

Validation and Calibration of FAO's WaPOR Product (Actual Evapotranspiration) in Iran Using In-Situ Measurements

M. Rahimpour^{1*}, N. Karimi², R. Rouzbahan²
and M. Eftekhari²

Abstract

Estimation of actual evapotranspiration (ET_a) at the scales of basin and field is one of the essential information for water resources allocation. Although estimating actual evapotranspiration encounters spatial, temporal and cost restrictions, but data from satellite images can usually overcome these limitations in various extents. In this regard, the objectives of the present study were; a) evaluation and validation of WaPOR ET_a product using Scintillometer instrument and, b) estimation of ET_a over several land use regions in Zayanderoud basin. Based on the obtained results, MAE, RMSE, MAPE and R were equal to 2.14 mm for 10 days, 2.55 mm for 10 days, 5.50 and 0.97, respectively, which represented the appropriateness of WaPOR ET_a data compared to Scintillometer. Also, the analysis of WaPOR product in different land-use showed that the maximum amount of actual ET_a in 2016 has occurred in dual crops (513 mm), orchards (387 mm), spring crops (272 mm), autumnal crops (271 mm), dry farming (112 mm) and rangelands (83 mm). Also the results in rice fields showed that 992 mm of fresh water was lost in the form of ET_a which is considered a dramatic value due to the climate and water resources of the selected basin and its relevance challenges.

Keywords: Actual Evapotranspiration, FAO's WaPOR Product, Scintillometer, Zayandehrood Basin.

Received: August 29, 2015

Accepted: January 22, 2018

اعتبارسنجی و تصحیح محصول تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده از محصول WaPOR فائو در ایران با استفاده از داده‌های زمینی

مرتضی رحیم‌پور^{۱*}، نعمت‌الله کریمی^۲، رضا روزبهانی^۲
و مرتضی افتخاری^۲

چکیده

برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) در مقیاس حوضه و مزرعه، یکی از اطلاعات ضروری جهت برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب می‌باشد. اگرچه برآورد ET_a با محدودیت‌های مکانی، زمانی و هزینه‌ای روبرو است، اما با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌توان تا حدی بر محدودیت‌های موجود فائق گردید. در این راستا، هدف از تحقیق حاضر نیز الف) ابتدا ارزیابی و اعتبارسنجی یکی از جدیدترین محصولات تبخیر-تعرق واقعی، محصول WaPOR با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه Scintillometer و سپس ب) برآورد و تحلیل تغییرات مقدار ET_a در کاربری‌های مختلف حوضه آبریز زاینده‌رود می‌باشد. بر اساس نتایج، مقدار آماره‌های MAE، RMSE، MAPE و R به ترتیب برابر با ۲/۱۴ (میلی‌متر در مدت ۱۰ روز)، ۲/۵۵ (میلی‌متر در مدت ۱۰ روز)، ۵/۵۰ و ۰/۹۷ می‌باشد که نتایج حاکی از صحت و دقت مناسب تبخیر-تعرق واقعی، محصول WaPOR فائو در مقایسه با داده‌های دستگاه Scintillometer است. همچنین، نتایج بررسی مقدار این متغیر در کاربری‌های مختلف نشان داد که بیشترین میزان ET_a در سال ۲۰۱۶ به ترتیب مربوط به کشت‌های دوگانه، اراضی باغی، کشت‌های بهاره، کشت‌های پاییزه، دیم و مراتع می‌باشد که به ترتیب دارای مقادیری در حدود ۵۱۳، ۳۸۷، ۲۷۲، ۲۷۱، ۱۱۲ و ۸۳ میلی‌متر هستند. همچنین، ارزیابی مصرف آب در شالیزارها نیز نشان داد، ۹۹۲ میلی‌متر آب به‌صورت ET_a از دسترس خارج می‌گردد که با توجه به شرایط منابع آبی حاکم در این حوضه آبریز، مقدار بالایی است و نیاز به برنامه‌ریزی دقیق‌تری جهت حذف یا کاهش سطح زیر کشت این محصول می‌باشد.

کلمات کلیدی: تبخیر-تعرق واقعی، محصول WaPOR فائو، دستگاه Scintillometer، حوضه آبریز زاینده‌رود.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۶/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۲

1- Research Assistant, Ministry of Energy, Water Research Institute, Tehran, Iran. Email: Rahimpour@modares.ac.ir

2- Assistant Professor, Ministry of Energy, Water Research Institute, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- کارشناس پژوهشی، موسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو، تهران، ایران.

۲- استادیار، موسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

کرد (Liaquat and Choi, 2017). از دیگر کاربردهای این متغیر مهم، پایش وضعیت خشکسالی است (Lorenz et al., 2017; Yang et al., 2017) زیرا با تحلیل‌های بلند مدت مقدار تبخیر-تعرق واقعی در کاربری‌های مختلفی همانند دیم، مراتع و حتی اراضی کشاورزی، می‌توان شدت و دامنه خشکسالی در سطوح مختلف را برآورد نمود (Colmer and Barton, 2017).

