گیری‌های لایسیمتری (MBE) $-۱/۴۶۱$ تا $۴/۶۴۹$ میلی‌متر بر روز به‌دست آمد که در بین مدل‌های انتقال جرم رابطه Penman (1948) کمترین و Meyer بیشترین برآورد را نسبت به اندازه‌گیری لایسیمتری داشت. مقادیر RMSE مابین ۲/۴۲۷ تا ۶/۰۴۰ میلی‌متر بر روز به ترتیب برای مدل‌های Penman (1948) و Meyer به‌دست آمد. کمترین مقدار MAE و SI نیز برای مدل Penman (1948) مشاهده شد در حالی که بیشترین مقدار MAE و SI مربوط به Meyer است. با توجه به رتبه دقت مدل‌های این گروه Penman (1948) بهترین عملکرد را داشت و مدل‌های WMO، Mahringer و Meyer در رده‌های بعدی قرار گرفتند (جدول ۱۱). نکته مهمی در مورد عملکرد مدل‌های این گروه دیده می‌شود که عملکرد مدل‌های WMO، Mahringer و Meyer در این گروه پایین است ولی همبستگی آنها از مدل Penman (1948) بهتر است. مدل‌های انتقال جرم از قدیمی‌ترین مدل‌ها در تخمین ET_0 بشمار می‌روند و اغلب در مناطق با اقلیم‌های متفاوت تعریف شده است. وجود تفاوت در ویژگی‌های آب و هوایی مناطق مختلف و قدیمی بودن روابط تعریف شده می‌تواند از مهمترین دلایل در تفاوت زیاد بین عملکردهای این مدل‌ها باشد (Farzanpour et al., 2019). با توجه به بالا بودن همبستگی بین مدل‌های این گروه و مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتری، استفاده از روش واسنجی با رگرسیون خطی ساده می‌تواند راه کار مناسبی جهت بهبود عملکرد مدل‌ها باشد (Ferreira et al., 2018); از طرفی (Farzanpour et al., 2019) در ایستگاه‌های سینوپتیک آذربایجان شرقی با واسنجی مدل‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که دقت مدل‌های گروه انتقال جرم در مقایسه با سایر مدل‌ها بهبود بیشتری یافته است.

از مطالعات متعددی که به منظور بررسی عملکرد روش انتقال جرم برای تخمین ET_0 انجام شده است می‌توان به چند مورد از آنها در مناطق مختلف با اقلیم‌های متفاوت اشاره کرد که با نتایج این مطالعه همخوانی دارد. (Ghamarnia and Niazi (2018) در ۱۵۰ ایستگاه سینوپتیک در سراسر ایران روش‌های انتقال جرم را بررسی نمودند که در این مطالعه نیز عملکرد مدل‌های Penman (1948) و WMO برای مناطق نیمه خشک مناسب گزارش شد. لازم به ذکر است آنها از داده‌های لایسیمتری نیز در اقلیم نیمه خشک استفاده کرده بودند که با نتایج به‌دست آمده مطابقت داشت. بررسی‌های (Djaman et al., 2017) برای ایستگاه‌های تانزانیا نشان داد برآورد مقادیر ET_0 مدل‌های آلبرخت^۱، بروکامپ^۲ و ونز^۳، دالتون^۴، مییر^۵، روهور^۶ و اوودین^۵ نسبت به روش مرجع FAO 56 PM بیشتر است و روش Penman (1948) برای منطقه مورد مطالعه عملکرد مناسبی داشت. (Heidari Motlagh et al., 2021) در دشت الشتر دقت مدل Meyer را نسبت به مدل Mahringer در مقایسه با داده‌های لایسیمتری چمن پایین تر گزارش کرد. این در حالی است که در این مطالعه هرچند دقت مدل WMO پایین بود ولی نسبت به مدل Meyer دقت بهتری داشت که تا حدودی با نتایج این مطالعه مغایر است.

