



Estimating effective rainfall using remote sensing and SEBAL energy balance algorithm and comparing it with experimental methods (case study: dry wheat cultivation plain of Khomein city).

Soheila Mohtashami¹, Zahra Aghashariatmadari²✉

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, E-mail: s.mohtashami@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, E-mail: zagha@ut.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 17, 2022

Revised: Nov. 14, 2022

Accepted: Nov. 28, 2022

Published online: Dec. 22, 2022

Considering the importance of water in the agricultural sector, it is necessary to know the usable or effective amount. Therefore, in this research, using remote sensing and implementing the Surface Energy Balance Algorithm (SEBAL) on 28 images from Landsat 8 for the crop years 2014 to 2022 in During the growth period of dry wheat in fields of Khomein city, the rate of evapotranspiration and effective rainfall were estimated. The accuracy of SEBAL has been evaluated with Penman-Monteith and pan evaporation methods, and then the results obtained with experimental methods of effective rainfall estimation have been compared and their relative error (RE) has been estimated. The results showed that the USDA method with a RE of 12.2% had the lowest error and the FAO with a RE of 60% had the highest error compared to the SEBAL.

Keywords:

Effective rainfall,
Evapotranspiration,
Landsat 8,
SEBAL.

Cite this article: Mohtashami, S. & Aghashariatmadari, Z., (2022) Estimating effective rainfall using remote sensing and SEBAL energy balance algorithm and comparing it with experimental methods (case study: dry wheat cultivation plain of Khomein city), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (10), 2429-2444. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.349839.669377>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.349839.669377>

Introduction

In order to make the best possible use of rainfall for the agricultural sector in rainfed lands, estimating the effective rainfall (ER) is vital. the ER is all spent on evapotranspiration and by accurately estimating the amount of evapotranspiration, the amount of ER can be achieved. Therefore, in this research, the amount of ER was estimated by estimating evapotranspiration using SEBAL in rainfed areas.

Materials and Methods

The study area of this research is the dry wheat cultivation plain located in Khomein city. the SEBAL was implemented on the available images from 2014 to 2022 crop years and evapotranspiration was estimated during the growth period in the desired crop years. Two methods of Penman and pan evaporation were used to verify the validity of SEBAL. In addition, a comparison was made between ER and experimental methods of estimating ER such as FAO, USDA, experimental and percentage, and the error of each experimental method was estimated.

Results and Discussion

Validation tests showed that the Penman method, with a lower RMSE, had a closer estimate compared to the pan evaporation method compared to the SEBAL. Among all the ER estimation methods, the SEBAL is The base method was chosen for comparison with other methods. Because, experimental methods have been developed based on the information collected for specific areas and also do not consider the distribution of ER in the spatial extent. The studies showed that the USDA with the RE of 12.20% has the lowest and the FAO with the RE of 60.07% has the highest error compared to the SEBAL.

Conclusion

The results of the comparisons showed that the experimental methods of estimating the ER are not universal and the generalization of these relationships in the field of agriculture to all regions are not error-free. be Therefore, these methods should be calibrated by taking into account factors affecting the amount of ER.

برآورد بارش مؤثر با بکارگیری سنجش از دور و الگوریتم توازن انرژی سبال و مقایسه آن با روش‌های تجربی (مطالعه موردی: دشت کشت گندم دیم شهرستان خمین)

سهیلا محتشمی^۱، زهرا آقاشریعتمداری^۲✉

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ایمیل: s.mohtashami@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ایمیل: zagha@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	مدیریت مؤثر و کارآمد منابع آب در مناطق کم برخوردار آبی، نیازمند شناخت دقیق جریان‌های هیدرولوژیکی است. آگاهی از میزان دقیق کل باران به عنوان یکی از اجزای جریان‌های هیدرولوژیکی و هم‌چنین میزان قابل استفاده یا مؤثر آن به منظور برنامه ریزی‌های دقیق‌تر در بخش کشاورزی ضروری است. در راستای این دیدگاه، در این پژوهش، باران مؤثر در اراضی تحت کشت گندم دیم شهرستان خمین با بکارگیری سنجش از دور و اجرای الگوریتم سبال برآورد شده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۷/۲۵	داده‌های هواشناسی مورد نیاز از سه ایستگاه از نزدیک‌ترین ایستگاه‌های سینوپتیک به منطقه مورد مطالعه شامل ایستگاه‌های سینوپتیک خمین، محلات و گلپایگان دریافت شده و به روش IDW برای منطقه مورد نظر درونیابی شدند. به منظور برآورد بارش مؤثر، تبخیر تعرق محصول گندم دیم با اجرای الگوریتم سبال بر روی ۲۸ تصویر موجود از لندست ۸ در طول دوره رشد گندم دیم برای سال‌های زراعی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ تا ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در منطقه مطالعاتی مورد نظر محاسبه می‌شود. دقت سبال با روش‌های پنمن مانیت و تشت تبخیر ارزیابی شده و سپس نتایج به دست آمده با روش‌های تجربی برآورد باران مؤثر (FAO، USDA، درصدی و تجربی) مقایسه و خطای نسبی آن‌ها برآورد شده است.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۸/۲۳	نتایج مقایسات نشان داد که روش USDA با میانگین خطای نسبی ۱۲/۲٪ کمترین خطا و روش FAO با میانگین خطای نسبی ۶۰٪ بیشترین خطا را نسبت به روش سبال داشتند. یافته‌های پژوهش نشان داد که روش‌های تجربی برآورد بارش مؤثر جهان شمول نمی‌باشند. بنابراین، بایستی این روش‌ها با در نظر گرفتن عواملی محیطی تاثیرگذار بر مقدار بارش مؤثر و نوع محصولات کالیبره شوند.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۷	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۰/۱	
واژه‌های کلیدی:	
الگوریتم بیلان انرژی،	
بارش مؤثر،	
تبخیر تعرق،	
لندست ۸.	

استناد: محتشمی، سهیلا، آقا شریعتمداری؛ زهرا، (۱۴۰۱) برآورد بارش مؤثر با بکارگیری سنجش از دور و الگوریتم توازن انرژی سبال و مقایسه آن با روش‌های تجربی (مطالعه موردی: دشت کشت گندم دیم شهرستان خمین). مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱۰)، ۲۴۲۳-۲۴۲۹.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.349839.669377>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.349839.669377>

مقدمه

بارش حیاتی‌ترین عنصر اقلیمی است، که تقریباً تمامی ابعاد حیات در کره زمین به آن وابسته است. پیامد بارش به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در کشاورزی و به‌ویژه کشاورزی دیم قابل توجه است (عزیزی، ۱۳۷۹). باتوجه به اهمیت آب در بخش کشاورزی، آگاهی از میزان دقیق کل باران و همچنین میزان قابل استفاده یا مؤثر آن به‌منظور برنامه‌ریزی‌های دقیق‌تر در بخش کشاورزی و طراحی پروژه‌های آبیاری، طراحی و کاربرد سامانه‌های زهکشی ضروری است (Adnan et al., 2008). برآورد بارش مؤثر در تصمیم‌گیری‌های زمان‌بندی آبیاری برای طراحی سامانه‌های آبیاری جدید مورد استفاده مهم است و یک عامل راهنما برای برنامه‌ریزی روش‌های تولید محصول است (Joel et al., 1992). برآورد دقیق بارندگی مؤثر نه تنها برای برنامه‌ریزی و مدیریت تولید محصولات دیم، بلکه برای استراتژی‌های مدیریت ریسک در مزارع نیز مورد نیاز است (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۲). از طرفی، تامین آب برای مصارف کشاورزی اراضی دیم به‌طور کامل به واسطه بارشی، که بر سطح زمین فرو می‌ریزد و برای گیاه قابل دسترس است، حاصل می‌گردد (هاشمی نسب خیصی و همکاران، ۱۳۹۲). بنابراین، به‌منظور استفاده هر چه بهتر از بارندگی برای بخش کشاورزی در اراضی دیم، برآورد باران مؤثر امری حیاتی است. روش‌های متعددی برای برآورد باران مؤثر وجود دارد، که عبارتند از: روش اندازه‌گیری مستقیم با استفاده از دستگاه لایسیمتر، روش‌های تجربی و روش مدل بیلان آب در خاک (سعیدی، ۱۳۹۷). به‌دلیل هزینه‌های زیاد اندازه‌گیری و نگهداری ادواتی چون لایسیمتر، معمولاً از روش‌های تجربی و بیلان آب برای برآورد بارش مؤثر استفاده می‌شود (خالقی، ۱۳۹۴). روش‌های مختلفی برای برآورد باران مؤثر وجود دارد، که از آن جمله می‌توان به روش‌های FAO، USDA، فرمول تجربی و درصدی اشاره نمود (مجرد و نصیری، ۱۳۸۵).