این درحالی است که برآورد تبخیر و تعرق واقعی در سطح وسیع با محدودیت‌های مکانی، زمانی و هزینه‌ای بسیار زیادی روبرو است (Jeyaseelan, 2003). در دهه‌های اخیر، با توسعه امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری پردازش تصاویر ماهواره‌ای و همچنین سهولت دسترسی به تصاویر چند طیفی و فراطیفی، استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور جهت برآورد تبخیر-تعرق واقعی توانسته تا حدی بر محدودیت‌های یاد شده فائق گردد (Allen et al., 2005). از مزیت‌های استفاده این روش‌ها می‌توان به مواردی نظیر پوشش زمانی و مکانی تصاویر ماهواره‌ای و همچنین زمان و هزینه بسیار پایین‌تر آن‌ها دربرآورد تبخیر-تعرق واقعی اشاره نمود. تحقیق‌های زیادی در این راستا انجام گردیده و روش‌های سنجش‌از دوری مختلفی نیز توسعه داده شده است که از جمله پرکاربردترین آن‌ها می‌توان به الگوریتم‌هایی همانند: SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998)، SEBS (Su, 2002)، METRIC (Allen et al., 2007)، ETLOOK (Bastiaanssen et al., 2012) و SSEBop (Olivera-Guerra et al., 2013) اشاره کرد. در ایران نیز از این الگوریتم‌ها جهت برآورد تبخیر-تعرق واقعی و در زمینه‌های گوناگونی نظیر برآورد میزان برداشت خالص آب زیرزمینی (Bagheri, 2013)، تحلیل اجزا بیلان آب (Rahimpour, 2015) و معادله بیلان انرژی (Khojeh; et al., 2016)، برآورد تبخیر از سطح آب (Sima and Tajrish, 2015) و تخمین ضرایب گیاهی (Ghamarnia et al., 2016) استفاده شده است.

اما اجرا و استفاده از مدل‌های مبتنی بر سنجش‌از دور مذکور در جهت برآورد تبخیر-تعرق واقعی همواره با محدودیت‌های مختلفی همراه است. مهم‌ترین عامل محدودکننده در این راستا واسنجی، اعتبارسنجی و حتی اجرای این مدل‌ها به دلیل کمبود داده‌های مشاهداتی است. از سوی دیگر نتایج هر کدام از این مدل‌ها خود به مهارت کاربر، روش مورد استفاده و نحوه اجرا وابسته است. به‌طور مثال نتایج تبخیر-تعرق حاصل از الگوریتمی همانند SEBAL بسته به مهارت کاربر در انتخاب پیکسل سرد و گرم از کاربری به کاربر دیگر با شرایط و تصویر یکسان متفاوت است (Papadavid et al., 2013). همچنین می‌توان با توجه به اطلاعات مشاهداتی روش‌های متفاوتی را انتخاب نمود که این

تبخیر-تعرق واقعی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های مؤثر در چرخه هیدرولوژی، نقش قابل ملاحظه‌ای در اقلیم منطقه‌ای و جهانی دارد. به‌طوری که حدود ۶۲ درصد از نزولات جوی در سطح خشکی‌های کره زمین و ۱۰۰ درصد بارش سطح اقیانوس‌ها و دریاها از طریق تبخیر و تعرق از دسترس خارج و به چرخه هیدرولوژی باز می‌گردند (Rodell et al., 2015). با توجه به اینکه سهم زیادی از آب‌های سطحی و زیرزمینی به صورت تبخیر-تعرق واقعی از سطوح کشاورزی، از دسترس خارج می‌گردد لذا برآورد و برنامه‌ریزی بر روی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Rodell et al., 2015). این نکته از آن جهت حائز اهمیت است که در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران، ۹۲ درصد از کل آب‌های قابل دسترس در بخش کشاورزی و به صورت تبخیر-تعرق مصرف می‌گردد (FAO, 2008). نتایج تحقیق‌های انجام شده در راستای مدیریت تقاضا در بخش کشاورزی نشان می‌دهد، راهکارهایی نظیر اجرای برنامه‌های صرفه‌جویی آب در مزرعه (Qureshi et al., 2011)، بهبود زیرساخت‌ها (Grafton et al., 2011)، اندازه‌گیری‌های زراعی و زیست‌محیطی (Evans and Sadler, 2008) همیشه آنگونه که مورد انتظار بوده، به ذخیره آب منجر نشده است. تحقیقات نشان می‌دهد حتی کشورهای نظیر ایالات متحده و استرالیا که اکثر این ابزارها را در اختیار دارند، اگر مقررات و برنامه‌ریزی‌های مدونی جهت محدود کردن مصرف واقعی نداشته باشند، با کمبود منابع آب مواجه می‌شوند (Chong and Sunding, 2006; Qureshi et al., 2011). با توجه به اینکه تبخیر-تعرق واقعی از سطوح مختلف نشان دهنده مصرف واقعی آب در هر کاربری است (Wu et al., 2014)، در نتیجه می‌توان با برآورد این متغیر مصرف واقعی آب (منابع مجاز و غیرمجاز) در حوضه آبریز را در کاربری‌های مختلف محاسبه و بیلان منابع و مصارف را برآورد نمود. در نهایت می‌توان از این متغیر کلیدی (تبخیر-تعرق واقعی) به عنوان اصلی‌ترین جزء مصرف منابع آب در جهت کاهش مصرف و افزایش سودآوری، برنامه‌ریزی‌های منابع آب را بر اساس واقعیت‌های حوضه‌های آبریز تبیین و اجرا نمود (Allen et al., 2005).

