نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۵، مرداد - شهریور ۱۴۰۰، ص. ۵۲۰-۵۱۰

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 15, Aug.-Sep. 2021, p. 510-520

مقاله علمی - پژوهشی

ارزیابی چهارده روش تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع (مطالعه موردی: استان مازندران)

شکور طافی[1*]، خشایار پیغان[2]، مرضیه باقری خانقاهی[3]، تارا صالحی‌پور باورصاد[4]، امیر سلطانی محمدی[5]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۰۳

چکیده

در این تحقیق، روش‌های تجربی در سه دسته کلی مبتنی بر دما (هارگریوز-سامانی، بلانی-کریدل و تراجکویک)، تابش (جنسن-هیز، آبتیو و ایرماک) و انتقال جرم (ترابرت، WMO و ماهرینگر) و نیز پنج مدل مختلف روش والیانتزاس (مدل‌های والیانتزاس ۱ تا ۵)، از طریق مقایسه با روش فائو-پنمن-مانتیث (FAO-PM) به‌عنوان روش مرجع، ارزیابی شدند. برای این هدف، از داده‌های هواشناسی ۱۰ ایستگاه سینوپتیک استان مازندران در یک دوره ۱۵ ساله (۲۰۱۸-۲۰۰۴) استفاده شد. نتایج نشان داد که از میان روش‌های تجربی مبتنی بر دما، روش هارگریوز-سامانی با R^2 بین ۰/۹۸۰ تا ۰/۹۹۷، در ۶۰٪ از ایستگاه‌ها (شش ایستگاه)، روش تراجکویک با R^2 بین ۰/۹۷۹ تا ۰/۹۹۷، در ۳۰٪ از ایستگاه‌ها (سه ایستگاه) و نیز روش بلانی-کریدل با R^2 بین ۰/۹۸۴ تا ۰/۹۹۴، در ۱۰٪ از ایستگاه‌ها (یک ایستگاه) بهترین عملکرد را داشتند. از بین روش‌های تجربی مبتنی بر تابش، روش جنسن-هیز با R^2 بین ۰/۹۴۶ تا ۰/۹۹۲، در ۷۰٪ از ایستگاه‌ها (هفت ایستگاه) و روش آبتیو با R^2 بین ۰/۸۱۲ تا ۰/۹۳۰، در ۳۰٪ از ایستگاه‌ها (سه ایستگاه) بهترین عملکرد را ارائه دادند. نتایج حاکی از تخمین کم‌تر تبخیر-تعرق گیاه مرجع به‌وسیله هر سه روش تجربی مبتنی بر انتقال جرم نسبت به روش مرجع FAO-PM بود. در هر ۱۰ ایستگاه موردبررسی، روش ترابرت با R^2 بین ۰/۸۱۲ تا ۰/۹۸۴، نسبت به روش‌های WMO و ماهرینگر دقیق‌تر عمل کرده و به روش مرجع FAO-PM نزدیک‌تر بود. تمامی ۵ مدل مختلف روش والیانتزاس در مقایسه با روش مرجع FAO-PM دارای کم‌برآوردی بودند. مدل والیانتزاس ۴ در ۶۰٪ از ایستگاه‌ها (شش ایستگاه) و مدل‌های والیانتزاس ۵ و ۲ نیز هر کدام در ۲۰٪ از ایستگاه‌ها (هر کدام دو ایستگاه) بهترین عملکرد را ارائه نمودند.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی، تبخیر-تعرق، مازندران، والیانتزاس

مقدمه

افزایش جمعیت، افزایش تقاضا برای مواد غذایی و منابع محدود آب و خاک باعث شده است تا نگاه جدی‌تری به توسعه کشاورزی در شرایط اقلیمی ایران شود (خوشحال و همکاران، ۱۳۹۴). تبخیر-تعرق از مهم‌ترین پارامترهایی می‌باشد که تخمین آن جهت برآورد آب موردنیاز گیاه و طراحی سیستم‌های آبیاری ضروری است (موسوی بایگی و همکاران، ۱۳۸۸). به همین خاطر تخمین دقیق آن با توجه به شرایط آب و هوایی هر منطقه و گیاه صورت می‌گیرد. دقیق‌ترین روش برآورد تبخیر-تعرق نصب لایسیمتر می‌باشد که به دلیل هزینه زیاد نصب و نگهداری، استفاده از آن مرسوم نمی‌باشد (زارع ابیانه و همکاران، ۱۳۸۹). لذا امروزه استفاده از روش‌های غیرمستقیم برای تخمین تبخیر-تعرق رواج دارد. تاکنون فرمول‌های مختلفی برای تخمین تبخیر-تعرق ارائه شده که تفاوت عمده آن‌ها در تعداد پارامترهای هواشناسی موردنیاز می‌باشد (Irmark et al., 2006). مطالعات قبلی نشان می‌دهد که مقدار تخمینی تبخیر-تعرق با استفاده از روش FAO-PM در اقلیم‌های مختلف نتایج نزدیک و مطلوب‌تری به نتایج لایسیمتر دارد (بابامیری و دین‌پژوه، ۱۳۹۳). مهدی‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) به‌منظور بررسی عملکرد پنج روش مختلف رابطه والیانتزاس در برآورد تبخیر-تعرق مرجع و مقایسه نتایج با روش FAO-PM با استفاده از داده‌های هواشناسی هفت ایستگاه

۱- کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی علوم آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲- دانشجوی دکتری گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۵- دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: shakoor73tafi@yahoo.com)
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.3.3.7

موردمطالعه، پژوهشی انجام دادند که نتایج نشان داد روش والیانتزاس ۲ با R^2 معادل ۰/۹۸۴ و RMSE برابر ۰/۵۱۲ میلی‌متر بر روز، دقیق‌ترین روش در تخمین تبخیر-تعرق در منطقه موردمطالعه برای دوره‌های ماهانه، فصلی و سالانه می‌باشد. هم‌چنین نتایج حاکی از عملکرد نسبتاً ضعیف روش والیانتزاس ۵ با R^2 معادل ۰/۸۹۱ و RMSE برابر ۱/۲۲۸ میلی‌متر بر روز، بود. آهوقلندری و همکاران در مطالعه‌ای، ضمن محاسبه تبخیر-تعرق با استفاده از روش‌های هارگریوز، تورک، اودین، کوپایس، آبتیو و سه نوع فرمول والیانتزاس برای منطقه پیلبارا[1] در استرالیای غربی با اقلیم نیمه‌خشک، نتایج حاصله را با روش FAO-PM مقایسه کردند. نتایج نشان داد که روش Copais و دو معادله والیانتزاس، برای تخمین تبخیر-تعرق در منطقه موردمطالعه مناسب هستند (Ahooghalandari et al., 2016). ولی پور مطالعه‌ای با هدف بررسی روش‌های محاسبه تبخیر-تعرق شامل والیانتزاس (پنج روش)، پرستلی-تیلور و تورک در شرایط مختلف آب و هوایی ترتیب داد (Valipour., 2015). بدین منظور، اطلاعات هواشناسی از ۱۸۱ ایستگاه سینوپتیک در ۳۱ استان ایران جمع‌آوری و نتایج با روش مرجع FAO-PM مقایسه گردید. طبق نتایج، والیانتزاس ۱ برای مرکز و جنوب (۹ استان) و نیز والیانتزاس ۲ برای غرب، شرق و شمال ایران مناسب‌تر است (۲۲ استان). علاوه بر این، در میان روش‌های داده محدود، والیانتزاس۲ بهترین عملکرد را داشت (۱۸ استان). ایزدیار و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از روش‌های تجربی هارگریوز-سامانی، WMO و روش مرجع FAO-PM، تبخیر-تعرق گیاه مرجع را در ایستگاه‌های هواشناسی اهر، مرند و میانه برآورد کردند که نتایج نشان دادند روش هارگریوز-سامانی در همه ایستگاه‌ها عملکرد بهتری نسبت به روش WMO داشت و به‌عنوان روش برتر در این سه شهر پیشنهاد گردید. با توجه به عدم وجود تحقیقی کامل و مستقل جهت ارزیابی این ۱۴ روش در استان مازندران، هدف از این مطالعه ارزیابی ۱۴ روش تخمین تبخیر-تعرق مرجع (روش‌های والیانتزاس، دمایی، تابشی و انتقال جرم) و واسنجی آن‌ها با توجه به نتایج روش FAO-PM در ده ایستگاه مطالعاتی استان مازندران می‌باشد.