مطالعات Rahman et al (2008) در رابطه با بارش مؤثر در کشت آبی جنوب شرق بنگلادش نشان داد، روش رنفرو دقت مناسبی در برآورد بارش مؤثر ندارد و روش USBR نیز به‌دلیل عدم در نظر گرفتن توزیع و پراکنش بارش روش دقیقی نبوده و به‌دلیل ساده‌سازی‌های انجام شده روش قابل اعتمادی نیست. یافته‌های این پژوهش نشان داد که روش USDA به‌دلیل اینکه مقدار بارش، تبخیر تعلق ماهانه و عمق خاک را در نظر می‌گیرد به مراتب دقیق‌تر از دیگر روش‌های یادشده است. خوشحال دستجردی و همکاران (۱۳۹۱) به معرفی مناسب‌ترین شیوه محاسبه بارش مؤثر برای کشت گندم پاییزه در حوضه دریاچه نمک پرداختند. نتایج آن تحقیق نشان داد، که روش SCS به‌دلیل اینکه به داده‌های تبخیر و تعلق پتانسیل، ضریب گیاهی، بارش و عمق آبیاری وابسته است و همچنین فاقد محدودیت‌های مکانی است، مناسب‌ترین شیوه محاسبه بارش مؤثر در حوضه دریاچه نمک است. در پژوهشی که رحیمی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی روش‌های برآورد بارش مؤثر برای کشت محصول گندم دیم پرداختند، نتایج نشان داد، در مناطقی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، روش تجربی و در مناطق با اقلیم مرطوب و نیمه‌مرطوب به‌ترتیب روش‌های USDA و FAO نسبت به روش‌های تجربی دیگر مناسب‌تر هستند. پورغلام آمیجی و همکاران (۱۳۹۸) به پهنه‌بندی باران مؤثر در استان خوزستان تحت کشت گندم دیم پرداختند. در آن پژوهش مقادیر بارش مؤثر به روش‌های FAO، USDA، تجربی و حل معکوس برآورد شدند و نتایج نشان داد، که در ماه‌های کم‌بارش روش USDA بهترین روش برای برآورد باران مؤثر است. اسدزاده شرفه و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی مناسب‌ترین شیوه محاسبه بارش مؤثر در دشت اردبیل پرداختند. نتایج حاصل از تحلیل روش‌های مورد مطالعه در آن تحقیق نشان داد، که روش USDA مناسب‌ترین روش محاسبه بارش مؤثر در این دشت است. Han et al (2019) به محاسبه بارندگی مؤثر در دوره رشد ذرت بهاره پرداختند و عوامل تاثیرگذار بر بارش مؤثر از جمله، بارش، آبیاری و نیاز آبی محصول را بررسی کردند. نتایج آن پژوهش نشان داد، که با افزایش بارندگی، بارندگی مؤثر کاهش و با افزایش مقدار آبیاری، بارندگی مؤثر به‌تدریج کاهش و با افزایش نیاز آبی محصول، بارندگی مؤثر به‌تدریج افزایش می‌یابد.

تقریباً تمام آب جذب شده توسط گیاه به‌صورت تعلق از قسمت‌های مختلف گیاه خارج شده و مقدار بسیار کم آن صرف فعالیت‌های متابولیکی گیاه می‌شود. آب در گیاهان به‌طور عمده از درون روزنه‌ها خارج می‌شود. از کل آبی، که گیاه جذب می‌نماید، ۹۵ تا ۹۹ درصد آن به‌صورت تعلق از طریق گره‌ها (۰/۱ درصد)، کوتیکول (۳ تا ۱۰ درصد) و روزنه‌ها (حدود ۹۰ درصد) از گیاه خارج می‌شود و به‌صورت بخار آب وارد جو می‌شود (Allen, 1998). از طرفی، در مناطق دیم، باران مؤثر، همگی صرف تبخیر تعلق شده و با برآورد دقیق میزان تبخیر و تعلق می‌توان به میزان بارش مؤثر دست یافت (پورغلام آمیجی و همکاران، ۱۳۹۸).

به‌دلیل اینکه روش‌های تجربی برای یک سری مناطق با شرایط خاص استخراج شده‌اند، به نظر روش پیشنهادی بیلان انرژی از

1 Metabolic activity

2 Lenticel

3 Cutin

4 Stoma

نظر مفهومی کامل تر و جامع تر نسبت به سایر روش های تجربی برای برآورد بارش مؤثر است. از این رو، در این پژوهش با برآورد تبخیر تعرق واقعی با به کارگیری سنجش از دور و الگوریتم توازن انرژی سیال در مناطق دیم، میزان بارش مؤثر برآورد شد و نقشه پهنه بندی بارش مؤثر برای منطقه مطالعاتی ارائه گردید. پس از محاسبه بارش مؤثر با به کارگیری الگوریتم سیال، به منظور صحت سنجی آن، مقایسه ی میان برآورد میزان تبخیر تعرق به روش سیال با روش های پنمن مانیتیت و تشت تبخیر انجام شد. علاوه بر این، بارش مؤثر با استفاده از روابط تجربی برآورد آن، همچون روش های FAO، USDA، درصدی و تجربی برآورد و با میزان بارش مؤثر حاصل از سیال مقایسه و خطای روش های تجربی برآورد بارش مؤثر محاسبه شد.

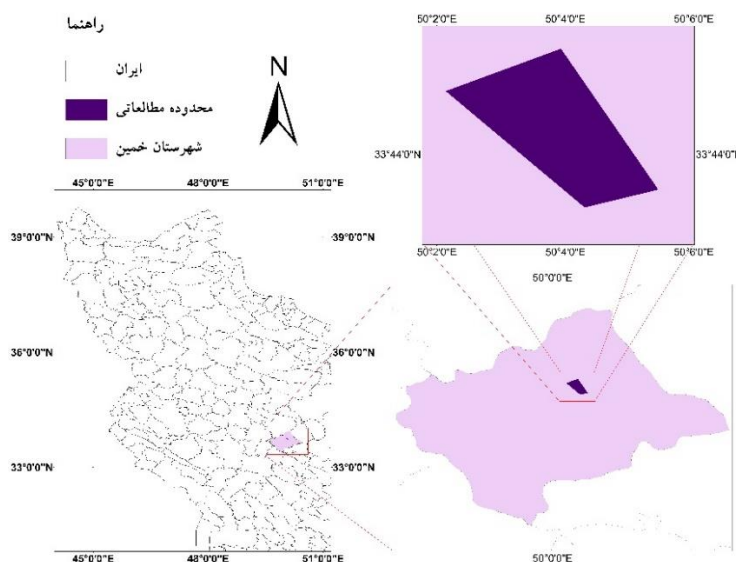
مواد و روش ها

منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی این پژوهش، دشت کشت گندم دیم واقع در شهرستان خمین است. شهرستان خمین یکی از شهرستان های توابع استان مرکزی است. متوسط بارندگی، میانگین سالانه دما و میانگین رطوبت نسبی سالانه در شهرستان خمین به ترتیب، ۲۹۶ میلی متر، ۱۳/۶ درجه سانتی گراد و ۵۱٪ است. اقلیم این شهرستان بر اساس روش طبقه بندی دوماترن، خشک و بر اساس روش آمبرژه، نیمه خشک و سرد است. برای برداشت مختصات دقیق زمین کشاورزی گندم دیم مختصات چهار نقطه از حاشیه زمین به وسیله دستگاه GPS قرائت شد. طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی این نقاط در مختصات DMS در جدول (۱) نمایش داده شده است. هم چنین، موقعیت جغرافیایی دشت در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. طول و عرض جغرافیایی قرائت شده از حاشیه زمین توسط دستگاه GPS در مختصات DMS

نقاط	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	۵۰° ۵' ۲۶/۷" E	۳۳° ۴۳' ۲۶/۷" N
۲	۵۰° ۴' ۱۷/۷" E	۳۳° ۴۳' ۱۰/۰۸" N
۳	۵۰° ۲' ۷/۶۸" E	۳۳° ۴۴' ۵۸/۳۸" N
۴	۵۰° ۳' ۵۵/۸" E	۳۳° ۴۵' ۳۸/۵۲" N



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی

جمع آوری داده ها

به منظور انجام پژوهش حاضر از داده های هواشناسی روزانه ۳ ایستگاه همسایر مجاور منطقه مطالعاتی، شامل ایستگاه های همدید محلات،

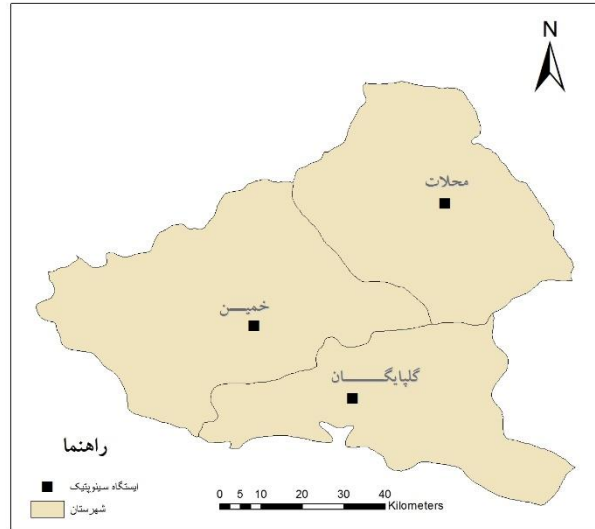
گلپایگان و خمین با طول دوره آماری ۸ سال (سال‌های زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ تا ۱۴۰۱-۱۴۰۰) در طول دوره رشد محصول گندم دیم پاییزه (اوایل مهر تا اوایل تیر) استفاده شد. به‌منظور درون‌یابی داده‌های هواشناختی منطقه مطالعاتی از روش IDW^۱ استفاده شد. شکل (۲) پراکنش ایستگاه‌های مذکور را نشان می‌دهد. سایر اطلاعات همچون شماره ردیف و مسیر قرارگیری منطقه در تصاویر لندست ۸ از سایت USGS^۲ دریافت شد. در سال‌های زراعی مورد نظر و در طول دوره رشد گندم دیم، ۲۸ تصویر لندست با پوشش ابر کمتر از ۳۵٪ موجود بود، که تاریخ‌های تصویربرداری در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱. تاریخ تصاویر موجود از منطقه مطالعاتی در سال‌های زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ تا ۱۴۰۱-۱۴۰۰ دوره رشد گندم دیم با پوشش ابر کمتر از ۳۵ درصد