علاوه بر این می‌توان از متغیر تبخیر-تعرق واقعی در زمینه‌های مختلف به‌صورت غیرمستقیم و به‌صورت کاملاً کاربردی استفاده نمود به‌طور مثال با توجه به اینکه این پارامتر رابطه مستقیمی با میزان زیست توده^۱ و عملکرد^۲ در گیاهان مختلف دارد، از آن جهت تخمین برآورد میزان محصول استفاده نمود (Coe et al., 1976; Senay et al., 2007; Wagle et al., 2017). همچنین می‌توان میزان تنش گیاهی را با استفاده از داده‌های تبخیر-تعرق واقعی در گستره‌های وسیع پایش

موضوع حتی در الگوریتم‌های با رویکرد یکسان نیز همانند بیلان انرژی صادق است زیرا می‌توان با توجه به اطلاعات موجود، از روش‌های بیلان انرژی دو منبعی و تک منبعی، در راستای برآورد تبخیر-تعرق واقعی استفاده نمود که قطعاً دارای عملکردهای متفاوتی هستند (French et al., 2015).

اما، می‌توان با استفاده از اطلاعات مربوط به محصولاتی که به صورت آماده در اختیار کاربران قرار می‌گیرد بر بسیاری از این محدودیت‌ها فائق گردید. اخیراً، محصولات تبخیر-تعرق واقعی مختلفی نیز ارائه گردیده است که یکی از پرکاربردترین و جدیدترین آن‌ها محصول WaPOR فائو است که از آن در زمینه‌های مختلفی تاکنون استفاده شده است. هم‌اکنون از این محصول در مطالعات مختلفی استفاده می‌گردد، به‌نظر می‌رسد که تاکنون هیچ‌گونه ارزیابی و تحقیقی در خصوص میزان دقت و صحت آن بخصوص در داخل کشور انجام نشده است. لذا، در تحقیق حاضر برای اولین بار این محصول با استفاده از مقادیر تبخیر-تعرق واقعی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه Scintillometer، صحت‌سنجی می‌گردد. علاوه بر این مقدار تبخیر-تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف در مقیاس حوضه آبریز نیز مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. بنابراین اهداف اصلی تحقیق حاضر را می‌توان به شرح زیر عنوان نمود: الف) ارزیابی نتایج محصول تبخیر-تعرق واقعی WaPOR فائو با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی (Scintillometer) ب) واسنجی و تصحیح محصول WaPOR فائو در صورت عملکرد مناسب ج) تحلیل تبخیر-تعرق واقعی کاربری‌های مختلف در سطح حوضه‌های آبریز.

۱-۱- منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

با توجه به تنوع بالای کشت و همچنین اقلیم متنوع حوضه آبریز زاینده رود، این حوضه به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید. ۹۲ درصد این حوضه، در استان اصفهان و ۸ درصد از جنوب غربی آن در استان چهارمحال و بختیاری قرار دارد (شکل ۱). مساحت این حوضه در حدود ۲۷۳۵۰ کیلومتر مربع است و به لحاظ موقعیت جغرافیایی در طول جغرافیایی $24^{\circ} 24' 1''$ تا $29^{\circ} 50'$ شرقی و عرض جغرافیایی $48^{\circ} 44' 1''$ تا $49^{\circ} 41' 8''$ شمالی قرار دارد. ارتفاع متوسط منطقه ۱۹۹۳ متر از سطح دریا و همچنین حداکثر و حداقل ارتفاع نیز به ترتیب حدود ۳۹۶۰ متر در ارتفاعات کوه داراب شاه و ۱۴۴۲ متر در محل باتلاق گاوخونی قرار دارد. رودخانه اصلی حوضه، رودخانه زاینده‌رود است که از تلاقی با رودخانه‌های اسکندری و سپس با رودخانه شور، به سمت شهر اصفهان و باتلاق گاوخونی امتداد می‌یابد. به دلیل تنوع بالای آب و هوایی (شامل اقلیم‌های بسیار خشک

استان اصفهان تا معتدل کوهستانی استان چهارمحال و بختیاری) و همچنین وجود منابع آب سطحی و زیرزمینی در این حوضه، انواع کاربری‌های با تنوع بالا در آن قابل مشاهده است. کاربری‌های کشاورزی در این حوضه بسیار زیاد بوده و شامل گندم، جو، سیفی جات، باغات، یونجه، و حتی برنج است. تنوع کشت، کمبود منابع آب‌های سطحی و زیر سطحی و حساسیت‌های موجود به دلیل تقاطع مرز حوضه آبریز و مرزهای سیاسی دو استان اصفهان و چهارمحال و بختیاری، از دیگر دلایل است که این حوضه به عنوان منطقه مطالعاتی در تحقیق حاضر انتخاب گردیده است.