جدول ۱۰- متوسط عملکرد مدل‌های انتقال جرم در مقایسه با اندازه‌گیری لایسیمتری

مدل	RMSE (mm/day)	MBE (mm/day)	MAE(mm/day)	SI	R ²
WMO	۴/۱۴۶	۲/۱۷۸	۲/۸۵۴	-۰/۵۶۳	۰/۶۷۷
Meyer	۶/۰۴۰	۴/۶۴۹	۴/۷۶۷	-۰/۸۲۰	۰/۶۹۵
Mahringer	۵/۴۹۲	۳/۸۵۷	۳/۹۱۰	-۰/۷۴۶	۰/۶۹۸
Penman (1948)	۲/۴۲۷	-۱/۴۶۱	۱/۹۴۶	-۰/۳۲۸	۰/۶۴۷

جدول ۱۱- رتبه دقت عملکرد مدل‌های انتقال جرم

مدل	MBE	MAE	RMSE	SI	R ²	متوسط
WMO	۲	۲	۲	۲	۳	۲/۲
Meyer	۴	۴	۴	۴	۲	۳/۶
Mahringer	۳	۳	۳	۳	۱	۲/۶
Penman (1948)	۱	۱	۱	۱	۴	۱/۶

۱ Albrecht

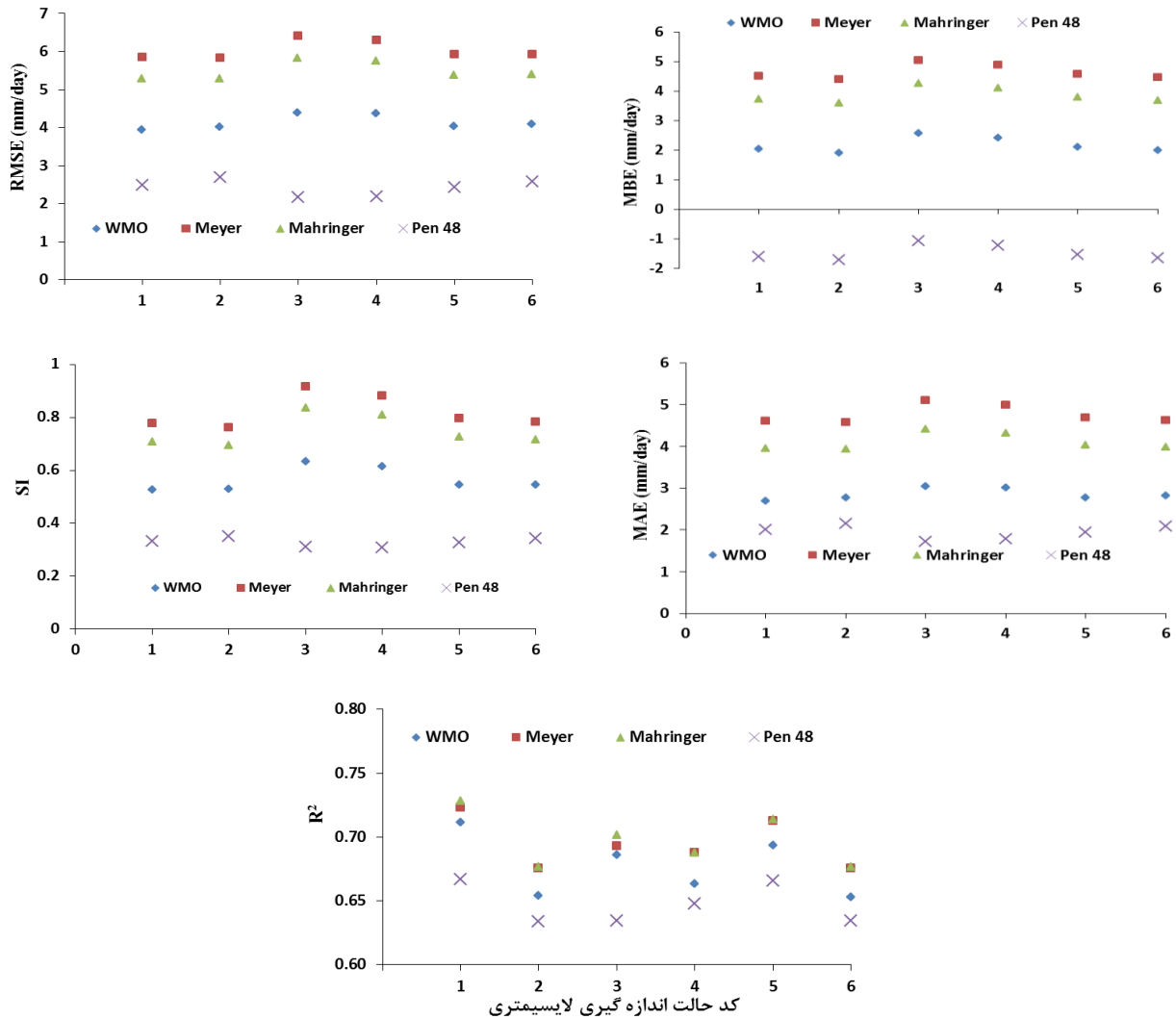
۲ Brockamp and Wenner

۳ Dalton

۴ Rohwer

۵ Oudin

بررسی تاثیر بافت خاک و گونه‌های چمن استفاده شده در عملکرد مدل‌های انتقال جرم (شکل ۵) نشان داد، دقت مدل‌ها در مقایسه با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری با خاک و گونه چمن مختلف، متفاوت هستند؛ هرچند که ترتیب آنها از لحاظ عملکرد (مانند گروه‌های تابش و ترکیبی) در لایسیمترهای مختلف تفاوتی ندارند.



شکل ۵- شاخص‌های آماری مدل‌های انتقال جرم بر اساس داده‌های لایسیمتری در حالت‌های مختلف (گونه چمن و بافت خاک) ۱- چمن لولیوم، خاک رسی ۲- چمن فستوکا، خاک رسی ۳- چمن لولیوم، خاک لوم شنی ۴- چمن فستوکا، خاک لوم شنی ۵- چمن لولیوم، خاک لوم سیلنتی ۶- چمن فستوکا، خاک لوم سیلنتی