مواد و روش‌ها

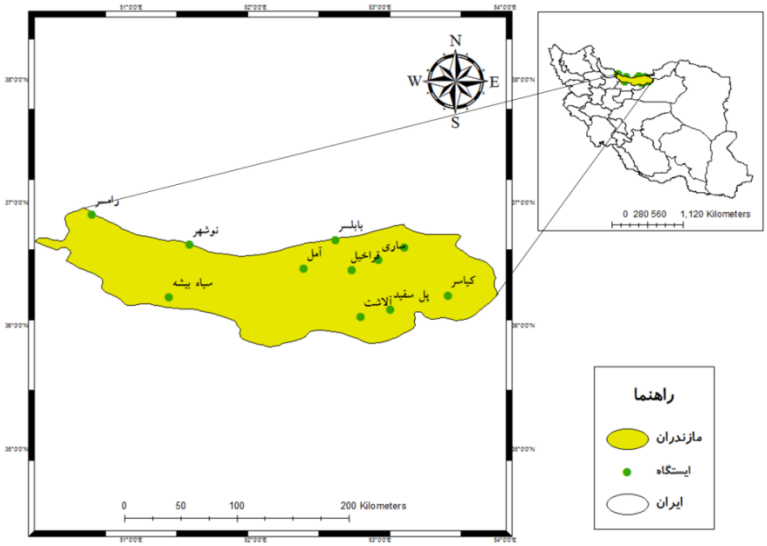
این تحقیق، از پنج مدل مختلف روش تجربی والیانتزاس[2] (Val-1، Val-2، Val-3، Val-4 و Val-5)، سه روش دمایی بلانی-کریدل[3] (BC)، هارگریوز-سامانی[4] (HS)، تراجکویک[5] (TR)، سه روش تابشی جنسن-هیز[6] (JH)، ایرماک[7] (I)، آبتیو[8] (A) و هم‌چنین سه روش انتقال جرم ترابرت[9] (T)، WMO و ماهرینگر[10] (M) برای ارزیابی عملکرد تخمین تبخیر-تعرق استفاده شده است. سپس بهترین روش بر اساس مشخصات آماری شناسایی شد. روش FAO-PM به‌عنوان روش معیار ارزیابی عملکرد انتخاب شد. این روش‌ها با استفاده از داده‌های ماهانه هواشناسی ده ایستگاه سینوپتیک استان مازندران طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۸، آزمایش شده‌اند. ایستگاه‌های موردبررسی در این تحقیق آلاشت، آمل، بابلسر، پل‌سفید، رامسر، ساری، سیاه‌بیشه، قراخیل، کیاسر و نوشهر بودند که موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است.

روابط تجربی برآورد تبخیر-تعرق مرجع

از معادله FAO-PM برای تخمین تبخیر-تعرق بالقوه پوشش گیاهی مرجع استفاده می‌شود. سطح مرجع، سطح صافی است که به‌طور کامل توسط چمن با ارتفاع یکنواخت ۰/۱۲ متر و ضریب آلبیدو ۰/۲۳ پوشانده شده است. معادلات روش‌های مختلف تخمین تبخیر-تعرق مرجع در جدول (۱) آورده شده است.

که در آن ET_O تبخیر-تعرق مرجع (mm/day)، R_n تابش خالص در سطح مرجع $(MJm^{-2}day^{-1})$، T_{min} حداقل دمای هوا $(°C)$، T متوسط دمای ماهانه هوا $(°C)$، RH رطوبت نسبی (%)، φ عرض جغرافیایی ایستگاه موردنظر (rad)، G تراکم شار گرمای خاک $(MJm^{-2}day^{-1})$، U_2 متوسط سرعت باد در ارتفاع دو متری (m/s)، e_s فشار بخار اشباع (kPa)، e_a فشار بخار واقعی (kPa)، Δ شیب بخار (Gao et al., 2006)، R_a تابش فرا جوی سرعت $(MJm^{-2}day^{-1})$، W_{aero} فاکتور آئرودینامیکی و R_S میزان تابش خورشیدی $(MJm^{-2}day^{-1})$ است (مهدی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷). مقادیر برآورد شده از معادلات مختلف با مقدار مرجع به‌دست‌آمده از روش FAO-PM در ایستگاه‌های استان مازندران مقایسه شد. عملکرد معادلات با استفاده از چندین معیار آماری ارزیابی شد. روش FAO-PM (به‌عنوان روش مرجع) بر اساس میانگین مربع ریشه (RMSE)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب باقی‌مانده جرم (CRM) ارزیابی شد. برای تعیین میزان خطا و ارزیابی روش‌های تخمین تبخیر تعرق، شاخص‌ها و معیارهای مختلفی است که در این تحقیق با توجه به منابع مشابه، سه شاخص زیر انتخاب و استفاده شدند:

1- Pilbara
2-Valiantzas
3-Blaney-Criddle
4-Hargreaves-Samani
5-Trajkovic
6-Jensen- Haise
7-Irmak
8-Abtew
9-Trabert
10-Mahringer



شکل ۱- مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های موردمطالعه استان مازندران

جدول ۱- معادلات مختلف تخمین تبخیر-تعرق مرجع

ته دسته	روش	منبع	معادله
دمایی	HG	(Lang et al., 2017)	$ET_0 = 0.0023R_a(T_{mean} + 17.8)\sqrt{T_{max} - T_{min}}$
	BC	ذرتی‌پور و همکاران (۱۳۹۸)	$ET_0 = a + b[P(0.46T_{mean} + 8.13)]$
	TR	ذرتی‌پور و همکاران (۱۳۹۸)	$ET_0 = 0.408 \times 0.0023 \times (T_a + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.424} \times R_a$
تابشی	JH	ذرتی‌پور و همکاران (۱۳۹۸)	$ET_0 = C_T(T - T_X)R_S$
	S	(Lang et al., 2017)	$ET_0 = 0.53\, R_S/\lambda$
	I	ذرتی‌پور و همکاران (۱۳۹۸)	$ET_0 = 0.611 + 0.149 \times R_a + 0.079T_a$
انتقال جرم	T	ذرتی‌پور و همکاران (۱۳۹۸)	$ET_0 = 0.3075\sqrt{u_2}(e_s - e_a)$
	M		$ET_0 = 0.15072\sqrt{3.6u_2}(e_s - e_a)$
	WMO		$ET_0 = (0.1298 + 0.0934u_2)(e_s - e_a)$
والیانتزاس	Val-1	مهدی‌زاده و همکاران (۱۳۹۷)	$ET_0 = 0.0393R_s \sum\|T + 9.5\| - 2.4\left(\frac{R_s}{R_a}\right)^2 - 0.024(T + 20)\left(1 - \frac{RH}{100}\right) + 0.66W_{aero}(T + 20)(1 - \frac{RH}{100})U^{0.6}$
	Val-2		$ET_0 = 0.0393R_s \sum\|T + 9.5\| - 0.19R_s^{0.6}\varphi^{0.15} + 0.048(T + 20)(1 - \frac{RH}{100})U^{0.7}$
	Val-3		$ET_0 = 0.0393R_s \sum\|T + 9.5\| - 2.4\left(\frac{R_s}{R_a}\right)^2 - 0.024(T + 20)\left(1 - \frac{RH}{100}\right) + 0.1W_{aero}(T + 20)(1 - \frac{RH}{100})$
	Val-4		$ET_0 = 0.0393R_s \sum\|T + 9.5\| - 0.19R_s^{0.6}\varphi^{0.15} + 0.078(T + 20)(1 - \frac{RH}{100})$
	Val-5		$ET_0 = 0.0393R_s \sum\|T + 9.5\| - 0.19R_s^{0.6}\varphi^{0.15} + 0.006(T + 20)(\|1.12T - T_{min} - 2\|)^{0.7}$
مرجع	FAO-PM	(Gao et al., 2006)	$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \frac{900}{T + 273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}} \quad (۱)$$