۱-۲- داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده

۱-۲-۱- محصول WaPOR^۲ فائو

میزان تبخیر-تعرق واقعی در محصول WaPOR فائو از طریق الگوریتم ETLook اندازه‌گیری می‌گردد که معادلات و نحوه محاسبات میزان تبخیر-تعرق واقعی در این الگوریتم در تحقیق توسط Bastiaanssen et al. (2012) به تفصیل بیان گردیده است. اما، در توضیح کلی در جهت معرفی این الگوریتم می‌توان این گونه توضیح داد که مدل ETLook، بر پایه معادله Penman-Monteith بنا گردیده که کاربرد عمومی این معادله برآورد میزان کل تبخیر-تعرق پتانسیل (شامل دو جز تبخیر و تعرق) با استفاده از داده‌های هواشناسی معمول (مثل: تابش خورشیدی، دمای هوا، مقدار بخار و سرعت باد) است. از این معادله به عنوان معادله استاندارد FAO-56 برای محاسبه تبخیر-تعرق واقعی از گیاه مرجع نیز یاد می‌گردد (Allen et al., 1998). اما در الگوریتم ETLook، با اندکی تغییر از این معادله و ترکیبی از اطلاعات سنجش از دوری (شامل: NDVI، آلبدو سطحی، رطوبت خاک، تابش خورشیدی، پوشش سطح زمین و مدل ارتفاعی رقومی) و داده‌های هواشناسی (شامل: دما، رطوبت، سرعت باد و بارش) جهت برآورد تبخیر-تعرق واقعی استفاده می‌گردد که نتایج این محصولات به‌صورت رایگان بر بستر سایت FAO در دسترس عموم قرار دارند (<http://www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity/>). این محصول با قدرت تفکیک زمانی ۱۰ روزه و سالانه در طول دوره ۸ سال (از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶) در دسترس عموم می‌باشد. قدرت تفکیک مکانی این محصول ۲۵۰ متر بوده و گستره وسیعی از جهان را پوشش می‌دهد که شامل بخشی از قاره آسیا (ایران، عربستان) و کل قاره آفریقا است. در تحقیق حاضر در مجموع از ۳۶ تصویر از مقادیر مجموع ۱۰ روز تبخیر-تعرق واقعی این محصول مربوط به سال ۲۰۱۶ برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی حوضه آبریز زاینده‌رود اسفاده گردیده است.

۱-۲-۲- داده‌های مشاهداتی دستگاه Scintillometer

تئوری Scintillometry از دهه ۱۹۷۰ میلادی مطرح گردید (Wang et al., 1978) و ابتدا از این روش جهت برآورد شماری از کمیت‌های لایه سطحی جو استفاده می‌گردید. اما با گذشت زمان و تولید سری‌های مختلف دستگاه Scintillometer کاربردهای آن نیز تغییر یافت به‌طور مثال از این روش می‌توان متغیرهای ساختار شاخص بازتابندگی اتمسفر (Ochs and Wang, 1978)، سرعت باد عمود بامسیره^۵ (Ochs and Wang, 1978)، آشفتگی اتمسفر در مقیاس داخلی^۶ (Hill and Ochs, 1978; Hartogensis et al., 2002) و شار گرمای محسوس (Wesely, 1976; Kohsiek et al., 2002; Meijninger et al., 2006) را اندازه‌گیری نمود. از بین این متغیرها، اندازه‌گیری متغیر شار گرمای محسوس به دلیل پیچیدگی‌های خاص محاسباتی و همچنین نقش ویژه آن در اندازه‌گیری تبخیر-تعرق واقعی، دارای اهمیت بیشتری است. با استفاده از این دستگاه مسافتی که می‌توان این متغیر را با دقت بالا اندازه‌گیری نمود بسیار حائز اهمیت است چراکه دستگاه‌های دیگر همچون EC^۲ یا Bowen ratio می‌توانند این متغیر و حتی متغیر تبخیر-تعرق واقعی را اندازه‌گیری نمایند اما محدودیت اساسی این دستگاه‌ها اندازه‌گیری نقطه‌ای است. این درحالی است که دستگاه Scintillometer قادر است این متغیر را در طولی در حدود ۱۰۰ الی ۵۰۰۰ متر، با دقت مناسب برآورد کند (Hemakumara et al., 2003).