ردیف	تاریخ میلادی (ماه/روز/سال)	تاریخ شمسی (روز/ماه/سال)	روز ژولینی
۱	۲۰۱۴/۰۵/۰۵	۱۳۹۳/۰۲/۱۵	۱۲۵
۲	۲۰۱۴/۰۶/۰۶	۱۳۹۳/۰۳/۱۶	۱۵۷
۳	۲۰۱۵/۲۲/۰۴	۱۳۹۴/۰۱/۱۵	۱۱۲
۴	۲۰۱۵/۰۸/۰۵	۱۳۹۴/۰۲/۱۸	۱۲۸
۵	۲۰۱۵/۲۴/۰۵	۱۳۹۴/۰۳/۰۳	۱۴۴
۶	۲۰۱۵/۰۹/۰۶	۱۳۹۴/۰۳/۱۶	۱۶۰
۷	۲۰۱۶/۲۴/۰۴	۱۳۹۵/۰۲/۰۵	۱۱۵
۸	۲۰۱۶/۱۳/۰۵	۱۳۹۵/۰۲/۲۴	۱۳۴
۹	۲۰۱۶/۲۹/۰۵	۱۳۹۵/۰۳/۰۹	۱۵۰
۱۰	۲۰۱۶/۱۱/۰۶	۱۳۹۵/۰۳/۲۲	۱۶۳
۱۱	۲۰۱۷/۲۷/۰۴	۱۳۹۶/۰۲/۰۷	۱۱۷
۱۲	۲۰۱۷/۱۳/۰۵	۱۳۹۶/۰۲/۲۳	۱۳۳
۱۳	۲۰۱۷/۲۹/۰۵	۱۳۹۶/۰۳/۰۸	۱۴۹
۱۴	۲۰۱۷/۱۴/۰۶	۱۳۹۶/۰۳/۲۴	۱۶۵
۱۵	۲۰۱۸/۱۶/۰۵	۱۳۹۷/۰۲/۲۶	۱۳۶
۱۶	۲۰۱۸/۱۷/۰۶	۱۳۹۷/۰۳/۲۷	۱۶۸
۱۷	۲۰۱۹/۰۳/۰۵	۱۳۹۸/۰۱/۱۶	۱۲۳
۱۸	۲۰۱۹/۱۹/۰۵	۱۳۹۸/۰۲/۱۵	۱۳۹
۱۹	۲۰۱۹/۰۴/۰۶	۱۳۹۸/۰۶/۱۷	۱۵۵
۲۰	۲۰۲۰/۲۱/۰۵	۱۳۹۸/۰۳/۰۱	۱۴۲
۲۱	۲۰۲۰/۰۶/۰۶	۱۳۹۹/۰۳/۱۷	۱۵۸
۲۲	۲۰۲۱/۲۲/۰۴	۱۴۰۰/۰۱/۱۵	۱۱۲
۲۳	۲۰۲۱/۰۸/۰۵	۱۴۰۰/۰۲/۱۸	۱۲۸
۲۴	۲۰۲۱/۲۴/۰۵	۱۴۰۰/۰۳/۰۳	۱۴۴
۲۵	۲۰۲۱/۰۹/۰۶	۱۴۰۰/۰۳/۱۹	۱۶۰
۲۶	۲۰۲۲/۱۱/۰۵	۱۴۰۱/۰۱/۲۲	۱۳۱
۲۷	۲۰۲۲/۲۷/۰۵	۱۴۰۱/۰۳/۰۶	۱۴۷
۲۸	۲۰۲۲/۱۲/۰۶	۱۴۰۱/۰۳/۲۲	۱۶۳

^۱ Inverse Distance Weighting

^۲ www.earthexplorer.usgs.gov



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های همدید مورد استفاده برای درون‌یابی داده‌های هواشناسی منطقه مطالعاتی

برآورد بارش مؤثر

برآورد بارش مؤثر با استفاده از روش‌های تجربی

روش‌های تجربی متعددی برای برآورد بارش مؤثر وجود دارد. برخی از این روش‌ها و روابط آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. روش‌ها و روابط تجربی برآورد بارش مؤثر مورد استفاده در این پژوهش

ردیف	نام روش	روابط
۱	روش درصدی	$ER = 0.8P$
۲	روش USDA	$ER = P (125 - (0.2 P)) / 125$ $ER = 125 + (0.1 P)$ ($P < 250$ mm) ($P > 250$ mm)
۳	روش FAO	$ER = (0.6 P) - 10$ mm ($P < 70$) $ER = (0.8 P) - 24$ ($P > 70$ mm)
۴	روش تجربی	$ER = (0.5 P) - 5$ $ER = (0.7 P) + 20$ ($P < 50$ mm) ($P > 50$ mm)

در روابط بالا، ER نشان دهنده بارش مؤثر ماهانه و P نشان دهنده بارش ماهانه است.

باتوجه به اینکه بسط روش‌های تجربی به تمامی نقاط جغرافیایی عاری از خطا نبوده و با تغییر شرایط جغرافیایی ممکن است، این روابط برای منطقه دیگر با شرایط متفاوت جغرافیایی دقت بالایی نداشته باشند، بنابراین در این مطالعه بارندگی مؤثر با استفاده از روش‌های ۱ تا ۴ در جدول (۲) محاسبه و با بارش مؤثر برآورد شده از روش الگوریتم توازن انرژی مقایسه شدند. در ادامه، نحوه محاسبه بارش مؤثر به روش توازن انرژی شرح داده شده است.

برآورد بارش مؤثر با به‌کارگیری الگوریتم توازن انرژی

همانطور که بیان شد، در مناطق دیم بارندگی مؤثر همگی صرف تبخیر تفرق شده و با محاسبه تبخیر تفرق واقعی می‌توان به میزان بارش مؤثر دست یافت (پورغلام آمیجی و همکاران، ۱۳۹۸). اندازه‌گیری مقدار واقعی تبخیر تفرق عملاً با محدودیت‌ها و پیچیدگی‌های خاصی روبرو است. تا کنون روش‌های متعددی برای محاسبه تبخیر تفرق واقعی معرفی شده است. به‌طور کلی برآورد تبخیر تفرق واقعی را می‌توان به سه روش کلی دسته‌بندی نمود: الف- روش مستقیم (استفاده از دستگاه لایسیمتر)، ب- روش‌های مبتنی بر تبخیر تفرق گیاه مرجع و ج- روش غیر مستقیم، که بر اساس معادلات بیلان انرژی است. ماهیت نقطه‌ای روش‌های اندازه‌گیری مستقیم تبخیر تفرق و دسترسی آسان و ارزان به داده‌های سنجش از دور، دقت بالای آن‌ها، جامع و گسترده بودن تصاویر و برخورداری از تنوع طیفی فراوان، از جمله ویژگی‌هایی است، که سبب برتری سنجش از دور، نسبت به دیگر روش‌های برآورد تبخیر تفرق شده است (قمرنیا و رضوانی، ۱۳۹۳). مدل‌های مختلفی برای تخمین تبخیر تفرق از ماهواره ارائه شده است (Allen et al., 2007; Su, 2002). از پرکاربردترین مدل‌های تخمین تبخیر تفرق از طریق تصاویر ماهواره‌ای، الگوریتم تعادل انرژی سطحی سیبال ۱ است (Rahimzadegan et al., 2019). در این پژوهش، برای برآورد

تبخیر تفرق واقعی در منطقه مطالعاتی از الگوریتم بیلان انرژی سبال استفاده شده است.

الگوریتم سبال

الگوریتم سبال یک الگوریتم مبتنی بر بیلان انرژی است که با به کارگیری این الگوریتم و معادلات بیلان انرژی می توان مقدار تبخیر تفرق را محاسبه نمود. این الگوریتم اولین بار توسط باسیتانسن و همکاران ارائه شده است (Bastiaanssen et al., 1998 a, b, c). در این روش تبخیر تفرق واقعی، یعنی، باقیمانده بیلان انرژی زمین، طبق رابطه (۱) محاسبه می شود (waters et al., 2002).

$$\lambda ET = R_n - H - G \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱)، λET نشانگر شار گرمای نهان ۱، R_n شار تابش خالص در سطح ۲، G شار گرمایی خاک ۳ و H شار گرمایی محسوس هوا ۴ است. تمامی مولفه ها در این رابطه بر حسب $\frac{W}{m^2}$ می باشند.

شار تابش خالص در سطح (R_n)، انرژی تابشی واقعی موجود در سطح را نشان می دهد و از اختلاف بین تابش ورودی و خروجی در همه ی طول موج ها، طبق رابطه (۲) محاسبه می شود (waters et al., 2002).

$$R_n = (\alpha - 1)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (\epsilon_0 - \epsilon_s) R_{L\downarrow} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه (۲)، α سفیدی سطحی ۵، $R_{S\downarrow}$ تابش موج کوتاه ورودی ۶ بر حسب $\frac{W}{m^2}$ ، $R_{L\downarrow}$ تابش موج بلند ورودی ۷ بر حسب $\frac{W}{m^2}$ ، $R_{L\uparrow}$ تابش موج بلند خروجی ۸ بر حسب $\frac{W}{m^2}$ و ϵ_0 گسیلمندی (تابش) گرمایی سطح ۹ (بدون بعد) است. $R_{S\downarrow}$ ، شار تابش خورشیدی مستقیم و پراکنده است، که به زمین می رسد و طبق رابطه (۳) محاسبه می شود.

$$R_{S\downarrow} = G_{sc} \cos(\theta) d_r^2 \tau_{ws} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳)، G_{sc} ثابت خورشیدی ($1367 \frac{W}{m^2}$)، θ زاویه تابش خورشیدی، d_r معکوس مربع فاصله نسبی زمین تا خورشید و τ_{ws} شفافیت جوی است (waters et al., 2002).