$$R^2=\frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})(O_i-\bar{O})^2\right]}{\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})^2\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2} \quad (۲)$$

$$CRM=\frac{\sum O_i-P_i}{\sum P_i} \quad (۳)$$

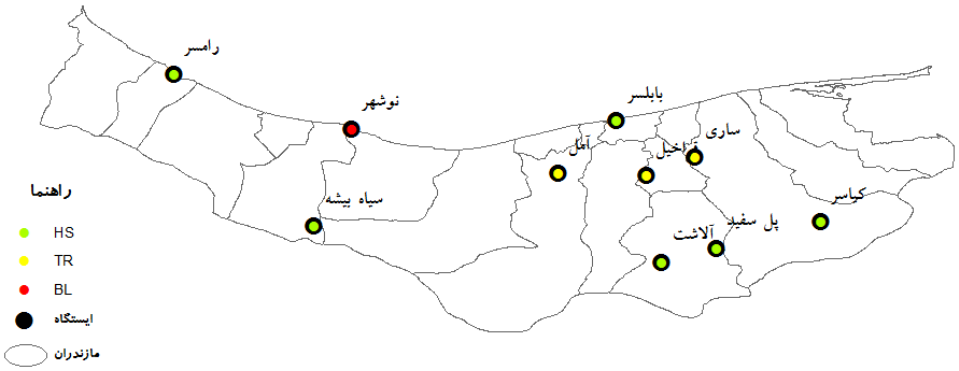
که در آن P_i و O_i به ترتیب مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده، $\bar{P}$ و $\bar{O}$ مقادیر متوسط P_i و O_i و نیز n تعداد کل داده‌ها است. نتایج روش‌های والیانتزاس، دمایی، تابشی و انتقال جرم به‌عنوان مقادیر پیش‌بینی‌شده و نتیجه به‌دست‌آمده از روش مرجع FAO-PM به‌عنوان مقدار مشاهده‌شده در نظر گرفته شد (Binti Ahmad et al., 2019).

نتایج و بحث

میانگین سالانه تبخیر-تعرق گیاه مرجع در ۱۰ ایستگاه سینوپتیک استان مازندران به کمک ۱۴ روش مختلف برای دوره ۱۵ ساله (۲۰۱۸-۲۰۰۴) تخمین زده شد و نتایج حاصل با روش FAO-PM به‌عنوان روش مرجع، مقایسه گردید که نتایج حاصل از این مقایسه در جدول‌های ۲ تا ۵ ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های آماری جهت مقایسه میزان تبخیر-تعرق مرجع حاصل از روش‌های تجربی مبتنی بر دما با روش FAO-PM

روش	شاخص	آلا دشت	آمل	بابلسر	پل‌سفید	رامسر	ساری	سیاه‌بیشه	قراخیل	کیاسر	نوشهر
BC	RMSE (mm/day)	۰/۶۷۲	۰/۶۵۰	۰/۶۹۳	۰/۷۵۱	۰/۵۴۵	۰/۷۳۱	۰/۹۲۵	۰/۷۱۸	۰/۸۵۰	**۰/۵۷۲**
	R^2	۰/۹۸۸	۰/۹۹۱	۰/۹۹۳	۰/۹۸۴	۰/۹۹۳	۰/۹۹۴	۰/۹۹۰	۰/۹۹۴	۰/۹۹۱	**۰/۹۹۱**
	CRM	۰/۱۲۷	-۰/۰۱۶	-۰/۰۴۲	۰/۰۵۷	۰/۰۴۰	-۰/۰۶۴	۰/۱۵۸	-۰/۰۴۶	۰/۰۶۰	**۰/۰۲۹**
HS	RMSE (mm/day)	۰/۱۹۷	۰/۴۴۷	۰/۲۱۳	۰/۳۴۴	۰/۲۲۲	۰/۵۰۰	۰/۴۴۵	۰/۵۴۱	۰/۲۵۳	**۰/۱۸۷**
	R^2	۰/۹۸۵	۰/۹۹۶	۰/۹۹۷	۰/۹۸۹	۰/۹۸۰	۰/۹۸۸	۰/۹۸۷	۰/۹۸۸	۰/۹۸۷	**۰/۹۸۷**
	CRM	-۰/۰۱۵	-۰/۱۶۲	۰/۰۰۷	-۰/۰۵۱	-۰/۰۳۴	-۰/۱۷۳	۰/۱۱۱	-۰/۱۹۳	۰/۰۰۲	**-۰/۰۳۵**
TR	RMSE (mm/day)	۰/۳۷۲	۰/۱۵۲	۰/۵۵۰	۰/۳۷۹	۰/۴۰۰	۰/۲۳۰	۰/۷۴۲	۰/۱۹۱	۰/۴۸۹	**۰/۳۸۷**
	R^2	۰/۹۸۴	۰/۹۹۶	۰/۹۹۷	۰/۹۸۹	۰/۹۷۹	۰/۹۸۸	۰/۹۸۶	۰/۹۸۸	۰/۹۸۷	**۰/۹۸۶**
	CRM	۰/۱۳۸	۰/۰۱۵	۰/۱۴۲	۰/۱۱۸	۰/۱۰۰	۰/۰۰۹	۰/۲۵۰	-۰/۰۰۶	۰/۱۶۲	**۰/۱۰۴**



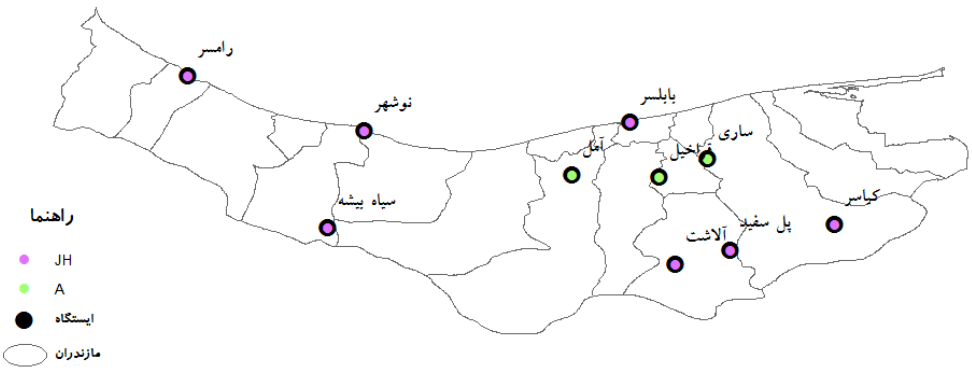
شکل ۲- بهترین روش تخمین تبخیر-تعرق مرجع ماهانه مبتنی بر دسته دمایی در ایستگاه‌های استان مازندران

طبق جدول ۲، برای روش بلانی-کریدل، آماره RMSE در دامنه ۰/۵۴۵ میلی‌متر بر روز، در ایستگاه رامسر تا ۰/۹۲۵ میلی‌متر بر روز، در ایستگاه کیاسر قرار داشت. حداکثر آماره R^2 در دو ایستگاه ساری و قراخیل ثبت شد که برابر ۰/۹۹۴ بود و حداقل آن در ایستگاه پل‌سفید برابر ۰/۹۸۴ به‌دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای این روش می‌باشد. آماره CRM از ۰/۰۶۴- تا ۰/۱۵۸ ثبت گردید. ایستگاه‌های آمل، بابلسر، ساری و قراخیل دارای CRM منفی بودند که نشان‌دهنده تخمین بیش‌ازحد تبخیر-تعرق گیاه مرجع نسبت به روش FAO-PM است. در ایستگاه‌های آلاشت، پل‌سفید، رامسر، سیاه‌بیشه، کیاسر و نوشهر نیز مقادیر مثبت CRM تخمین کم‌تر از حد نسبت به