از این دستگاه می‌توان جهت اعتبارسنجی محصولات و الگوریتم‌های سنجش از دور (خصوصاً مدل‌های مبتنی بر بیلان انرژی) نیز استفاده کرد. در این راستا، می‌توان به نتایج تحقیق Hemakumara et al. (2003) اشاره کرد، در این تحقیق با توجه به نتایج مناسب این دستگاه نسبت به دستگاه EC (انحراف روزانه: ۱۷٪ و انحراف ماهانه: ۱٪)، استفاده از دستگاه Scintillometer به‌عنوان فرایندی کم‌هزینه برای جایگزین نمودن سایر روش‌های اندازه‌گیری تبخیر-تعرق واقعی توصیه گردید. در تحقیق حاضر نیز از نتایج تبخیر-تعرق واقعی اندازه‌گیری شده توسط این دستگاه جهت ارزیابی و اعتبارسنجی استفاده می‌گردد که نمای از استقرار آن در مزرعه تحقیقاتی، در شکل ۱-۱ قابل مشاهده است.

دستگاه Scintillometer شامل یک فرستنده نوری با تابش امواج الکترومغناطیسی تا طول موج ۱ میکرومتر (برای دستگاه مورد استفاده در تحقیق حاضر، این طول موج ۸۸۰ نانومتر است) و یک گیرنده می‌باشد. نحوه کار این دستگاه به این صورت است که در آن، پس از

دریافت امواج گسیل شده از فرستنده توسط گیرنده؛ شدت نوسانات، در واحد پردازش‌دهنده مرکزی (SPU) تحلیل می‌گردد با آنالیز شدت نوسانات بر روی امواج ساطع شده در اثر آشفتگی‌های موجود، می‌توان میزان انرژی که باعث آشفتگی و تغییرات جریانات هوا (شارگرمای محسوس) می‌شوند، را محاسبه نمود.

پس از محاسبه شار گرمای محسوس توسط این دستگاه و اندازه‌گیری شار تابش خالص، شارگرمای خاک و سایر پارامترهای مؤثر در اندازه‌گیری تبخیر-تعرق (شامل سرعت باد، دما، رطوبت و سایر پارامتر هوشناسی دیگر) با استفاده از سنجنده‌های که در ایستگاه هوشناسی همراه این دستگاه در محل اندازه‌گیری نصب می‌گردند، میزان تبخیر-تعرق واقعی اندازه‌گیری می‌شود.

با توجه به اهداف پروژه و استفاده حداکثری از مزایای این دستگاه، جانمایی آن دارای شرایط خاص می‌باشد که برای نصب آن باید اعمال گردد شرایطی که در انتخاب و نصب دستگاه لحاظ می‌گردید به شرح ذیل است: ۱- معرف کل حوضه؛ تا حد امکان این نقطه نماینده شرایط آب‌وهوا، ارتفاعی و کشاورزی کل حوضه آبریز باشد. ۲- نوع محصول: سطحی که از آن تبخیر-تعرق واقعی برداشت می‌گردد ترجیحاً از گیاه مشخص پوشانده شده باشد (به صورت ایده‌آل گیاه مرجع). ۳- مقیاس مکانی: حداقل وسعت سطح زیر کشت هنگام اندازه‌گیری تبخیر و تعرق باید از نصف اندازه پیکسل بزرگ‌ترین مقیاس تصویر، بیشتر باشد.

۱-۲-۳- انتخاب و شناسایی کاربری‌های مختلف طی بازبدهای میدانی

باتوجه به اینکه تحلیل میزان تبخیر-تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف یکی از اهداف تحقیق حاضر است، لذا باید مکان‌های دقیق هر یک از کاربری‌های غالب منطقه شناسایی و تعیین می‌گردید. در این راستا، طی بازدید میدانی از این دو استان (در استان اصفهان طی شش روز توسط سه گروه و همچنین در بازدید جداگانه از استان چهارمحال و بختیاری طی پنج روز توسط یک گروه به‌صورت تمام وقت)، نقاط مربوط به هفت کاربری و دو نوع کشت به‌عنوان کاربری‌ها و کشت‌های غالب شناسایی و موقعیت‌سنجی گردید در این بازدیدها مجموعاً ۱۳۵۹ محدوده به‌عنوان نمونه در نه کلاس تهیه گردید تعداد محدوده‌های برداشت شده به تفکیک کلاس‌های طبقه‌بندی در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین، موقعیت مکانی نقاط مشاهداتی تعیین شده از این نه کلاس در سطح حوضه آبریز زاینده‌رود، در شکل ۱-الف قابل مشاهده است.