$R_{L\downarrow}$ تابش موج بلند ورودی، است (رابطه ۴). در این رابطه ϵ_α گسیلمندی جو، σ ثابت استفان بولتزمن (معادل $10^{-8} \times 5/67$ وات بر متر مربع بر توان چهارم کلوین) و T_α دمای هوای نزدیک سطح (کلوین) است.

$$R_{L\downarrow} = \epsilon_\alpha \times \sigma \times T_\alpha^4 \quad \text{رابطه (۴)}$$

$R_{L\uparrow}$ شار تابش موج بلند گسیل شده از سطح زمین به جو میباشد که طبق رابطه (۵) محاسبه می شود. در این رابطه، ϵ_α گسیلمندی سطحی عریض باند، σ ثابت استفان بولتزمن (معادل $10^{-8} \times 5/67$ وات بر متر مربع بر توان چهارم کلوین) و T_α دمای سطحی (بر حسب کلوین) است (waters et al., 2002).

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_\alpha \times \sigma \times T_\alpha^4 \quad \text{رابطه (۵)}$$

شار گرمای خاک، میزان انتقال گرما در خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت مولکولی است. در مدل سبال G را از نسبت $\frac{G}{R_n}$ ارائه شده توسط باسیتانسن و همکاران از رابطه (۶) تعیین می گردد (waters et al., 2002).

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} \times (0.0032 \times \alpha + 0.0062 \times \alpha^2) \times (1 - 0.978 \times NDVI^4) \quad \text{رابطه (۶)}$$

در رابطه (۶)، T_s دمای سطحی (بر حسب درجه سانتی گراد)، $NDVI$ شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی است، که با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می شود و α ضریب سفیدی سطحی است، که در آن ρ_R انعکاس در باند قرمز و ρ_{NIR} انعکاس در باند مادون قرمز نزدیک است. این شاخص، در حقیقت، نشان دهنده تراکم پوشش گیاهی است.

۱ Latent heat flux

۲ Net radiation flux

۳ Soil heat flux

۴ Sensible heat flux

۵ Surface albedo

۶ Incoming shortwave radiation

۷ Incoming long wave radiation

۸ Outgoing long wave radiation

۹ Surface thermal emissivity

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad \text{رابطه ۷}$$

در روش سیال برای برآورد شار گرمای محسوس، ابتدا دو پیکسل سرد و گرم شاخص انتخاب می‌شوند و مقدار شار گرمای محسوس طبق رابطه (۸) محاسبه می‌گردد. پیکسل سرد مربوط به منطقه‌ای کاملاً پوشیده از گیاه و آبیاری شده می‌باشد، که مقدار NDVI در آن بیشتر از ۰/۷ و دمای سطح زمین در این پیکسل نزدیک به دمای هوا و کمتر از دمای سطح زمین در پیکسل گرم است. (Jamshidi, 2020).

$$H = \frac{\rho_{air} \times C_{air} \times dT}{r_{ah}} \quad \text{رابطه ۸}$$

در رابطه (۸)، ρ_{air} چگالی هوا، C_{air} گرمای ویژه هوا، dT اختلاف دمای بین دو ارتفاع Z_1 و Z_2 (کلوین) و r_{ah} مقاومت آئرونامیکی برای انتقال گرما (برحسب ثانیه بر متر) می‌باشد.

پس از آنکه مقدار شار گرمای محسوس بر اساس شرایط جوی تصحیح گردید. مقدار شار گرمای نهان تبخیر برای هر پیکسل محاسبه می‌گردد و سپس با استفاده از رابطه (۹) تبخیر و تعرق لحظه‌ای (ET_{inst}) برآورد می‌گردد.

$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad \text{رابطه ۹}$$

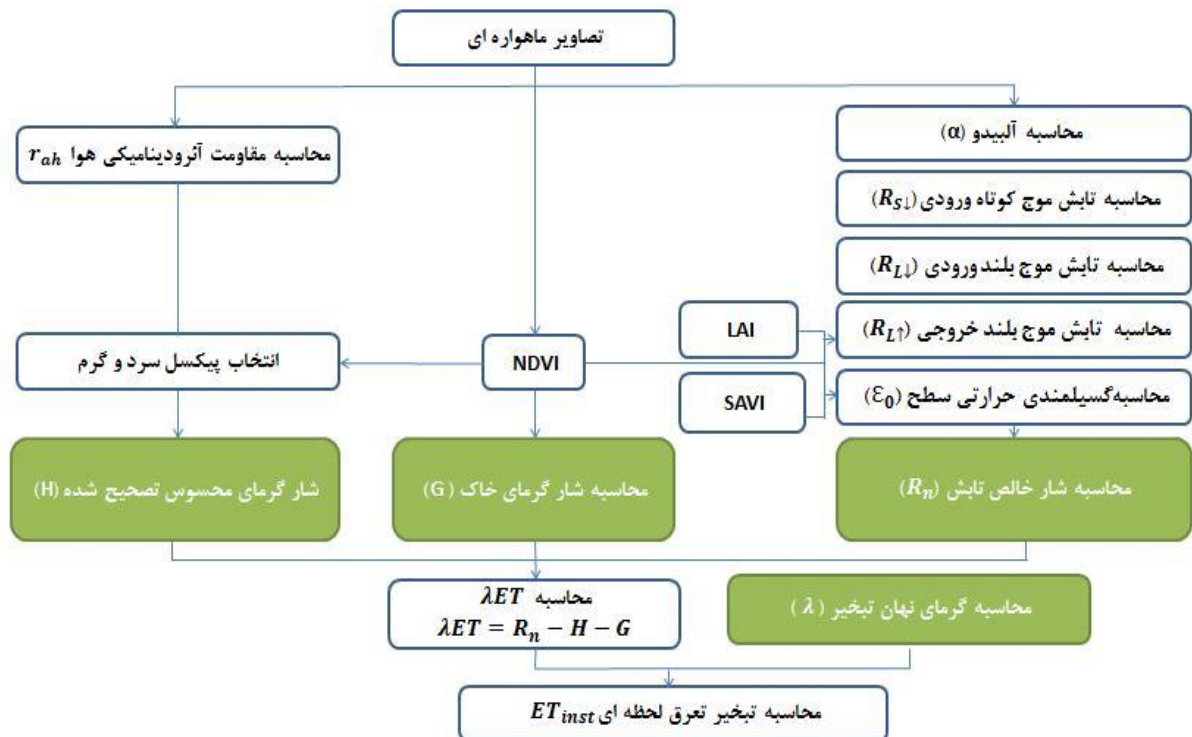
که در آن λ گرمای نهان تبخیر بوده که از رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد (Kirkham, 2014).

$$\lambda = (2.501 - 0.00236(T_s - 273)) \times 10^6 \quad \text{رابطه ۱۰}$$

پس از برآورد تبخیر تعرق لحظه‌ای، مقدار تبخیر تعرق روزانه از طریق رابطه ارائه شده توسط جکسون محاسبه شد (رابطه ۱۱) (Jakson and et al., 1983). که در آن N بازه زمانی بین طلوع و غروب خورشید و t زمان در روز (از طلوع خورشید) است.

$$\frac{ET_{daily}}{ET_{inst}} = \frac{2N}{\pi \sin(\frac{\pi t}{N})} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

فلوچارت الگوریتم سیال و مسیر محاسبات تبخیر تعرق لحظه‌ای در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳. فلوچارت الگوریتم سیال

صحت‌سنجی الگوریتم بیلان انرژی سیال در برآورد تبخیر تعرق روزانه

تحقیقات انجام گرفته در نقاط مختلف جهان نشان می‌دهد، که دقت مقادیر تبخیر و تعرق برآورد شده با رابطه پنمن ماتیتث فائو در

مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتر از دیگر روابط برآورد تبخیر تعرق مرجع بهتر و در شرایطی، که داده‌های لایسیمتری در دسترس نباشد، یک رابطه استاندارد توصیه شده است (kisi, 2007; امید، ۱۳۹۲). بنابراین، با توجه به عدم وجود داده‌های لایسیمتری در منطقه مطالعاتی، برای صحت سنجی تبخیر تعرق واقعی برآورد شده به روش سبال، از روش‌های محاسبه تبخیر تعرق مرجع همچون پنمن مانتیث فائو و روش تشت تبخیر استفاده شد و تبخیر تعرق محصول محاسبه شد (رابطه ۱۲). در رابطه (۱۲)، ET_c تبخیر تعرق گیاه، ET_0 تبخیر تعرق گیاه مرجع و K_c ضریب گیاهی است که مقدار آن از جداول ضرایب گیاهی ارائه شده توسط فائو برای محصول گندم استخراج شد (Allen, 1998).