روش FAO-PM را نشان می‌داد. روش هارگریوز-سامانی با عملکردی بهتر نسبت به روش بلانی کریدل، در آماره RMSE اعدادی بین ۰/۱۹۷ میلی‌متر بر روز تا ۰/۵۴۱ میلی‌متر بر روز را در ایستگاه‌های مختلف ثبت نمود. حداقل و حداکثر آماره R^2 با ۰/۹۸۰ و ۰/۹۹۷ به ترتیب در ایستگاه‌های رامسر و بابلسر محاسبه شد که عملکرد دقیق روش هارگریوز-سامانی در تخمین میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع را نشان می‌دهد. آماره CRM نشان می‌دهد در هفت ایستگاه با مقادیر منفی و دو ایستگاه بابلسر و سیاه‌بیشه با مقادیر مثبت، مقادیر محاسبه‌شده به ترتیب بیش‌تر و کم‌تر از مقادیر حاصل از روش FAO-PM بوده است. در ایستگاه کیاسر آماره CRM برابر ۰/۰۰۲ به‌دست آمد که نشان‌دهنده تخمین دقیق روش هارگریوز-سامانی در این ایستگاه است. در روش ترایجکویک، کم‌ترین مقدار RMSE با ۰/۱۵۲ در ایستگاه بابل و بالاترین مقدار آن با ۰/۷۴۲ در ایستگاه سیاه‌بیشه ثبت گردید. درحالی‌که R^2 در ایستگاه رامسر برابر ۰/۹۷۹ بود، سایر ایستگاه‌ها R^2 بالای ۰/۹۸۴ ثبت نمودند. آماره CRM با مقادیر بین ۰/۰۰۶- برای ایستگاه قراخیل تا ۰/۲۵۰ در ایستگاه سیاه‌بیشه، نشان می‌دهد که تنها در ایستگاه قراخیل، روش ترایجکویک دارای بیش‌تخمینی بوده است و در سایر ایستگاه‌ها مقادیر برآورد شده کم‌تر از مقادیر حاصل از روش مرجع FAO-PM بوده‌اند. مطابق شکل ۲، نتایج رتبه‌بندی بر اساس شاخص‌های آماری برای هر ایستگاه نشان داد که از بین روش‌های تجربی مبتنی بر دما، روش هارگریوز-سامانی در شش ایستگاه- آلاشت، بابلسر، پل سفید، رامسر، سیاه‌بیشه و کیاسر با نزدیک‌ترین تخمین نسبت به روش مرجع FAO-PM، بهترین عملکرد را داشته است. روش ترایجکویک در سه ایستگاه آمل، ساری و قراخیل و هم‌چنین روش بلانی-کریدل در ایستگاه نوشهر بهترین عملکرد را داشتند. ملک‌شاهی و همکاران (۱۳۹۸) طی تحقیقی نشان دادند که بهترین روش‌ها در بین روش-های دمایی در دشت ناز ساری، به ترتیب روش بلانی-کریدل، هارگریوز و هامون بود. هم‌چنین ذرتی‌پور و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی به این نتیجه دست یافتند که از بین روش‌های مبتنی بر دما در استان خوزستان، به ترتیب روش بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی بهترین تخمین تبخیر-تعرق را دارا می‌باشند.

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های آماری جهت مقایسه میزان تبخیر-تعرق مرجع حاصل از روش‌های تجربی مبتنی بر تابش با روش FAO-PM

روش	شاخص	آلاشت	آمل	بابلسر	پل‌سفید	رامسر	ساری	سیاه‌بیشه	قراخیل	کیاسر	نوشهر
JH	RMSE (mm/day)	۰/۸۷۳	۱/۰۹۳	۰/۶۸۳	۱/۱۷۵	۰/۵۶۶	۱/۱۶۳	۱/۱۵۴	۱/۱۱۳	۱/۰۸۷	**۰/۵۹۶**
	R^2	۰/۹۵۳	۰/۹۷۹	۰/۹۶۷	۰/۹۷۷	۰/۹۹۰	۰/۹۹۱	۰/۹۴۶	۰/۹۹۲	۰/۹۸۴	**۰/۹۸۶**
	CRM	-۰/۰۴۰	-۰/۱۹۵	-۰/۰۲۳	-۰/۱۰۱	-۰/۰۰۴	-۰/۲۳۸	۰/۰۵۱	-۰/۲۲۵	-۰/۰۷۲	**-۰/۰۰۲**
I	RMSE (mm/day)	۱/۲۱۵	۱/۴۸۰	۱/۶۷۶	۱/۷۳۱	۱/۳۳۱	۱/۵۹۶	۱/۵۸۷	۱/۵۰۱	۱/۶۲۴	**۱/۳۸۵**
	R^2	۰/۹۱۶	۰/۸۶۸	۰/۸۶۷	۰/۹۰۲	۰/۷۹۹	۰/۸۶۹	۰/۹۲۵	۰/۸۶۲	۰/۹۰۴	**۰/۸۲۰**
	CRM	۰/۴۳۵	۰/۴۶۹	۰/۴۹۲	۰/۵۳۰	۰/۴۲۸	۰/۴۸۳	۰/۵۱۴	۰/۴۶۷	۰/۵۰۹	**۰/٤٤٦**
A	RMSE (mm/day)	۰/۳۶۲	۰/۵۹۶	۰/۷۷۰	۰/۵۸۵	۰/۶۷۲	۰/۶۹۰	۰/۴۳۲	۰/۶۴۰	۰/۵۴۵	**۰/٦٢٦**
	R^2	۰/۹۲۲	۰/۸۷۷	۰/۸۷۷	۰/۹۰۹	۰/۸۱۲	۰/۸۷۹	۰/۹۳۰	۰/۸۷۲	۰/۹۱۱	**۰/۸۳۱**
	CRM	-۰/۰۵۱	۰/۰۰۳	۰/۰۴۵	۰/۱۲۰	-۰/۰۷۵	۰/۰۲۹	۰/۰۹۵	۰/۰۰۱	۰/۰۸۴	**-۰/۰٤۰**



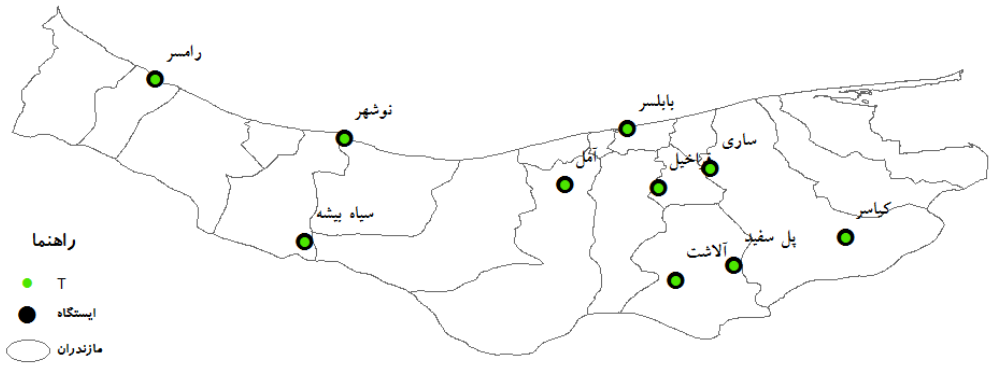
شکل ۳- بهترین روش تخمین تبخیر-تعرق مرجع ماهانه مبتنی بر دسته تابشی در ایستگاه‌های استان مازندران