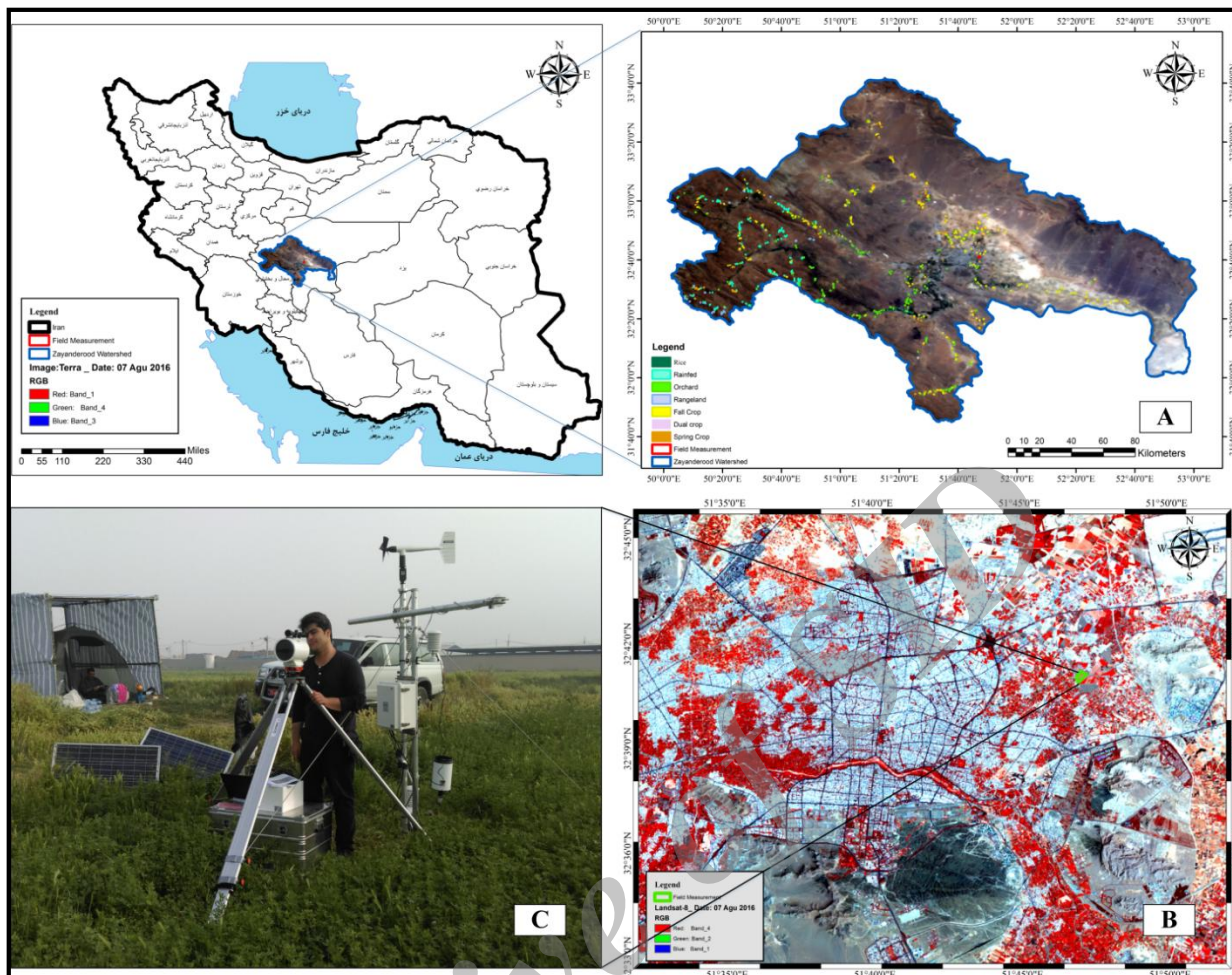


Fig. 1- Area of study: A) Zayandehroud basin (MODIS satellite image for 07Aug2016) B) Field measurements area in Isfahan (OLI satellite image for 07Aug2016) C) Actual evapotranspiration measurements with Scintillometer instrument

شکل ۱- منطقه مورد مطالعه: A) حوضه آبریز زاینده رود (تصویر سنجنده MODIS مربوط به ۷ آگوست ۲۰۱۶) B) مزرعه مطالعاتی در استان اصفهان (تصویر سنجنده OLI مربوط به ۷ آگوست ۲۰۱۶) C) ادوات و نحوه اندازه گیری میدانی تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از دستگاه Scintillometer

Table 1- Number of area observations over the dominant land use of Zayandehroud basin
جدول ۱- تعداد محدوده های مشاهداتی از کاربری های غالب حوضه آبریز زاینده رود

Landuse	Fall Crop	Spring Crop	Dual Crop	Orchard	Rainfed	Rangeland	Needle Leaves Area	Rice	Alfalfa
Number of Field Observations	333	188	257	297	135	42	32	38	37

$$E = \frac{\Delta(R_{n,Soil} - G) + \rho C_p \left(\frac{\Delta_e}{r_{a,Soil}} \right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{Soil}}{r_{a,Soil}} \right)} \quad (1)$$

$$T = \frac{\Delta(R_{n,Canopy} - G) + \rho C_p \left(\frac{\Delta_e}{r_{a,Canopy}} \right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{Canopy}}{r_{a,Canopy}} \right)} \quad (2)$$