مقایسه متقابل مدل‌های مورد مطالعه

همه مدل‌های مورد مطالعه با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری برای هر دو گونه چمن و سه بافت خاک همبستگی مناسبی داشتند. با توجه به تعداد زیاد مدل‌های بررسی شده و استفاده از شاخص‌های آماری مختلف به منظور بررسی بهتر دقت مدل‌ها بر اساس مقادیر متوسط آماره‌ها در شش حالت داده‌های لایسیمتری، رتبه دقت مدل‌ها برای هر یک از شاخص‌های آماری بین ۱۹ مدل انجام شد (جدول ۱۲). دقت مدل‌ها بر اساس رتبه کاهش عبارتند از: KP, Penman-1963, FAO.ppp.17, FAO24 BC, FAO24 Rad, FAO-24 Rad, JH, Turc, Penman-1948, BC, FAO-24 Pen, Meyer, DK, Mahringer, PT, WMO, Mak, Mcl, Har.

مقایسه گروهی مدل‌ها نشان داد که گروه ترکیبی بهترین عملکرد را دارد و گروه‌های دمایی، تابشی و انتقال جرم در رده‌های بعدی قرار گرفتند. البته همه مدل ترکیبی همیشه عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های سایر گروه‌ها ندارد. همانگونه که مشاهده می‌گردد عملکرد