بر اساس جدول ۳، روش جنسن-هیز بالاترین و پایین‌ترین آماره RMSE را با ۱/۱۷۵ و ۰/۵۶۶ میلی‌متر بر روز، به ترتیب در ایستگاه-

های پل‌سفید و رامسر ثبت نمود. آماره R^2 در دامنه ۰/۹۴۶ برای ایستگاه سیاه‌بیشه تا ۰/۹۹۲ برای ایستگاه قراخیل محاسبه شد که نشان‌دهنده دقت بالای این روش و نزدیکی نتایج با روش مرجع FAO-PM می‌باشد. با توجه به مقدار منفی آماره CRM در نه ایستگاه، می‌توان گفت که روش جنسن-هیز در مقایسه با روش مرجع FAO-PM دارای بیش برآوردی می‌باشد. روش جنسن-هیز تنها در ایستگاه سیاه‌بیشه با CRM برابر ۰/۰۵۱-، دارای کم‌برآوردی بود. روش ایرماک با RMSE بین ۱/۲۱۵ تا ۱/۷۳۱ میلی‌متر بر روز و R^2 بین ۰/۷۹۹ تا ۰/۹۲۵، عملکرد پایین‌تری نسبت به سایر روش‌های مبتنی بر تابش، نشان داد. با توجه به آن‌که کم‌ترین میزان آماره CRM که در ایستگاه رامسر رخ داد، مقداری مثبت و برابر ۰/۴۲۸ بود، می‌توان نتیجه گرفت که روش ایرماک در تمامی ایستگاه‌ها، میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع را بیش از میزان حاصل از روش مرجع FAO-PM محاسبه نمود. روش آبتیو، در آماره RMSE اعدادی در بازه ۰/۳۶۲ تا ۰/۷۷۰ میلی‌متر بر روز و در آماره R^2 اعدادی در بازه ۰/۸۱۲ تا ۰/۹۳۰ ثبت نمود. روش آبیتو در سه ایستگاه آلاشت، رامسر و نوشهر به ترتیب با CRM برابر ۰/۰۵۱-، ۰/۰۷۵- و ۰/۰۴۰-، نسبت به روش مرجع FAO-PM دارای بیش برآوردی و در شش ایستگاه دیگر با مقادیر بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۱۲۰ دارای کم برآوردی بود. شکل ۳ نشان می‌دهد که در مقایسه و رتبه‌بندی سه روش تجربی مبتنی بر تابش بر اساس میزان نزدیکی به روش مرجع FAO-PM، روش جنسن-هیز در هفت ایستگاه و روش آبتیو در سه ایستگاه، بهترین عملکرد را ارائه دادند و روش ایرماک نیز در هیچ‌کدام از ایستگاه‌های ۱۰ گانه، نتوانست به‌عنوان بهترین روش معرفی شود. فولادمند و صالونی (۱۳۹۳) طی تحقیقی اعلام نمودند معادله جنسن-هیز برای تخمین تبخیر-تعرق در استان فارس مناسب‌تر می‌باشد و نیز موسوی بایگی و همکاران (۱۳۹۰) ضعیف‌ترین مدل از لحاظ دقت برای تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع را در اقلیم نیمه‌خشک ایران در بین مدل‌های تابشی، به ترتیب مدل‌های جنسن- هیز و ایرماک، اعلام کردند.

جدول ٤- مقادیر شاخص‌های آماری جهت مقایسه میزان تبخیر-تعرق مرجع حاصل از روش‌های تجربی مبتنی بر انتقال جرم با روش FAO-PM

روش	شاخص	آلاشت	آمل	بابلسر	پل‌سفید	رامسر	ساری	سیاه‌بیشه	قراخیل	کیاسر	نوشهر
WMO	RMSE (mm/day)	۱/۳۷۹	۱/۴۸۴	۱/۴۴۳	۰/۷۲۵	۱/۳۲۷	۱/۵۰۶	۱/۳۳۵	۱/۵۳۶	۱/۵۵۵	**۱/٤٤٤**
	R^2	۰/۹۴۰	۰/۹۸۴۲	۰/۹۸۰	۰/۹۳۶	۰/۹۲۶	۰/۹۷۸	۰/۷۶۴	۰/۹۷۵	۰/۹۶۹۷	**۰/۹٤۸**
	CRM	۰/۴۸۵	۰/۵۰۱	۰/۴۶۸	۰/۲۱۶	۰/۴۸۳	۰/۵۰۰	۰/۳۸۴	۰/۵۲۶	۰/۴۷۸	**۰/٥۰٥**
T	RMSE (mm/day)	۰/۸۶۷	۰/۹۲۷	۰/۸۲۲	۰/۳۷۴	۰/۸۰۶	۰/۹۰۳	۰/۷۷۷	۰/۹۹۴	۱/۰۰۸	**۰/۹۳۸**
	R^2	۰/۹۴۲	۰/۹۸۴	۰/۹۷۹	۰/۹۲۸	۰/۹۲۴	۰/۹۷۷	۰/۸۱۲	۰/۹۷۴	۰/۹۶۹	**۰/۹٤۳**
	CRM	۰/۲۸۴	۰/۳۱۲	۰/۲۶۸	-۰/۰۳۳	۰/۲۸۴	۰/۳۰۳	۰/۱۷۱	۰/۳۴۴	۰/۲۹۱	**۰/۳۲۱**
M	RMSE (mm/day)	۰/۹۹۲	۱/۰۶۸	۰/۹۸۰	۰/۳۴۷	۰/۹۳۳	۱/۰۵۰	۰/۹۱۲	۱/۱۳۰	۱/۱۵۲	**۱/۰٦۷**
	R^2	۰/۹۴۲	۰/۹۸۴۱	۰/۹۷۹	۰/۹۲۸	۰/۹۲۴	۰/۹۷۷	۰/۸۱۲	۰/۹۷۴	۰/۹۶۹۵	**۰/۹٤۳**
	CRM	۰/۳۳۴	۰/۳۶۰	۰/۳۱۹	۰/۰۳۹	۰/۳۳۵	۰/۳۵۲	۰/۲۲۹	۰/۳۹۰	۰/۳۴۱	**۰/۳٦۸**



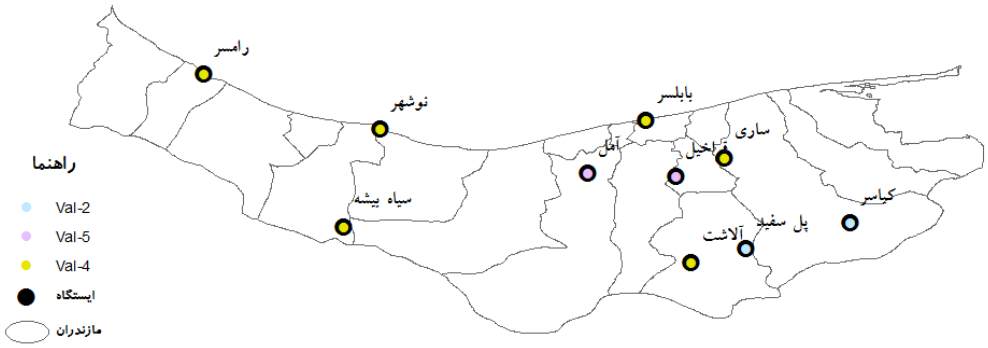
شکل ٤- بهترین روش تخمین تبخیر-تعرق مرجع ماهانه مبتنی بر دسته انتقال جرم در ایستگاه‌های استان مازندران

مطابق جدول ۴، روش WMO در ایستگاه پل‌سفید با ۰/۷۲۵ میلی‌متر بر روز، حداقل و در ایستگاه کیاسر با ۱/۵۵۵ میلی‌متر بر روز، حداکثر آماره RMSE را ثبت نمود. روش WMO در ایستگاه سیاه-بیشه با R^2 برابر ۰/۷۶۴، عملکرد مناسبی نداشت، اگر چه که در نه