۲- روش تحقیق

۲-۱- روش ETLook جهت برآورد تبخیر-تعرق

در روش ETLook مقدار تبخیر از سطوح خاکی، آب و گیاهان از رابطه ۱ و میزان تعرق از سطوح گیاهان از رابطه ۲ به صورت جداگانه محاسبه می گردد:

Scintillometer استفاده گردیده است که نتایج حاصله با گام‌های زمانی ۱۰ روزه در شکل ۲ قابل مشاهده است. همان‌گونه که در این شکل قابل مشاهده است مقادیر این محصول در مقایسه با دستگاه Scintillometer دارای اندکی کم برآورد می‌باشند، به این صورت که در ۱۰ روز ابتدا (روز جولای ۱۴۰) و انتهای (روز جولای ۲۳۰ و ۲۴۰) دوره، دارای اختلافی اندک در حدود ۱ میلی‌متر و در بازه ۱۸۰ الی ۱۸۹ (شماره روز جولای) دارای بیشترین اختلاف در حدود ۱۰ میلی‌متر مشاهده می‌گردد. نمودارهای مربوط به مقادیر تبخیر-تعرق واقعی اندازه‌گیری شده و برآورد شده دارای رفتاری مشابه، به لحاظ روند تغییرات هستند.

همانطور که قبلاً نیز اشاره گردید، در تحقیق حاضر از چهار پارامتر آماری شامل، میانگین مطلق خطا (MAE)، مجذور میانگین خطا (RMSE)، میانگین مطلق درصد خطا (MAPE) و ضریب همبستگی (R) جهت ارزیابی تبخیر-تعرق واقعی ۱۰ روزه محصول WaPOR فائو در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه Scintillometer استفاده گردیده که نتایج در جدول ۲ قابل مشاهده است. بر اساس نتایج آماری ارائه شده در این جدول، مقدار کلی خطا در حدود ۵ میلی‌متر و به صورت کم برآورد است که این مقدار خطا معادل ۱۲ درصد از کل مقادیر مشاهداتی می‌باشد. میزان مجذور میانگین خطا نیز ۶ میلی‌متر در بازه ۱۰ روز است که نشان‌دهنده صحت نسبتاً قابل قبول برآورد تبخیر-تعرق واقعی از محصول WaPOR فائو می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۲ نیز مشاهده می‌گردد، مقادیر برآورد شده از این محصول و داده‌های مشاهداتی، از همبستگی بالایی برخوردار می‌باشند ($R=0.97$).

با توجه به دقت مناسب و همبستگی بسیار بالا مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده حاصل از محصول WaPOR فائو با داده‌های مشاهداتی (شکل ۲) می‌توان با برطرف نمودن اریبی میزان صحت برآوردها را در جهت کاهش خطاها افزایش داد در این راستا از رابطه ۷ که به صورت خطی مابین مقادیر مشاهداتی و مقادیر محصول WaPOR فائو برازش داده شده است استفاده گردید:

$$(7) \quad 0.4365 - \text{محصول WaPOR فائو} * 1/1587 = \text{مقادیر تصحیح شده}$$

پس از تصحیح با استفاده از رابطه خطی ۵، پارامترهای آماری دوباره محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۲ قابل مشاهده است.

همان‌طور، که مشاهده می‌گردد میزان مجذور میانگین خطا از ۶ به ۲/۵ و میانگین مطلق خطا از ۵/۲ به ۲/۱ کاهش یافته است.

در این معادلات E و T به ترتیب تبخیر و تعرق هستند در ΔWm ; Δ (mbarK⁻¹) شیب منحنی فشار بخار اشباع است که بر اساس دما هوا (C, Tair) و فشار بخار اشباع (mbar.es) تغییر می‌نماید. Δs (mba) کمبود فشار بخار است که از تفاوت بین مقادیر بخار اشباع واقعی حاصل می‌گردد. ρ (kgm³) چگالی هوا است و c_p ثابت حرارت هوای خشک که برابر $1.004 \text{ JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$; γ (mbarK⁻¹) ثابت سایکرومتری است. $R_{n, \text{canopy}}$ و $R_{n, \text{Soil}}$ به ترتیب شارتابش خالص خاک و پوشش گیاهی هستند و همچنین Γ_{canopy} و Γ_{soil} به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت در برابر خاک و پوشش گیاهی هستند. $\Gamma_{a, \text{canopy}}$ و $\Gamma_{a, \text{soil}}$ نماینده مقاومت آیرودینامیکی در برابر خاک و پوشش گیاهی می‌باشند.

۲-۲- پارامترهای آماری

ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج و اطلاعات خروجی از تصاویر ماهواره‌ای، بخش جدایی‌ناپذیر تهیه اطلاعات ماهواره‌ای است. در تحقیق حاضر نیز، به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی محصول WaPOR فائو از آماره‌های میانگین مطلق خطا (MAE)، مجذور میانگین خطا (RMSE) و میانگین مطلق درصد خطا (MAPE) جهت ارزیابی صحت، و ضریب همبستگی (R) جهت ارزیابی دقت تبخیر-تعرق این محصول استفاده گردید.