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad \text{رابطه ۱۲}$$

روش تشت تبخیر

روش تشت تبخیر، یکی از روش‌های صحت سنجی برای مقایسه با تبخیر تعرق واقعی روزانه برآورد شده از سبال انتخاب شد. اگرچه تشت به روشی مشابه به عوامل اقلیمی یکسانی، که بر تعرق محصول تأثیر می‌گذارند، پاسخ می‌دهد اما عوامل متعددی تفاوت‌های قابل توجهی در از دست دادن آب از سطح آب و از سطح کشت شده را ایجاد می‌کنند. برای مثال، ذخیره گرما در ظرف ممکن است، سبب تبخیر قابل توجهی در طول شب نیز شود؛ در حالی که، بیشتر محصولات فقط در طول روز تعرق دارند. علاوه بر این، تفاوت‌هایی در تلاطم، دما و رطوبت هوای بالای سطوح مربوطه وجود دارد. علی‌رغم تفاوت بین تبخیر تشت و تبخیر و تعرق سطوح پوشیده شده از پوشش گیاهی، استفاده از تشتک‌ها برای پیش‌بینی تبخیر تعرق مرجع امکان‌پذیر است، به این صورت که، تبخیر تشت به تبخیر و تعرق مرجع توسط یک ضریب تشتک مشتق شده تجربی مرتبط است (Allen, 1998). برای برآورد ضریب تشت تبخیر (K_{pan}) روابط متعددی ارائه شده است، که در این پژوهش از رابطه اورنگ (رابطه ۱۴) استفاده شد (Orang, 1998). در این رابطه RH رطوبت نسبی روزانه، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (بر حسب متر بر ثانیه) و F فاصله پوشش گیاهی از تشت تبخیر بر حسب متر است. سپس، با اعمال ضریب تشت بر مقدار تبخیر روزانه از تشت طبق رابطه (۱۳) مقدار تبخیر تعرق گیاه مرجع محاسبه شد. در رابطه (۱۳)، ET_0 تبخیر تعرق مرجع، E تبخیر از تشت و K_{pan} ضریب تشت تبخیر است.

$$ET_0 = K_{pan} \times E \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$K_{pan} = 0.51206 - 0.000321 \times U_2 + 0.002889 \times RH + 0.031886 \times \ln(F) - 0.000107 \times \ln(F) \times RH \quad \text{رابطه ۱۴}$$

روش پنمن مانتیث

در سال ۱۹۴۸، پنمن تعادل انرژی را با روش انتقال جرم ترکیب کرد و معادله‌ای را برای محاسبه تبخیر از سطح آب آزاد بر مبنای داده‌های هواشناختی همچون ساعات آفتابی، دما، رطوبت و سرعت باد بدست آورد. این روش ترکیبی توسط بسیاری از محققین توسعه داده شد و طبق رابطه (۱۵) تعریف می‌شود (Allen, 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

که در آن ET_0 تبخیر تعرق گیاه مرجع بر حسب میلی‌متر بر روز، R_n تشعشع خالص از سطح محصول، G شار گرمایی خاک، T میانگین دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس، u_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری بر حسب متر بر ثانیه، e_s فشار بخار اشباع بر حسب کیلوپاسکال، e_a فشار بخار واقعی بر حسب کیلوپاسکال، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع و γ ضریب سایکرومتری است.

مقایسه بارش مؤثر حاصل از روش بیلان انرژی و روش‌های تجربی

مقدار تبخیر تعرق در گام زمانی بین هر دو تاریخ تصویربرداری، با فرض بر اینکه تبخیر تعرق روزانه به‌صورت میانگین بازه زمانی میان دو تصویر موجود است، با درون‌یابی به روش خط شکسته برای گام‌های زمانی مورد نیاز در هر سال زراعی محاسبه شد. سپس، مجموع مقادیر درون‌یابی شده برای دستیابی به مقدار تبخیر تعرق در دوره زمانی مورد نظر به‌دست آمد. با توجه به این‌که، تمام نیاز آبی محصولات دیم توسط بارش تامین می‌شود، تبخیر تعرق واقعی محاسبه شده از روش سبال معادل بارشی است، که برای رشد و نمو محصول مؤثر واقع شده است. بنابراین، در مرحله بعد، به مقایسه بارش مؤثر برآورد شده از سبال و روش‌های تجربی برآورد بارش مؤثر پرداخته شد.

پارامترهای ارزیابی

جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)

خطای جذر میانگین مربعات تفاوت میان مقدار پیش بینی شده توسط مدل آماری و مقدار واقعی است. RMSE از رابطه (۱۶) به دست می‌آید. در رابطه (۱۶)، مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل آماری، O_i مقدار واقعی و n تعداد مقادیر مشاهده شده یا پیش‌بینی شده است. از این معیار خطا برای ارزیابی صحت‌سنجی‌ها استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

درصد خطای نسبی (RE)

خطای مطلق، به صورت تفاوت بین مقادیر صحیح و تقریبی تعریف می‌شود. خطای نسبی، به صورت نسبت خطای مطلق و مقدار تقریبی تعریف می‌شود. با ضرب این نسبت‌ها در ۱۰۰ می‌توان آن‌ها را به صورت درصد خطای نسبی بیان کرد. به منظور مقایسه روش‌های تجربی برآورد بارش مؤثر (FAO، USDA، تجربی و درصدی) با روش سیبال از رابطه درصد خطای نسبی، رابطه (۱۷) استفاده شد.

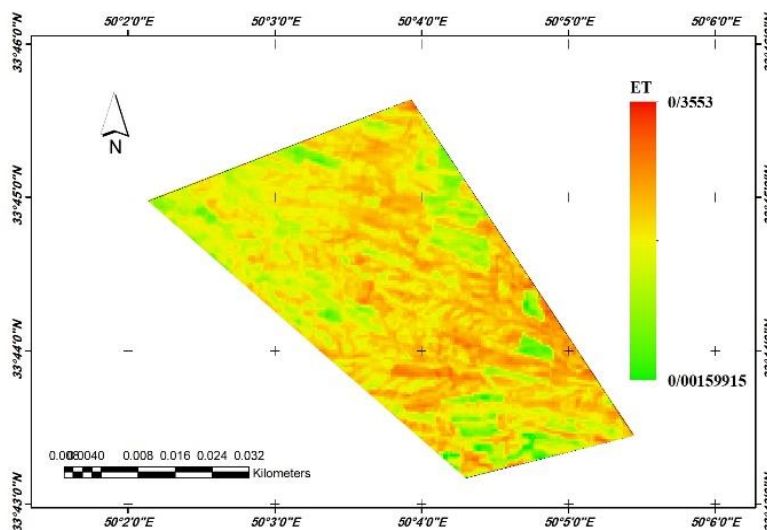
$$RE = \left| \frac{P_s - P_m}{P_m} \right| \times 100 \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

در رابطه (۱۷)، RE خطای نسبی، P_m باران مؤثر واقعی برآورد شده به روش سیبال و P_s باران مؤثر برآورد شده با روش‌های مختلف تجربی است.

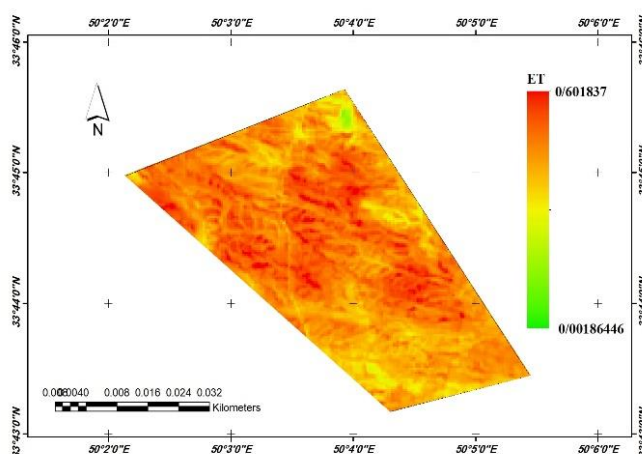
نتایج و بحث

نتایج تبخیر تعرق سیبال

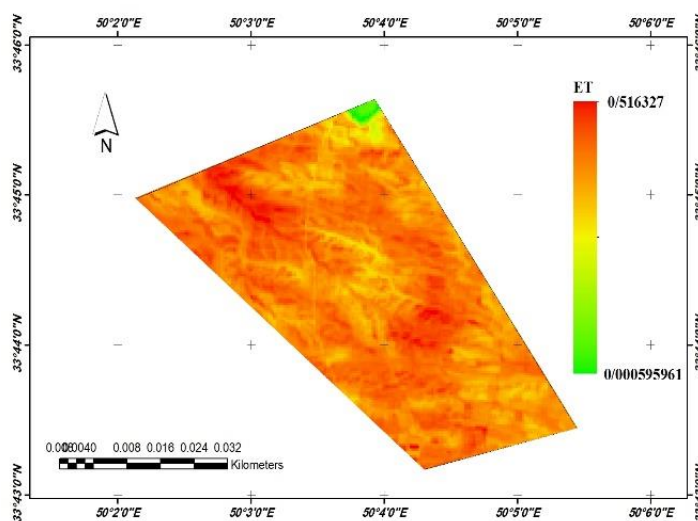
پس از اجرای الگوریتم سیبال بر روی تصاویر موجود در سال‌های زراعی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ تا ۱۴۰۱-۱۴۰۰ مقدار تبخیر تعرق روزانه برای تاریخ‌های موردنظر (جدول ۱)، محاسبه شد. بیشترین مقدار تبخیر تعرق لحظه‌ای به دست آمده از سیبال به ترتیب مربوط به تاریخ‌های ۲۰۱۶/۱۱/۰۶ و ۲۰۱۷/۱۴/۰۶ میلادی است (شکل ۵ و ۶). هم‌چنین کمترین میزان تبخیر تعرق لحظه‌ای برآورد شده از سیبال مربوط به تاریخ ۲۰۱۷/۲۷/۰۴ میلادی است (شکل ۴). شکل (۶)، (۷) و (۸) نیز پهنه‌بندی تبخیر تعرق را به ترتیب در تاریخ‌های ۲۰۲۰/۰۶/۰۶، ۲۰۲۱/۰۹/۰۶ و ۲۰۲۲/۱۲/۰۶ میلادی نشان می‌دهد.