ایستگاه دیگر با مقادیر بین ۰/۹۲۶ تا ۰/۹۸۴، عملکرد دقیقی داشت. آماره CRM با مقادیر بین ۰/۲۱۶ تا ۰/۵۲۶، نشان می‌دهد که روش WMO در تمامی ایستگاه‌های موردمطالعه، نسبت به روش مرجع FAO-PM، دارای کم برآوردی بوده است. روش ترابرت بر اساس آماره RMSE، بهترین عملکرد خود را در ایستگاه پل‌سفید با RMSE برابر ۰/۳۷۴ میلی‌متر بر روز و ضعیف‌ترین عملکرد خود را در ایستگاه کیاسر با RMSE برابر ۱/۰۰۸ ارائه داد. آماره R^2 بین مقادیر تبخیر–تعرق گیاه مرجع حاصل از روش مرجع FAO-PM و روش ترابرت بین ۰/۸۱۲ تا ۰/۹۸۴ محاسبه گردید که نزدیکی خوبی بین را این دو روش نشان می‌دهد. از بین تمامی ایستگاه‌ها تنها ایستگاه پل‌سفید با CRM برابر ۰/۰۳۳-، نشان‌دهنده بیش‌تخمینی روش ترابرت بود و سایر ایستگاه‌ها با ثبت مقادیر مثبت CRM در بازه ۰/۱۷۱ تا ۰/۳۴۴، کم برآوردی این روش را نشان دادند. روش ماهرینگر نیز همانند روش ترابرت، بر اساس آماره RMSE، بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد خود را به ترتیب با RMSE برابر ۰/۳۴۷ و ۱/۱۵۲ میلی‌متر بر روز، در ایستگاه‌های پل‌سفید و کیاسر ثبت نمود. مقادیر R^2 برای روش ماهرینگر در دامنه ۰/۸۱۲ در ایستگاه سیاه‌بیشه تا ۰/۹۸۴ در ایستگاه آمل قرار گرفت. آماره CRM در تمامی ایستگاه‌ها برای روش ماهرینگر مثبت بود که حاکی از تخمین کم‌تر تبخیر–تعرق گیاه مرجع توسط این روش، نسبت به روش مرجع FAO-PM می‌باشد. بر اساس شکل ۴، از میان روش‌های تجربی مبتنی بر انتقال جرم، روش ترابرت در تمامی ایستگاه‌های موردمطالعه در این پژوهش، نسبت به دو روش دیگر برتری داشت و توانست میزان تبخیر–تعرق گیاه مرجع را نزدیک به روش مرجع FAO-PM، تخمین بزند. ولی‌پور در تحقیقی به این نتیجه رسید که روش ترابرت بهترین تخمین تبخیر–تعرق را در استان‌های اردبیل و مازندران داشت (Valipour., 2017). هم‌چنین دجامان و همکاران نیز اعلام نمودند که روش ترابرات جزو روش‌هایی است که بهترین عملکرد را در سراسر تانزانیا و جنوب غربی کنیا دارا می‌باشد (Djaman et al., 2017).

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های آماری جهت مقایسه میزان تبخیر–تعرق مرجع حاصل از مدل‌های مختلف روش والیانتزاس با روش FAO-PM

روش	شاخص	آلاشت	آمل	بابلسر	پل‌سفید	رامسر	ساری	سیاه بیشه	قراخیل	کیاسر	نوشهر
VAL-1	RMSE (mm/day)	۱/۸۹۱	۱/۹۳۳	۲/۰۲۹	۱/۹۵۰	۱/۷۷۸	۲/۰۲۷	۲/۰۱۶	۱/۹۵۷	۲/۱۸۱	**۱/۸۵۹**
	R^2	۰/۸۸۹	۰/۹۲۹	۰/۹۴۶	۰/۹۵۹	۰/۹۵۱	۰/۹۳۲	۰/۹۰۹	۰/۹۳۰	۰/۹۳۷	**۰/۹۴۶**
	CRM	۰/۷۲۷	۰/۶۹۷	۰/۶۹۴	۰/۶۳۸	۰/۶۹۴	۰/۷۰۶	۰/۶۷۸	۰/۷۰۳	۰/۷۳۲	**۰/۷۰۳**
VAL-2	RMSE (mm/day)	۰/۳۸۳	۰/۴۵۹	۰/۵۵۵	۰/۲۵۸	۰/۳۴۲	۰/۵۴۱	۰/۵۰۸	۰/۴۸۸	۰/۶۲۶	**۰/۴۰۴**
	R^2	۰/۹۸۷	۰/۹۷۰	۰/۹۸۲	۰/۹۸۷	۰/۹۸۱	۰/۹۷۹	۰/۹۷۶	۰/۹۷۹	۰/۹۸۳	**۰/۹۷۶**
	CRM	۰/۱۳۷	۰/۱۲۶	۰/۱۴۲	۰/۰۶۹	۰/۰۸۱	۰/۱۵۱	۰/۱۴۸	۰/۱۴۲	۰/۱۹۱	**۰/۱۰۴**
VAL-3	RMSE (mm/day)	۱/۸۱۶	۱/۹۱۱	۲/۰۲۱	۲/۱۱۹	۱/۷۴۷	۱/۹۲۸	۲/۰۷۵	۱/۹۲۱	۲/۲۲۶	**۱/۸۶۰**
	R^2	۰/۹۱۳	۰/۹۳۸	۰/۹۶۰	۰/۹۶۵	۰/۹۶۲	۰/۹۵۸	۰/۹۵۹	۰/۹۴۵	۰/۹۴۰	**۰/۹۵۶**
	CRM	۰/۷۰۱	۰/۶۹۱	۰/۶۹۲	۰/۶۹۰	۰/۶۸۳	۰/۶۷۶	۰/۷۰۱	۰/۶۹۳	۰/۷۴۷	**۰/۷۰۴**
VAL-4	RMSE (mm/day)	۰/۲۷۵	۰/۴۱۷	۰/۵۴۵	۰/۴۶۳	۰/۳۰۷	۰/۴۱۶	۰/۵۸۱	۰/۴۲۸	۰/۶۸۵	**۰/۳۹۶**
	R^2	۰/۹۸۸	۰/۹۸۱	۰/۹۸۹	۰/۹۸۹	۰/۹۸۶	۰/۹۹۰	۰/۹۹۱	۰/۹۸۹	۰/۹۸۳	**۰/۹۸۵**
	CRM	۰/۰۸۳	۰/۱۱۳	۰/۱۲۹	۰/۱۳۵	۰/۰۵۹	۰/۱۰۱	۰/۱۹۰	۰/۱۲۱	۰/۲۱۱	**۰/۱۰۴**
VAL-5	RMSE (mm/day)	۰/۵۱۳	۰/۳۵۱	۰/۵۷۵	۰/۵۷۲	۰/۳۸۶	۰/۴۳۱	۱/۰۷۲	۰/۳۴۹	۰/۸۸۸	**۰/۳۸۹**
	R^2	۰/۹۷۸	۰/۹۸۹	۰/۹۹۶	۰/۹۸۶	۰/۹۷۵	۰/۹۸۹	۰/۹۸۳	۰/۹۹۳	۰/۹۸۱	**۰/۹۸۴**
	CRM	۰/۱۹۴	۰/۰۹۳	۰/۱۵۷	۰/۱۸۲	۰/۱۰۱	۰/۱۰۴	۰/۳۶۴	۰/۰۹۰	۰/۲۹۸	**۰/۱۱۴**



شکل ۵- بهترین روش تخمین تبخیر-تعرق مرجع ماهانه مبتنی بر دسته والیانتزاس در ایستگاه‌های استان مازندران