مدل دمایی FAO24 BC بهتر از مدل‌های ترکیبی FAO56 PM و FAO24 Pen بود همچنین FAO-24 Rad به عنوان مدل تابشی عملکرد بهتری نسبت به FAO-24 Pen داشت. در مطالعات مختلف، عملکرد مناسب FAO24 BC برای شرایط آب و هوایی مختلف گزارش شده است (Jensen *et al.*, 1990; Irmak and Irmak, 2008; Liu *et al.*, 2017). نتایج مدل‌های ترکیبی با عملکرد نسبتاً بهتر در این مطالعه با تحقیق Liu *et al.* (2017) مطابقت داشت، اما برخلاف نتایج آنها در این تحقیق مدل‌های دمایی BC و Mcl عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های تابشی PT، Mak و DK داشتند. اگرچه نتایج مطالعات محلی با اقلیم و موقعیت جغرافیایی مشابه نتایج این تحقیق را تایید می‌کند. (Bakhtiari *et al.* (2016) عملکرد مدل BC را بهتر از PT در غرب و شمال غرب ایران گزارش کردند. همچنین در مطالعه دیگری در شمال غرب ایران، عملکرد مدل BC بهتر از مدل Mak در مقایسه با داده‌های لایسیمیتری گزارش شده است (Hozhabr *et al.*, 2014). (Farzanpour *et al.* (2019) برای ایستگاه‌های سینوپتیک آذربایجان شرقی عملکرد مدل‌های انتقال جرم را نسبت به مدل‌های تابشی و دمایی ضعیف گزارش نمودند. تفاوت بین عملکرد مدل‌های تابش و دما ممکن است به اثرات مختلف پارامترهای هواشناسی بر ET₀ در هر منطقه مرتبط باشد. با توجه به مقادیر MBE اغلب مدل‌ها در گروه‌های تابشی، دمایی و ترکیبی، برآورد کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده داشتند در حالی‌که برای گروه انتقال جرم به جز Penman-1948 مقادیر تخمین زده شده توسط مدل‌ها بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری توسط لایسیمیترها بود. در اغلب مطالعات انجام شده همانند این تحقیق مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر از ET₀ برآورد شده توسط مدل‌ها گزارش شده است (Nazari and Kaviani, 2016; Liu *et al.* 2017). قسمتی از این پیش‌برآوردی می‌تواند بخاطر خطاهای به وجود آمده در اندازه‌گیری‌ها باشد. از مهمترین عوامل ایجاد خطا در اندازه‌گیری‌های لایسیمیتری در این پژوهش می‌توان به نشت احتمالی در محل خروجی زهکش برخی از لایسیمیترها، هم‌سطح نبودن کامل بعضی از لایسیمیترها با سطح خاک محیط اشاره نمود. لازم به ذکر است برای به حداقل رساندن خطاهای بوجود آمده در اندازه‌گیری‌ها، در این پژوهش هر یک از حالت‌های اندازه‌گیری در سه تکرار انجام شده است. در این مطالعه، عملکرد مدل‌های KP، FAO.ppp.17، Penman-1963 و FAO24 BC بهتر از FAO56 PM بود. (Heidari Motlagh *et al.* (2021) نیز در دشت الشتر دقت مدل FAO56 PM را نسبت به سایر مدل‌ها در مقایسه با اندازه‌گیری‌های لایسیمیتری چمن پایین گزارش نمودند که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. با این حال، اکثر مطالعات از FAO56 PM به‌خاطر نبودن داده‌های اندازه‌گیری شده به عنوان روش مرجع جهت مدل‌سازی یا ارزیابی سایر مدل‌ها استفاده می‌کنند (Djaman *et al.*, 2015; Chang *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2019).