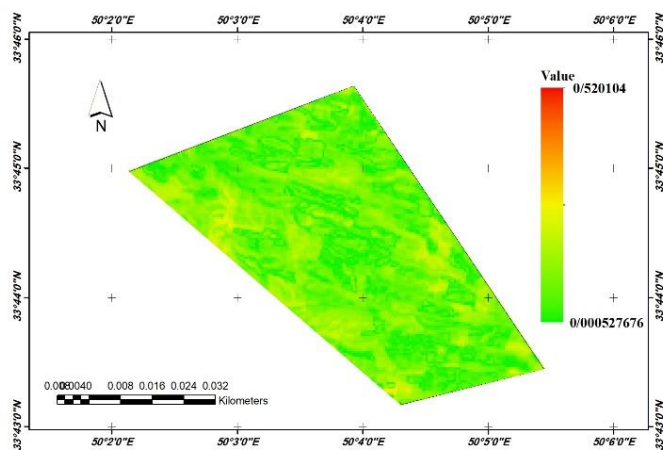
شکل ۴. پهنه‌بندی تبخیر تعرق در تاریخ ۲۰۱۷/۲۷/۰۴ میلادی (۱۳۹۶/۰۲/۰۷ شمسی)



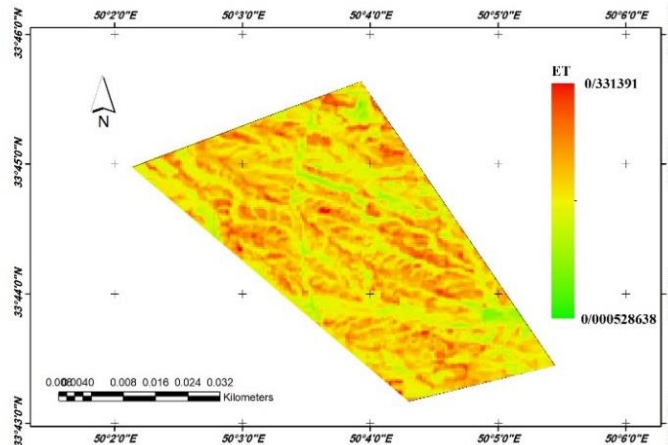
شکل ۵. پهنه‌بندی تبخیر تعرق در تاریخ ۲۰۱۶/۱۱/۰۶ میلادی (۱۳۹۵/۰۳/۲۲ شمسی)



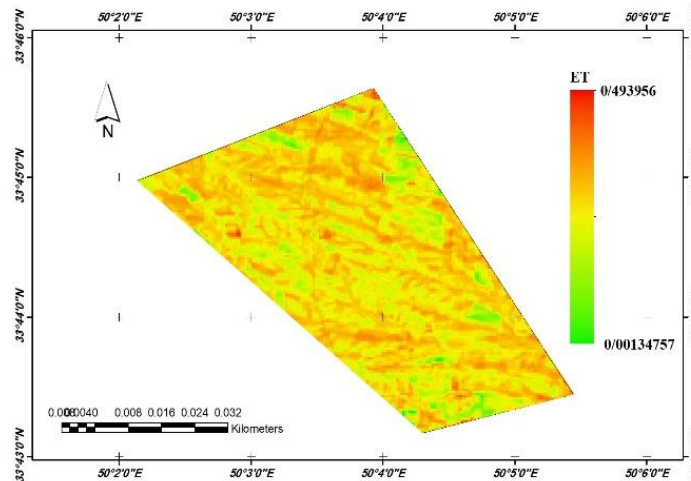
شکل ۶. پهنه‌بندی تبخیر تعرق در تاریخ ۲۰۱۷/۱۴/۰۶ میلادی (۱۳۹۶/۰۳/۲۴ شمسی)



شکل ۷. پهنه‌بندی تبخیر تعرق در تاریخ ۲۰۲۰/۰۶/۰۶ میلادی (۱۳۹۹/۰۳/۱۷ شمسی)



شکل ۸. پهنه‌بندی تبخیر تعرق در تاریخ ۲۰۲۱/۰۹/۰۶ میلادی (۱۴۰۰/۰۳/۱۹ شمسی)



شکل ۹. پهنه‌بندی تبخیر تعرق در تاریخ ۲۰۲۲/۱۲/۰۶ میلادی (۱۴۰۱/۰۳/۲۲ شمسی)

نتایج صحت‌سنجی

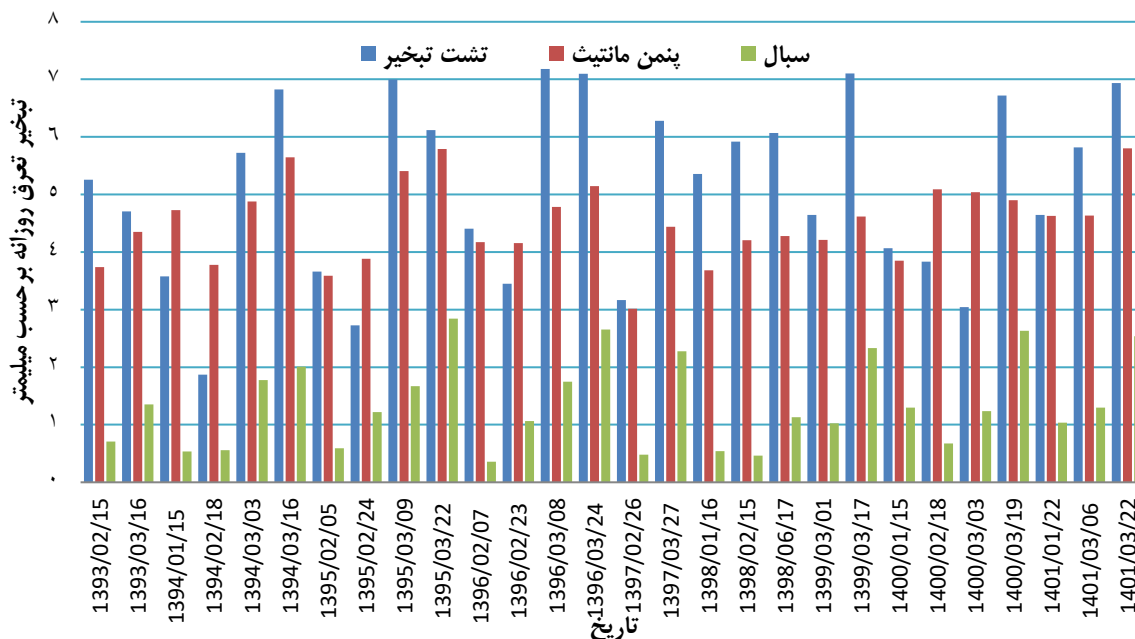
نتایج تبخیر تعرق روزانه حاصل از سبال با نتایج تبخیر تعرق روزانه حاصل از روش‌های پنمن مانیتیت و تشت تبخیر برای صحت‌سنجی سبال، با معیار ارزیابی خطای مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) مقایسه شد (جدول ۳). طبق جدول (۳)، روش پنمن مانیتیت با مجذور میانگین مربعات خطای کمتر، برآورد نزدیکتری به روش سبال داشته است. نمودار میله‌ای مقادیر تبخیر تعرق روزانه برآورد شده با هر یک از روش‌ها، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی تاریخ‌ها الگوریتم سبال مقادیر کمتری از تبخیر تعرق روزانه را نسبت به روش‌های تشت تبخیر و پنمن مانیتیت ارائه داده است. با توجه به اینکه محصول مورد نظر گندم دیم بوده و ممکن است محصولات دیم در طی دوره رشد خود با انواع تنش‌ها و به‌خصوص تنش آبی روبرو باشند و از آنجا که، روابط تشت تبخیر و پنمن مانیتیت تنش‌های وارده بر گیاه را در نظر نمی‌گیرد؛ بنابراین اختلاف میان تبخیر تعرق برآورد شده از رابطه پنمن مانیتیت را می‌توان وجود تنش‌هایی دانست، که به محصولات دیم وارد می‌شود.