بر اساس جدول ۵، مدل والیانتزاس ۱، بالاترین RMSE را با ۲/۱۸۱ میلی‌متر بر روز، در ایستگاه کیاسر ثبت کرد که نشان‌دهنده بیش‌ترین میزان خطا می‌باشد. ایستگاه رامسر با RMSE معادل ۱/۷۷۸ میلی‌متر بر روز، بر اساس این آماره، کم‌ترین میزان خطا را ثبت نمود. ضریب تعیین میان مقادیر تخمین‌زده شده تبخیر-تعرق گیاه مرجع توسط مدل والیانتزاس ۱ و نیز روش مرجع FAO-PM، بین ۰/۸۸۹ در ایستگاه آلاشت تا ۰/۹۵۹ در ایستگاه پل‌سفید متغیر بود که دقت مناسب این مدل را نشان می‌دهد. آماره CRM نیز با قرارگیری در بازه عددی ۰/۶۳۸ تا ۰/۷۳۲، حاکی از آن است که در تمامی ایستگاه‌ها، مقادیر حاصل از تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع توسط مدل والیانتزاس ۱، کم‌تر از روش مرجع FAO-PM بوده است. مدل والیانتزاس ۲، در آماره RMSE، اعدادی بین ۰/۲۵۸ میلی‌متر بر روز در ایستگاه پل‌سفید تا ۰/۶۲۶ میلی‌متر بر روز در ایستگاه کیاسر را ثبت نمود که عملکرد دقیق این مدل در تخمین مقادیر تبخیر-تعرق گیاه مرجع را نشان می‌دهد. آماره R^2 نیز با ثبت اعدادی در بازه ۰/۹۷۰ تا ۰/۹۸۷ برای ایستگاه‌های ۱۰ گانه، حاکی از دقت بسیار بالای مدل می‌باشد. بر اساس آماره CRM، اگرچه مدل والیانتزاس ۲ در تمامی ایستگاه‌ها نسبت به روش مرجع FAO-PM دارای کم برآوردی بود اما همچون دو آماره دیگر، دقت مدل را تائید می‌کند. بالاترین میزان آماره CRM که نشان‌دهنده بیش‌ترین خطای مدل می‌باشد برابر ۰/۱۹۱ بود و در ایستگاه کیاسر مشاهده شد. برای مدل والیانتزاس ۳، آماره RMSE بین ۱/۷۴۷ میلی‌متر بر روز در ایستگاه رامسر تا ۲/۲۲۶ میلی‌متر بر روز در ایستگاه کیاسر، آماره R^2 بین ۰/۹۱۳ در ایستگاه آلاشت تا ۰/۹۶۵ در ایستگاه پل‌سفید و نیز آماره CRM بین ۰/۶۷۶ در ایستگاه ساری تا ۰/۷۴۷ در ایستگاه کیاسر، ثبت گردید. در مجموع، ضعیف‌ترین عملکرد این مدل در ایستگاه کیاسر رخ داد. مدل والیانتزاس ۴، بر اساس آماره RMSE، بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد خود را به ترتیب با RMSE برابر ۰/۲۷۵ و ۰/۶۸۵ میلی‌متر بر روز، در ایستگاه‌های آلاشت و کیاسر ارائه داد. آماره R^2 در ایستگاه‌های ۱۰ گانه برای مدل والیانتزاس ۴ بین ۰/۹۸۱ تا ۰/۹۹۱ بود که نزدیکی بسیار بالای نتایج این مدل با نتایج حاصل از روش مرجع FAO-PM را تصدیق می‌کند. با توجه به آن‌که آماره CRM در تمامی ایستگاه‌ها برای مدل والیانتزاس ۴، اعدادی مثبت را ثبت نمود، می‌توان نتیجه گرفت که این مدل نیز همچون سایر مدل-های روش والیانتزاس دارای کم برآوردی می‌باشد. آماره CRM برای این مدل بین ۰/۰۵۹ تا ۰/۲۱۱ محاسبه گردید. مدل والیانتزاس ۵ در آماره RMSE، در ایستگاه‌های مختلف، اعدادی در بازه ۰/۳۵۱ تا ۱/۰۷۲ میلی‌متر بر روز را ثبت کرد. آماره R^2 برای این مدل بین ۰/۹۷۵ تا ۰/۹۹۶ محاسبه شد که نشان می‌دهد مقادیر تخمین زده‌شده تبخیر-تعرق گیاه مرجع توسط این مدل به روش مرجع FAO-PM نزدیک بوده است. حداقل و حداکثر آماره CRM برای این مدل به ترتیب برابر ۰/۰۹۰ و ۰/۳۶۴ بود. مطابق شکل ۵، مقایسه و رتبه‌بندی مدل‌های مختلف روش والیانتزاس نشان داد که در شش ایستگاه شامل آلاشت، بابلسر، رامسر، ساری، سیاه‌بیشه و نوشهر، مدل والیانتزاس ۴، در دو ایستگاه آمل و قراخیل، مدل والیانتزاس ۵ و در دو ایستگاه پل‌سفید و کیاسر، مدل والیانتزاس ۲ بهترین عملکرد را ارائه کرده و در تخمین مقادیر تبخیر-تعرق گیاه مرجع به روش مرجع FAO-PM نزدیک‌تر بوده‌اند. مهدی زاده و همکاران (۱۳۹۷) در تحقیقی اعلام کردند که مدل والیانتزاس ۲ بهترین تخمین تبخیر-تعرق را در هفت ایستگاه واقع در شمال غرب کشور دارد. بنتی احمد و همکاران، ۲۰۱۸ در پژوهشی بیان کردند مدل والیانتزاس ۲ در هفده ایستگاه شبه‌جزیره مالزی بهترین نتیجه را نسبت به روش مرجع FAO-PM به دست آورده است.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که از میان روش‌های تجربی مبتنی بر دما، روش هارگریوز-سامانی با R^2 بین ۰/۹۸۰ تا ۰/۹۹۷ در ۶۰٪ ایستگاه‌ها یعنی شش ایستگاه شامل آلاشت، بابلسر، پل سفید، رامسر، سیاه‌بیشه و کیاسر، روش تراجکویک با R^2 بین ۰/۹۷۹ تا ۰/۹۹۷ در ۳۰٪

ایستگاه‌ها شامل سه ایستگاه آمل، ساری و قراخیل و نیز روش بلانی-کریدل با R^2 بین ۰/۹۸۴ تا ۰/۹۹۴ در ۱۰٪ از ایستگاه‌ها یعنی ایستگاه نوشهر بهترین عملکرد را در تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع داشتند. از بین روش‌های تجربی مبتنی بر تابش، روش جنسن-هیز با R^2 بین ۰/۹۴۶ تا ۰/۹۹۲، در ۷۰٪ از ایستگاه‌ها شامل هفت ایستگاه آلاشت، بابلسر، پل‌سفید، رامسر، سیاه‌بیشه، کیاسر و نوشهر و روش آبتیو با R^2 بین ۰/۸۱۲ تا ۰/۹۳۰، در ۳۰٪ از ایستگاه‌ها یعنی سه ایستگاه آمل، ساری و قراخیل بهترین عملکرد را ارائه دادند. روش ایرماک در هیچ‌یک از ۱۰ ایستگاه، نسبت به دو روش دیگر برتری نداشت. نتایج حاکی از تخمین کم‌تر تبخیر-تعرق گیاه مرجع توسط هر سه روش تجربی مبتنی بر انتقال جرم نسبت به روش مرجع FAO-PM بود. در هر ۱۰ ایستگاه موردبررسی، روش ترابرت با R^2 بین ۰/۸۱۲ تا ۰/۹۸۴، نسبت به روش‌های WMO و ماهرینگر دقیق‌تر عمل کرده و به روش مرجع FAO-PM نزدیک‌تر بود. تمامی ۵ مدل مختلف روش والیانتزاس نسبت به روش مرجع FAO-PM دارای کم برآوردی بودند. مدل والیانتزاس ۴ در ۶۰٪ ایستگاه‌ها یعنی شش ایستگاه شامل آلاشت، بابلسر، رامسر، ساری، سیاه‌بیشه و نوشهر، مدل والیانتزاس ۵ در ۲۰٪ از ایستگاه‌ها شامل دو ایستگاه آمل و قراخیل و مدل والیانتزاس ۲ نیز در ۲۰٪ دیگر ایستگاه‌ها یعنی دو ایستگاه پل‌سفید و کیاسر، بهترین عملکرد را ارائه نمودند.