جدول ۱۲- رتبه دقت مدل‌های فیزیکی-تجربی استفاده شده در حالت کلی

گروه	مدل	MBE	MAE	RMSE	SI	R ²	میانگین گروه
ترکیبی	FAO 56 PM	۶	۵	۵	۵	۳	۴/۸
	FAO-24 Pen	۱۰	۹	۹	۹	۵	۸/۴
	KP	۱	۱	۱	۱	۴	۱/۶
	FAO.ppp.17	۳	۳	۲	۲	۲	۲/۴
	Penman-1963	۲	۲	۳	۳	۱	۲/۲
تابشی	DK	۱۷	۱۷	۱۶	۱۶	۱۹	۱۷/۰
	JH	۷	۷	۷	۷	۸	۷/۲
	Turc	۸	۸	۸	۸	۹	۸/۲
	PT	۱۶	۱۴	۱۴	۱۴	۱۸	۱۵/۲
	Mak	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۴	۱۴/۸
	FAO-24 Rad	۵	۶	۶	۶	۷	۶/۰
دمایی	BC	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۰	۱۰/۸
	Har	۱۴	۱۲	۱۳	۱۳	۱۵	۱۳/۵
	Mcl	۱۳	۱۳	۱۲	۱۲	۱۷	۱۳/۴
	FAO24 BC	۴	۴	۴	۴	۶	۴/۴
انتقال جرم	WMO	۱۲	۱۶	۱۷	۱۷	۱۳	۱۵/۰
	Meyer	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۱۲	۱۷/۶
	Mahringer	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۱	۱۶/۶
	Penman-1948	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۱۶	۱۱/۰



بررسی دقت عملکرد در مدل‌های هر چهار گروه با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری نشان می‌دهد دقت مدل‌ها در مقایسه با گونه‌های چمن تفاوت زیادی با هم ندارند ولی دقت مدل‌ها در لایسیمترهایی که چمن کشت شده در آنها لولیم است بالاتر از چمن فستوکا می‌باشد. مقایسه دقت عملکرد مدل‌ها در سه بافت خاک مختلف برای هر دو گونه چمن نشان می‌دهد دقت مدل‌ها در خاک لوم شنی بیشتر بوده و خاک‌های لوم سیلتی و رسی در رده‌های بعدی قرار گرفتند.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر مقادیر چمن (نزدیکترین حالت به گیاه مرجع فرضی) با استفاده از ۱۹ مدل در گروه‌های ترکیبی، تابشی، دمایی و انتقال جرم برای منطقه تبریز با اقلیم نیمه خشک در طول سه سال (۱۳۹۶-۱۳۹۸) محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی مدل‌ها مقادیر تبخیر و تعرق چمن با روش لایسیمتر وزنی در شش حالت مختلف با ترکیب سه نوع بافت خاک و دو گونه چمن در لایسیمترها اندازه‌گیری شد. مدل‌های KP، Penman-1963، FAO.ppp.17، FAO24 BC و FAO56 PM به عنوان پنج مدل برتر از نظر عملکرد در مقایسه با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری در هر شش حالت مختلف به دست آمدند بررسی گروهی مدل‌ها نشان داد که مدل‌های ترکیبی بهترین عملکرد را برای منطقه مورد مطالعه دارند و مدل‌های دمایی، تابشی و انتقال جرم در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. مدل PM FAO56 که به عنوان مدل استاندارد در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار می‌گیرد، رتبه پنجم را در بین مدل‌های مورد مطالعه در این تحقیق به دست آورد. تعمیم این نتیجه نیاز به آزمایش‌های بیشتری دارد؛ لذا پیشنهاد می‌شود تحقیقی در مناطقی با اقلیم مشابه منطقه مورد مطالعه انجام شود. بر خلاف سایر آماره‌های مورد بررسی، ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل‌های انتقال جرم بالا می‌باشد. با توجه به ساختار ساده این مدل‌ها پیشنهاد می‌شود واسنجی این مدل‌ها برای منطقه مورد مطالعه و اقلیم‌های مشابه صورت گیرد تا استفاده از این مدل‌ها برای اهداف مختلف با دقت بالاتری همراه باشد.