شکل (۱۱) روند تغییرات تبخیر تعرق روزانه حاصل از الگوریتم سبال و دمای متوسط روزانه را در تاریخ‌های موجود نشان می‌دهد. تابش خورشیدی جذب شده توسط جو و گرمای ساطع شده از زمین باعث افزایش دمای هوا می‌شود و گرمای محسوس هوای اطراف، انرژی را به محصول منتقل می‌کند. در هوای آفتابی و گرم از دست دادن آب، در اشباع و تبخیر و تشت تبخیر از هم‌انرژی خاک، است (FAO 56). مطابق تحلیل‌هایی که در فائو در رابطه با تاثیر متغیر دما بر میزان تبخیر و تعرق محسوب می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود

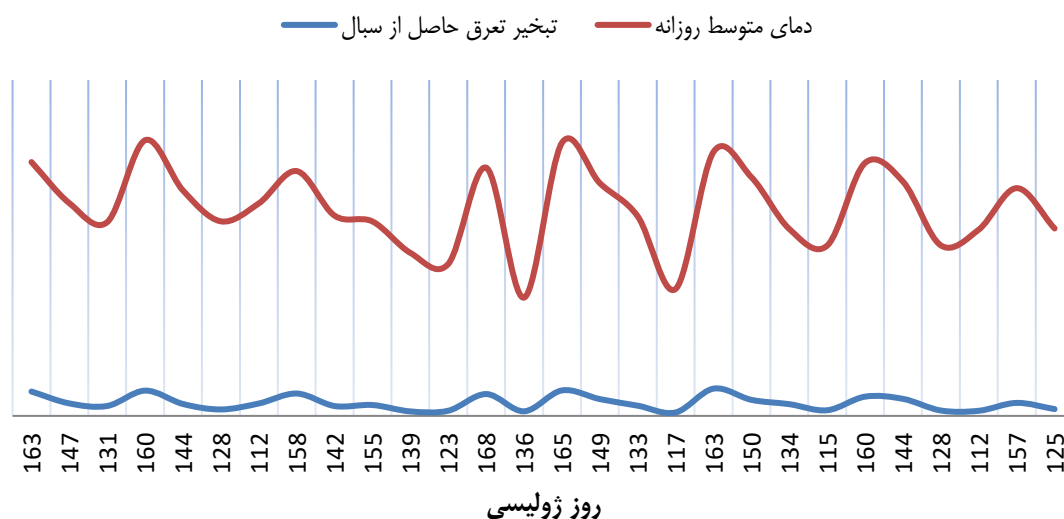
یکدیگر است.

جدول ۳. نتایج صحت سنجی تبخیر تعرق حاصل از سبال

روش	RMSE (میلیمتر)
پنمن مانیتث فائو	۳/۲۰
تشت تبخیر	۳/۹۹



شکل ۱۰. نمودار میله‌ای تبخیر تعرق برآورد شده به روش‌های سبال، پنمن مانیتث و تشت تبخیر



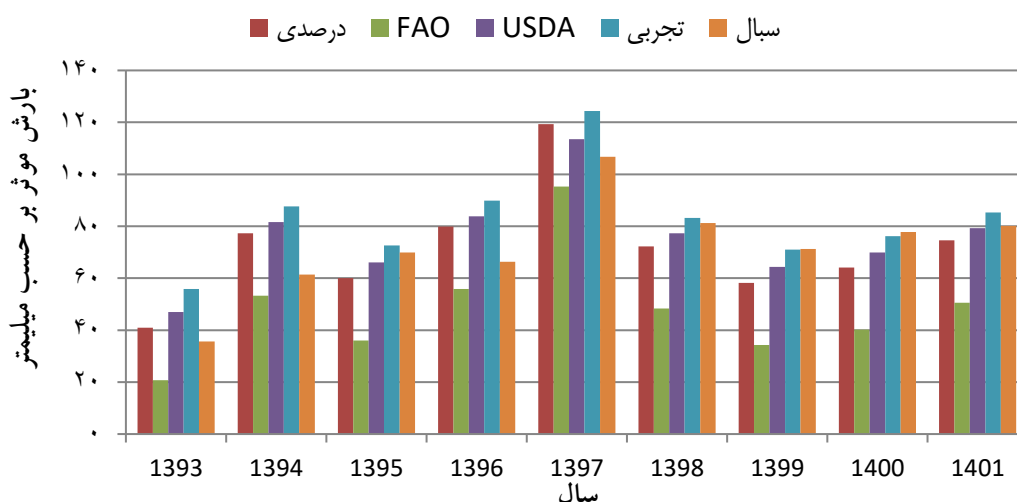
شکل ۱۱. نمودار روند تغییرات تبخیر تعرق حاصل از سبال و دمای متوسط روزانه

همانطور که، در بخش‌های قبل بیان شد، به دلیل اینکه تمام نیاز آبی محصولات دیم توسط بارش تامین شده، تبخیر تعرق واقعی محاسبه شده همان بارشی است، که برای رشد و نمو محصول مؤثر واقع شده و در واقع همان بارش مؤثر است. بنابراین، در مرحله بعد، به مقایسه بارش مؤثر برآورد شده از روش تبخیر تعرق حاصل از سبال و روش‌های تجربی برآورد بارش مؤثر پرداخته شد.

نتایج مقایسه سبال با روابط تجربی برآورد بارش مؤثر

پس از درون‌یابی بارش مؤثر روزانه حاصل از سبال میان هر دو تصویر موجود در سال‌های زراعی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ تا ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و محاسبه

بارش مؤثر در طول دوره رشد محصول، مقادیر حاصل با مقادیر حاصل از روش‌های تجربی برآورد بارش مؤثر با معیار میانگین خطای نسبی (RE) مقایسه شد. از میان تمامی روش‌های برآورد بارش مؤثر، روش بیلان انرژی سیال، روش مینا در مقایسه با سایر روش‌ها در نظر گرفته شد. زیرا، روش‌های تجربی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده برای مناطق خاص توسعه داده شده‌اند و هم‌چنین توزیع بارش مؤثر را در نظر نمی‌گیرند اما، روش پیشنهادی بیلان انرژی به صورت مستقیم بارش مؤثر را محاسبه کرده و پهنه‌بندی بارش مؤثر را در گستره منطقه مطالعاتی در اختیار قرار می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از میانگین خطای نسبی بارش مؤثر برآورد شده با روش‌های تجربی و روش الگوریتم سیال (جدول ۴)، کمترین خطا مربوط به روش USDA و بیشترین آن مربوط به روش FAO است. شکل (۱۲) نمودار میله‌ای برآورد بارش مؤثر هریک از روش‌های مذکور را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۱۲) مشخص است، بیشترین میزان بارش مؤثر برآورد شده در تمامی روش‌های برآورد آن در سال ۱۳۹۷ و کمترین میزان بارش مؤثر برآورد شده در تمامی روش‌ها در سال ۱۳۹۳ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل (۱۲) و جدول (۴)، روش USDA دقت بیشتری نسبت به روش‌های تجربی دیگر برآورد بارش مؤثر در منطقه مطالعاتی دارد. هرچند نتایج خطای نسبی‌ها نشان می‌دهد که برای برآورد بارش مؤثر، روش‌های تجربی مورد مطالعه در این پژوهش، عاری از خطا نبوده و این روابط برای هر منطقه با شرایط اقلیمی و آب و هوایی خاص ارائه شده و برای همان مناطق صحت و کاربرد دارند.



شکل ۱۲. نمودار میله‌ای بارش مؤثر به روش‌های تجربی و سیال در سال‌های مورد مطالعه

جدول ۴. میانگین درصد خطای نسبی روش سیال با روش‌های تجربی برآورد بارش مؤثر در سال‌های ۱۴۰۱-۱۳۹۳

درصدی	تجربی	FAO	USDA
۱۵/۶۳	۱۳/۴۵	۶۰/۰۷	۱۲/۲۰

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر، به منظور برآورد بارش مؤثر با به کارگیری سنجش از دور و اجرای الگوریتم سیال بر روی تصاویر ماهواره‌ای و هم‌چنین مقایسه آن با روش‌های تجربی برآورد بارش مؤثر انجام گرفت. به منظور استفاده بهینه آب در بخش کشاورزی و پروژه‌های زهکشی، شناخت و برآورد بارش مؤثر ضروری است. روش‌های تجربی متعددی برای برآورد بارش مؤثر ارائه شده‌اند اما با توجه به اینکه ممکن است، روش‌های تجربی، خطای قابل توجهی برای برآورد بارش مؤثر داشته باشند، در این پژوهش بارش مؤثر از روش بیلان انرژی برآورد گردید و با روش‌های تجربی آن مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهند، که روش USDA با میانگین خطای نسبی ۱۲/۲۰٪، کمترین و روش FAO با میانگین خطای نسبی ۶۰/۰۷٪ بیشترین خطای را نسبت به روش الگوریتم توازن انرژی سیال دارند. پژوهش‌های رحمان و همکاران (۲۰۰۸) و اسدزاده شرفه و همکاران (۱۳۹۴) نتایج مشابهی با پژوهش حاضر در بررسی دقت روش‌های تجربی برآورد بارش مؤثر داشتند. بر اساس یافته‌های پژوهش‌های مذکور نیز روش USDA روشی دقیق‌تر نسبت به سایر روش‌های تجربی موجود برای محاسبه بارش مؤثر شناخته شد. نتایج مقایسه‌ها نشان می‌دهد، که روش‌های تجربی برآورد بارش مؤثر جهان شمول نمی‌باشند و تعمیم این روابط در حوزه کشاورزی به تمامی مناطق با ویژگی‌های اقلیمی، بافت خاک و هم‌چنین تمامی محصولات عاری از خطا نیست. بنابراین، بایستی این روش‌ها با در نظر گرفتن عواملی تاثیرگذار بر مقدار بارش مؤثر، از جمله شرایط محیطی، شرایط خاک و هم‌چنین بر اساس نوع محصولات