منابع

ایزدیار، م.، هاشمی، س. و صمدیان فرد، س. ۱۳۹۸. برآورد تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش‌های دما پایه و انتقال جرم. چهارمین کنگره بین المللی توسعه کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست و گردشگری. ایران. تبریز.

بابامیری، ا. و دین‌پژوه، ی. ۱۳۹۳. مقایسه و ارزیابی بیست روش تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع مبتنی بر سه دسته کلی دمای هوا، تابش خورشید و انتقال جرم در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. مجله علوم آب و خاک.۲۰ (۷۷). ۱۶۱-۱۴۵.

موسوی بایگی، م.، اشرف، ب. و میان‌آبادی، آ. ۱۳۹۰. ارزیابی چهار مدل تبخیر- تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم نیمه‌خشک ایران با هدف انتخاب بهترین مدل تابش. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۷ (۴). ۱۰۵-۸۷.

فولادمند، ح. و صالونی، م. ۱۳۹۳. اصلاح معادله جنسن- هیز برای تخمین تبخیرتعرق در استان فارس. مجله مهندسی آبیاری و آب ایران. ۴ (۱۶):۱۰۵-۹۵.

مهدی زاده، س.، خشائی، ف.، بهمنش، ج. و دلیر حسن نیا، ر. ۱۳۹۷. تحلیل مقایسه‌ی دقت پنج مدل مختلف رابطه والیانتزاس در برآورد تبخیر-تعرق مرجع. علوم و مهندسی آبیاری. ۴۱(۳). ص ۱۳۲-۱۱۹.

ملکشاهی، ا.، درزی نفت چالی، ع. و محسنی، ب. ۱۳۹۸. تحلیل دقت معادله‌های برآورد تبخیر- تعرق مرجع در مقیاس روزانه، ماهانه و فصلی در یک منطقه مرطوب. مجله مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۰ (۳۸). ۲۴۴-۲۲۷.

زارع ابیانه، ح.، بیات ورکشی، م.، سبزی پرور، ع.ا.، معروفی، ص. و قاسمی، ع. ۱۳۸۹. ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق مرجع و پهنه‌بندی آن در ایران. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی. ۴۲(۷۴). ۱۰۹-۹۵.

ذرتی پور، ا.، سلطانی محمدی، ا. و ذرتی پور، ا. ۱۳۹۸. پایش زمانی و مکانی روش‌های تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع (مطالعهٔ موردی: استان خوزستان) .اکو هیدرولوژی، ۶(۲). ۴۷۸-۴۶۵.

موسوی بایگی، م.، عرفانیان، م. و سرمد، م. ۱۳۸۸. استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع و ارائه ضرایب اصلاحی (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی). نشریه آب و خاک، ۲۳ (۱)، ۹۹-۹۱.

خوشحال، ج.، جوشنی، ع.ر. و زارع ابیانه، ح. ۱۳۹۴. ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع با روش تشت تبخیر FAO در حوضه آبریز شرق و جنوب شرق کشور. اندیشه جغرافیا. ۸(۱۵). ۷۰-۵۲.

Ahooghalandari, M., Khiadani,M. and Jahromi,M.E. 2017. Calibration of Valiantzas' reference evapotranspiration equations for the Pilbara region, Western Australia. Theoretical and applied climatology. 128(3): 845-856.

Binti Ahmad, N. F. A., Harun, S., Hamed, H.N.A., Askari, M., Ibrahim, Z., Hanapi, M.N. and Ali, M.H. 2019. INVESTIGATION ON THE VALIANTZAS'EVAPOTRANSPIRATION MODELS FOR PENINSULAR MALAYSIA. Journal of Urban & Environmental Engineering. 13(1). 174-182.

Djaman, K., Koudahe,K., Sall,M., Kabenge,I., Rudnick,D. and Irkmak,S. 2017. Performance of twelve mass transfer based reference evapotranspiration models under humid climate. Journal of Water Resource and Protection. 9(12): 1347

Irmak,S., Payero,J.O., Martin,D.L., Irmak,A. and Howell,T.A. 2006. Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 132(6): 564-578.

Gao, G., Chen,D., Ren,G., Chen,Y. and Liao,Y. 2006.

Valipour, M. 2015. Investigation of Valiantzas' evapotranspiration equation in Iran. Theoretical and applied climatology. 121(1), 267-278.

Valipour, M. 2017. Calibration of mass transfer-based models to predict reference crop evapotranspiration. Applied Water Science. 7(2): 625-635.

Spatial and temporal variations and controlling factors of potential evapotranspiration in China: 1956–2000. Journal of Geographical Sciences. 16(1): 3-12.

Lang, D., Zheng,J., Shi,J., Liao,F., Ma, X., Wang, W. and Zhang, M. 2017. A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman–Monteith method in southwestern China. Water. 9(10): 734.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 15, Aug.-Sep. 2021, p. 510-520

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۵، مرداد – شهریور ۱۴۰۰، ص. ۵۲۰-۵۱۰

Evaluation of 14 Methods of Estimation Reference Evapotranspiration (Case Study: Mazandaran Province)

Sh. tafi[1*], Kh. peyghan[2], M. bagheri khaneghahi[3], T. salehi pour bavarsad[4], A. soltani mohammadi[5]
Recived: Nov.24, 2020 Accepted: Mar.23, 2021

Abstract

In this study, experimental methods in three general categories based on temperature (Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle and Trajkovic), radiation (Jensen- Haise, Abtew and Irmak) and mass transfer (Trabert, WMO and Mahringer) and five different models of Valiantzas method (Val 1-5) by comparison with the FAO-Penman-Mantith (FAO-PM) method as reference method have evaluated. For this purpose, meteorological data of 10 synoptic stations of Mazandaran province in a 15-year period (2004-2018) were used. The results showed that between experimental methods based on temperature, Hargreaves-Samani method with R^2 between 0/980 to 0/997, in 60 % of stations (six stations), Trajkovic method with R^2 between 0/979 to 0/997, in 30 % of stations (three stations) and Blaney-Criddle method with R^2 between 0/984 to 0/994, in 10 % of stations (one station) perform the best performance. Among the experimental methods based on radiation, Jensen- Haise method with R^2 between 0/946 to 0/992, in 70 % of stations (seven stations) and Abtew method with R^2 between 0/812 to 0/930, in 30 % of stations (three stations) have the best performance. The results indicated under-estimate in estimation of the reference plant evapotranspiration by all three experimental methods based on mass transfer compared to the FAO-PM reference method. In all of the 10 stations investigated, the Trabert method with R^2 between 0/812 to 0/984, was more accurate than the WMO and Mahringer methods and was closer to the FAO-PM reference method. All 5 different models of the Valiantzas method have under-estimates compared to the FAO-PM reference method. Valiantzas 4 model in 60 % of stations (six stations), Valiantzas 5 and 2 models in 20 % of stations each one (two stations for each one) provided the best performance.

Keywords: Evaluation, Evapotranspiration, Mazandaran, Valiantzas

1-M.Sc. Department of Irrigation and Drainage, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran
3- Ph.D. Candidate, Water Engineering Department, Faculty of Soil and Water, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
4- M.Sc. student, Department of Irrigation and Drainage, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
5-Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
(*-Corresponding Author Email: shakoor73tafi@yahoo.com)