مدل‌های گروه دمایی عملکرد مناسبی در برآورد مقادیر ET_0 از خود نشان دادند. استفاده از مدل‌های گروه دمایی با حداقل داده‌های هواشناسی (دمای هوا) می‌تواند گزینه مناسبی برای تخمین ET_0 در صورت عدم دسترسی به سایر داده‌های هواشناسی در منطقه مورد مطالعه و اقلیم‌های مشابه باشد. بررسی تاثیر بافت خاک و گونه‌های چمن استفاده شده در عملکرد مدل‌ها نشان داد، دقت مدل‌ها در مقایسه با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری با خاک و گونه چمن مختلف، متفاوت هستند؛ هرچند که ترتیب آنها از لحاظ عملکرد در لایسیمترهای مختلف تقریباً مشابه همدیگر هستند. بررسی دقت عملکرد مدل‌ها با گونه‌های چمن و بافت خاک‌های استفاده شده در لایسیمترها نشان داد، دقت مدل‌ها در گونه‌های چمن تفاوت زیادی با هم ندارند اما عملکرد چمن لولیم در حالت کلی اندکی بهتر از فستوکا می‌باشد. مقایسه دقت عملکرد مدل‌ها در سه بافت خاک مختلف برای هر دو گونه چمن نشان می‌دهد دقت مدل‌ها در خاک لوم شنی بیشتر می‌باشد و خاک‌های لوم سیلتی و رسی در رده‌های بعدی قرار دارند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Ahmadifar, V., Delirhasannia R. and Sadraddini, A. A. (2022). Comparative analysis of 15 major reference evapotranspiration models based on weighing lysimeter measurements for two different grass species grown in three soil textures. *Irrigation and Drainage*, 1-17. <https://doi.org/10.1002/ird.2677>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome. <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>.
- Bakhtiari, B., Ghahreman, N., Liaghat, A. M. and Hoogenboom, G. (2011). Evaluation of reference evapotranspiration models for a semiarid environment using lysimeter measurements. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13, 223-237. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?ID=216930>.
- Bakhtiari, B., Mohebbi, A., and Qaderi, K. (2016). Estimation of daily reference evapotranspiration with limited meteorological data in selected Iran's semi-arid climates. *Iran-Water Resources Research*, 11(3), 131-144. (In Farsi). <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=266252>
- Blaney, H. F. and Criddle, W. D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. *United States Department of Agriculture*. SCS-TP-96. 50p.