واسنجی شوند. با توجه به یافته‌ها و روش‌های مورد استفاده در این پژوهش و مطالعات مشابه پیشین در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود، که این پژوهش در مناطق دیم‌خیزی، که دستگاه لایسیمتر در اطراف منطقه وجود دارد انجام گردد، که صحت‌سنجی تبخیر تعلق واقعی برآورد شده از الگوریتم سبال از دقت بالاتری برخوردار باشد. همچنین، مدل‌های دیگر بیلان انرژی موجود در سنجش از دور برای برآورد تبخیر تعلق واقعی همچون SEBS، SSEB، METRIC، S-SEBI و TSEB نیز در مناطق دیم خیز مورد استفاده و کاربرد آن‌ها در برآورد بارش مؤثر مورد بررسی و مقایسه قرار گیرند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- اسدزاده شرفه، ح.، رؤف، م. و محمودی‌فردگرمی، ز. (۱۳۹۴). برآورد مناسب‌ترین شیوه محاسبه بارش مؤثر در دشت اردبیل. دومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط‌زیست، اردبیل.
- امیدی، ر. و رادمنش، ف. (۱۳۹۲). برآورد تبخیر و تعلق مرجع با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. چهارمین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب. ۶ الی ۸ اسفند ماه.
- پورغلام آمیجی، م.، هوشمند، م. رجا، ا. و لیاقت، م. (۱۳۹۸). پهنه بندی باران مؤثر در استان خوزستان تحت کشت گندم دیم پاییزه. مدیریت آب و آبیاری، ۲۱۱-۲۳۰.
- خالقی، ن. (۱۳۹۴). مقایسه روش‌های برآورد بارش مؤثر در کشاورزی. نشریه آب و توسعه پایدار، ۲ (۵)، ۵۱-۵۸.
- خوشحال دستجردی، ج. و جوشنی، ع. ر. (۱۳۹۱). برآورد مناسب‌ترین شیوه محاسبه بارش مؤثر برای کشت گندم پاییزه در حوزه دریاچه نمک. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۳ (۹-۱۰)، ۱۵۳-۱۶۹.
- رحیمی، ج.، بذرافشان، ج. و خلیلی، ع. (۱۳۹۲). مطالعه تطبیقی روش‌های برآورد بارش مؤثر در زراعت گندم دیم در اقلیم‌های مختلف ایران. نشریه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۵ (۳)، ۳۱-۴۶.
- سعیدی، ر.، رضایی اعتدالی، ه.، ستوده نیا، ع.، کاویانی، ع. و نظری، ب. (۱۳۹۷). تعیین روابط بین عملکرد و تبخیر تعلق ذرت علوفه‌ای، در شرایط تنش شوری و محدودیت نیتروژن. نشریه پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب)، ۳۲ (۳)، ۳۵۱-۳۶۶.
- عزیزی، ق. (۱۳۷۹). برآورد بارش مؤثر در رابطه با کشت گندم دیم. پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۲ (۳۹)، ۱۱۵-۱۲۳.
- قمر نیا، ه. و جوادی بایگی، م. (۱۳۸۶). محاسبه و پهنه بندی تبخیر-تعلق با استفاده از الگوریتم سبال (SEBAL) در غرب ایران (دشت میان دربند). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۸ (۱)، ۷۲-۸۱.
- مجرد، ف. و نصیری، ش. (۱۳۸۵). برآورد دوره‌های بازگشت و فواصل اطمینان بارش مؤثر برای کشت برنج در جلگه مازندران. مدرس علوم انسانی، ۱۰ (۴۵)، ۱۵۹-۱۸۲.
- هاشمی نسب خبیسی، ف.، موسوی بایگی، س.، بختیاری، ب. و بنایان اول، م. (۱۳۹۳). اثر بارش بر عملکرد گندم دیم و شاخص رضایتمندی نیاز آبی در مقیاس زمانی مختلف. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران، ۵ (۱۷)، ۱-۱۳.

REFERENCES

- Adnan, Sh. & Hayat Khan, A. (2008). Effective rainfall for irrigated agriculture plains of Pakistan. Pakistan. Journal of Meteorology, 6, 61-72.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—model. J. Irrig. Drain. Eng, 133, 380.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guideline for Computing Crop Water Requirements. Fao Irrigation and Drainage, FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome: Rome, Italy. Paper 56.
- Asadzade shorfe, H., Raof, M., Mahmoodifard garimi, Z. (2015). The best method of calculation in Ardabil plain. The second national conference on protection of natural resources and environment, Ardabil. (In Persian)
- Azizi, Gh. (2000). Estimation of effective rainfall in relation to dry wheat cultivation (Case: Khorram Abad). Journal of Geographical Research Quarterly, 32(39), 115-123. (In Persian)
- Bastiaanssen, W., Menenti, M., Feddes, R., Holtslag, A., (1998a). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Formulation. JHyd, 212, 198-212.
- Bastiaanssen, W., Plegruma, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerinka, G.J., van der Wal, T., (1998b). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Validation. JHyd 212, 213-229.



- Bastiaanssen, W.G., Menenti, M., Feddes, R., Holtslag, A., (1998c). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Formulation. *JHyd*, 212, 198–212.
- Ghamarnia, H. & Rezvani, S.V. (2014). Calculation and Zoning of Evapotranspiration using SEBAL method In the West of Iran (Miandarband Plain). *Journal of Water and Soil*, 28 (1), 72-81. (In Persian)
- Han, N., Lou, G., Wang, Y., Zhou, Q., Jin, G., Li, S., Ye, L. (2019). Calculation of Effective Rainfall in the Spring Maize Growing Period. *HAL science*, .143-151.
- Hasheminasab Khabisi, F., Mousavi baygi, M., Bakhtiari, B., Bannayan, M. (2014). The Effects of Rainfall on Dryland Wheat Yield and Water Requirement Satisfaction Index at Different Time Scale. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 5(17), 1-13. (In Persian)
- Jakson, R. D., Hatfield, J, L., Reginato, S, B., Pinter, Jr. (1983). Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements. *Agriculture water management*, 7, 351-362.
- Jamshidi, S., Zand-Parsa, S & Niyogi, D. (2020). Assessing Crop Water Stress Index of Citrus Using In-Situ Measurements, Landsat, and Sentinel-2 Data. *International Journal of Remote Sensing*, 42(5), 1893-1916.
- Joel E. Cahoon, C. Dean Yonts, Steven R. Melvin. (1992). Estimating Effective Rainfall. *NebGuide*. G92-1099.
- Khaleghi, N. (2016). Comparison of effective rainfall estimation methods in agriculture. *Journal of Water and Sustainable Development*, 2(5), 51-58. (In Persian)
- Khoshal Dastjerdi, J. & Joshani, A, R. (2012). Estimating the most appropriate method of calculating effective rainfall for autumn wheat cultivation in the Namak lake area. *Journal of Geographical studies of dry areas*, 3(9-10), 153-169. (In Persian)
- Kirkham, M. B. (2014). *Principles of Soil and Plant Water Relations*. Academic Press, Kansas State University, 387–392 pages.
- Kişi Ö, Öztürk Ö. (2007). Adaptive neurofuzzy computing technique for evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 368-379
- Mojarad, F. & Nasiri, Sh. (2006). Estimates of return periods and confidence intervals of effective rainfall for rice cultivation in Mazandaran Province. *Journal of Human Sciences*, 10(45), 159-182. (In Persian)
- Omidi, R. & Radmanesh, F. (2013). Estimation of reference evaporation and transpiration using artificial neural network. The 4th National Conference on Management of Irrigation and Drainage Networks. Chamran University, Ahvaz, Faculty of Water Science Engineering, Ahvaz, Iran (In Persian)
- Orang, M. (1998). Potential accuracy of the popular non-linear regression equations for estimating pan coefficient values in the original and FAO-24 tables. Unpublished California Department of Water Resources Report, Sacramento, Calif.
- Pourgholam, M., Hooshmand, M., Raja, O., Liaghat, A. (2019). Effective Rain Zoning In Khuzestan Province under Autumn Rainfed Wheat Cultivation. *Journal of Water and Irrigation Management*. 9 (2), 211-230. (In Persian)
- Rahimi, J., Bazrafshan, J., Khalili, A. (2013). A Comparative Study on Empirical Methods for Estimating Effective Rainfall for Rainfed Wheat Crop in Different Climates of Iran. *Physical Geography Research*, 45 (3), 31-46. (In Persian)
- Rahimzadegan, M., Janani, A. (2019). Estimating evapotranspiration of pistachio crop based on SEBAL algorithm using Landsat 8 satellite imagery. *Agricultural Water Management*, 217: 383-390.
- Rahman M. M. Islam M.O. and Hasanuzzaman M. (2008). Study of effective rainfall for irrigated agriculture in South-Eastern part of Bangladesh. *World Journal of Agricultural Science*, 4 (4), 453-457.
- Saeidi, R., Ramezani Etedali, H., Sotodehniya, A., Kaviani, A., Nazari, B. (2018). Determination of the Relationships between Yield and Evapotranspiration of Maize under Salinity Stress and Nitrogen Deficiency Conditions. *Journal of Water Research in Agriculture*, 32 (3), 351-366. (In Persian)
- Jamshidi, S., Zand-Parsa, Sh. & Dev Niyogi (2021) Assessing Crop Water Stress Index of Citrus Using In-Situ Measurements, Landsat, and Sentinel-2 Data, *International Journal of Remote Sensing*, 42 (5), 1893-1916.
- Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *HESSD*, 3 (6), 85–100.
- Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., Bastiaanssen, W. (2002). *Surface Energy Balance Algorithms for Land. Idaho Implementation. Advanced Training and Users Manual*. Idaho Department of Water Resources.