- Cid, P., Taghvaeian, S. and Hansen, N. (2018). Evaluation of the Fao-56 methodology for estimating maize water requirements under deficit and full irrigation regimes in semiarid northeastern Colorado. *Irrigation and Drainage*, 67(4), 605-614. <https://doi.org/10.1002/ird.2245>
- Crookston, M. A. and Hattendorf, M. (2010). Turf grass ET from small lysimeters in northeast Colorado. *Meeting Irrigation Demands in a Water-Challenged Environment*, 319-328.
- Dai, L., Guo, X., Ke, X., Lan, Y. et al. (2019). Comparison of 13 models of reference evapotranspiration with large weighing lysimeter measurements in a humid alpine meadow, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Authorea*, November 20, 2019. <https://doi.org/10.22541/au.157429061.17486501>
- De Bruin, H. A. R. and Keijman, J. Q. (1979). Priestley-Taylor evaporation model applied to a large, shallow lake in the Netherlands. *Journal of Applied Meteorology*, 18, 898-903. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<0898:TPTEMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<0898:TPTEMA>2.0.CO;2)
- Dinpashoh, Y., Jhajharia, D., Fakheri-Fard, A., Singh, V. P. and Kahya, E. (2011). Trends in reference evapotranspiration over Iran. *Journal of Hydrology* 399, 422-433. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.021>
- Djaman, K., Balde, A., Sow, A., Muller, B., Irmak S., N'Diaye, M., Manneh, B., Moukoumbi, Y., Futakuchi, K. and Saito, K. (2015). Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 139-159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.002>
- Djaman, K., Koudahe, K., Sall, M., Kabenge, I., Rudnick, D. and Irmak, S. (2017). Performance of Twelve Mass Transfer Based Reference Evapotranspiration Models under Humid Climate. *Journal of Water Resource and Protection*, 9(12), pp. 1347-1363. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.912086>
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. (1977). Crop Water Requirements. (p. 24). *FAO Irrigation and Drainage*. Rome. <http://www.fao.org/3/a-f2430e.Pdf>
- Farzanpour, F., Shiri, J., Sadraddini, A. A., and Trajkovic, S. (2019). Global comparison of 20 reference evapotranspiration equations in a semi-arid region of Iran. *Hydrology Research*, 50.1, 282-300. <http://dx.doi.org/10.2166/nh.2018.174>
- Ferreira, L. B., Cunha, F. F., Duarte, A. B., Sedyama, G. C., Cecon, P. R. (2018). Calibration methods for the Hargreaves-Samani equation. *Ciência e Agrotecnologia*, 42 (1): 104-114. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542018421017517>
- Fooladmand, H. R. and Sepaskhah, A. R. (2005). Evaluation and calibration of three evapotranspiration equations in a semi-arid region. *Iran-Water Resources Research*, 1(2), 123-128. (In Farsi)
- Frère, M., and Popov, G F. (1979). Agrometeorological crop monitoring and forecasting. (P.17). *FAO Plant Production and Protection*. Rome. <http://eprints.icrisat.ac.in/id/eprint/13138>.
- Gavilán, P., Lorite, J.J., Tornero, S. and Berengena, J. (2006). Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. *Agricultural Water Management*, 81 (3), 257-281. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.05.001>
- Gee, G. W., and Or, D. (2002). Particle-size analysis. In B. S.: Dane, J.H., & Topp, G. C. (Eds.), *Methods of soil analysis. Physical methods*. (pp. 255-295). *Soil Science Society of America. Madison. Wisconsin*. (Part 4).
- Ghamarnia, H. and Niazi, Z. (2018). Evaluation and Comparison Of Different Methods Of Reference Evapotranspiration Based On Mass Transmission Methods In Iran And Its Zoning By Using Gis. *Iran-Water Resources Research*, 14 (3), 318-338. (In Farsi) <https://www.sid.ir/en/Journal/ViewPaper.aspx?ID=610011>
- Ghamarnia, H., Rezvani, S.V. and Fathi, P. (2013). Evaluation and calibration of Evapotranspiration models according to calculating periods for a cold semi-arid climate. *Water and irrigation management*, 25 (2), 25-37. (In Farsi)
- Ghorbanian, M., Liaghat, A., and Noori, H. (2014). Effect of soil texture and bulk density on evapotranspiration and crop coefficient of forage maize. *Iranian Journal of Water Research in Agriculture*, 28(2): 453-463. (In Farsi) <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?ID=238652>
- Hargreaves, G. H and Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1 (2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- He, H., Wu, Z., Li, D. et al. (2022) Characteristics of Winter Wheat Evapotranspiration in Eastern China and Comparative Evaluation of Applicability of Different Reference Evapotranspiration Models. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* -2022. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00795-y>
- Heidari Motlagh, A., Nasrolahi, A., Sharifiipour, M. and Vayci, SH. (2021). Evaluation of different models for estimating reference evapotranspiration (eto) in Aleshtar plain. *Iranian Journal of Soil and Water*



- Research*, 52 (5). 1409-1421. (In Farsi) 10.22059/ijswr.2021.319027.668894
- Hozhabr, H., Moazed, H. and ShokriKhoodchak, S. (2014). Estimation of reference evapotranspiration (ET_0) using empirical models, artificial neural network modeling and their comparison with lysimeter data in urmia kahrizi station. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 15, 13-25. (In Farsi)
- Irmak, A. and Irmak, S. 2008. Reference and crop evapotranspiration in south central Nebraska. II: measurement and estimation of actual evapotranspiration for corn. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 134(6), 700–715.
- Jensen, M. E., Burman, R. D. and Allen, R. G. (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, New York: ASCE. <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0067841>.
- Jensen, M. E. and Haise, H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 89, 15-41.
- Kashyap, P. S. and Panda, R. K. (2001). Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management*, 50 (1), 9–25. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00102-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00102-0)
- Li, S., Kang, S., Zhang, L., Zhang, J., Du, T., Tong, L., & Ding, R. (2016). Evaluation of six potential evapotranspiration models for estimating crop potential and actual evapotranspiration in arid regions. *Journal of Hydrology*, 543(2016): 450-461. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.022>
- Liu, X., Xu, C., Zhong, X., Li, Y., Yuan, X. and Cao, J. (2017). Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement. *Agricultural Water Management*, 184, 145-155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.01.017>
- Mahringer, W. (1970). Verdunstungsstudien am Neusiedler See. *Arch Met Geoph Biokl Ser*, 18, pp. 1-20.
- Makkink, G. F. (1957). Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers*, 11(3), 277–288. <https://ci.nii.ac.jp/naid/1002564065>
- Meyer, A., (1926). Über einige Zusammenhänge zwischen Klima und Boden in Europa. *Chemie der Erde*, 2, 209-347.
- Nazari, R. and Kaviani, A. (2016). Evaluation of potential evapotranspiration and pan evaporative methods by lysimeter data in a semiarid climate (case study: qazvin plain). *Iranian Journal of Ecohydrology* 3(2) 19-30. (In Farsi) <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?ID=649358>
- Penman, H. L. (1948). Natural Evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society A*, 193, 120–145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- Penman, H. L. (1963). Vegetation and hydrology. Tech. Comm. No. 53. *Commonwealth Bureau of soils*. Harpenden. England. <https://doi.org/10.1002/qj.49708938220>
- Perera, K. C., Western, A. W., Nawarathna, B., and George, B. (2015). Comparison of hourly and daily reference crop evapotranspiration equations across seasons and climate zones in Australia. *Agricultural Water Management*, 148, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.016>
- Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81–92.
- Pinnix, G. D. and Miller, G. L. (2019). Comparing evapotranspiration rates of tall fescue and bermudagrass in North Carolina. *Agricultural Water Management*, 223, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105725>
- Razzaghi, F., Plauborg, F., Jacobsen, S. E., Jensen, C. R. and Andersen, M. N. (2012). Effect of nitrogen and water availability of three soil types on yield, radiation use efficiency and evapotranspiration in field-grown quinoa. *Agricultural Water Management*, 109, 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.02.002>
- Sabziparvar, A., Tafazoli, F., Zare Abyaneh, H., Mosavi Byegi, M., Ghafouri, M., Mohseni Movahed, A. A., and Maryanji, Z. (2008). Comparison of some crop reference evapotranspiration models in a cold semiarid climate to optimize the use of radiation models. *Journal of Water Soil*, 22 (2), 328-340. (In Farsi)
- Shiri, J., Zounemat-Kermani, M., Kisi, O. and Mohsenzadeh Karimi, S. (2019). Comprehensive assessment of 12 soft computing approaches for modeling reference evapotranspiration in humid locations. *Meteorological Applications*, 27, (1). <https://doi.org/10.1002/met.1841>
- Turc, L. (1961). Water requirements assessment of irrigation, potential evapotranspiration: Simplified and updated climatic formula. *Annales Agronomiques* 12, 13–49. [http://refhub.elsevier.com/S0378-3774\(17\)30040-9/sbref0220](http://refhub.elsevier.com/S0378-3774(17)30040-9/sbref0220).
- Vaughan, P. J., Trout, T. J. and Ayars, J. E. (2007). A processing method for weighing lysimeter data and comparison to micrometeorological ET_0 predictions. *Agricultural Water Management* 88, 141-146. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.008>

- WMO, (1966). Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration. Genf: Tech. Pap. (CIMO-Rep) 83.
- Yang, Y., Luo, Y., Wu, C., Zheng H, Zhang, L. and Cui, Y. (2019). Evaluation of six equations for daily reference evapotranspiration estimating using public weather forecast message for different climate regions across China. *Agricultural Water Management*, 222, 386-399. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.014>
- Young, M. H., Wierenga, PJ. and Mancino, C. F. (1996). Large weighing lysimeters for water use and deep percolation studies. *Soil Science*, 161, 491-501. <https://doi.org/10.1097/00010694-199608000-00004>