روابط هر یک از این پارامترهای آماری در ذیل نشان داده شده است (روابط ۱ الی ۴):

$$(3) \quad MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |s_i - x_i|}{n}$$

$$(4) \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - x_i)^2}{n}}$$

$$(5) \quad MAPE = \frac{100}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{(s_i - x_i)}{s_i}$$

$$(6) \quad R = \frac{n(\sum_{i=1}^n s_i x_i) - (\sum_{i=1}^n s_i)(\sum_{i=1}^n x_i)}{\sqrt{n(\sum_{i=1}^n s_i^2) - (\sum_{i=1}^n s_i)^2} \sqrt{n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}}$$

در این معادلات S_i مقدار تبخیر-تعرق واقعی مشاهداتی اندازه‌گیری شده با دستگاه Scintillometer در دوره یا روز i ام، X_i مقدار تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده توسط محصول WaPOR فائو در دوره یا روز i ام و n تعداد دوره یا روز می‌باشد.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- ارزیابی و اعتبارسنجی

در این قسمت از تحقیق جهت ارزیابی و اعتبارسنجی محصول تبخیر-تعرق واقعی WaPOR فائو از داده‌های اندازه‌گیری‌های دستگاه

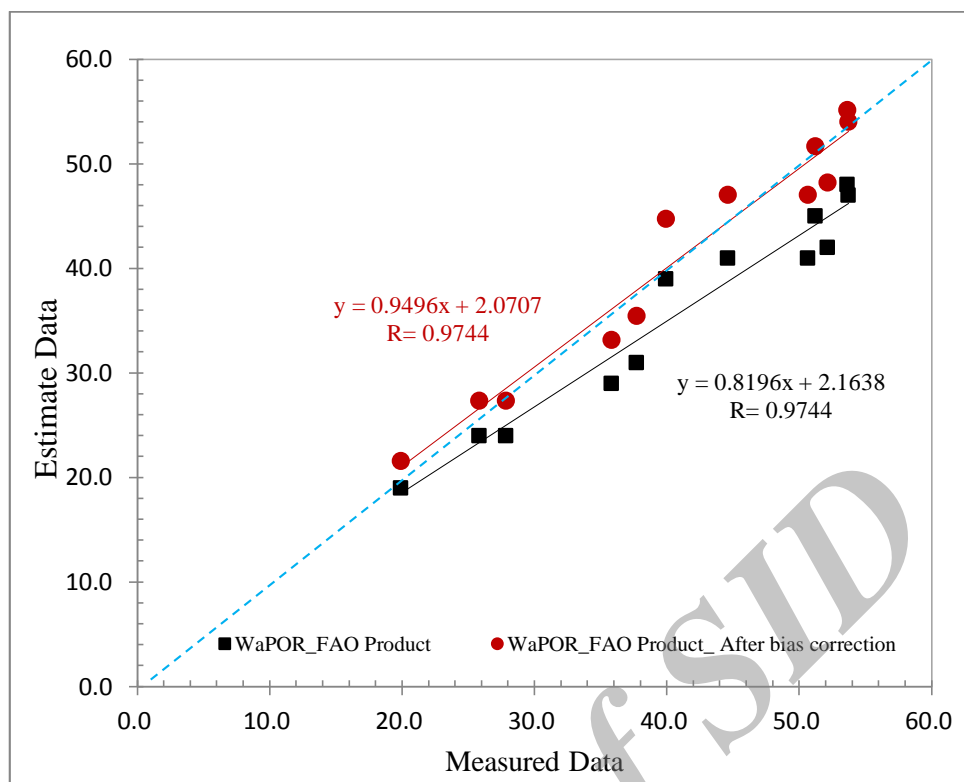


Fig. 2- Scatter plot of measured actual evapotranspiration using scintillometer and estimated from WaPOR product before (black line) and after (red line) bias correction

شکل ۲- نمودار پراکنش تبخیر-تعرق واقعی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه Scintillometer و برآورد شده از محصول WaPOR فائو قبل (مقادیر مشکی) و بعد از تصحیح (مقادیر قرمز)

Table 2- The statistical parameters derived for 10-day actual evapotranspiration of WaPOR product compared with the data measured by Scintillometer

جدول ۲- پارامترهای آماری منتج شده از تبخیر-تعرق واقعی ۱۰ روزه برآورد شده از محصول WaPOR فائو در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه Scintillometer

Name	Mean Absolute Error (MAE)	Root-Mean-Square Error (RMSE)	Mean Absolute Percentage Error (MAPE)	Correlation coefficient (R)
WaPOR_FAO product	520	603	1219	097
WaPOR_FAO product After Bias Correction	214	255	550	097

۳-۲- تحلیل‌های زمانی و مکانی تبخیر-تعرق واقعی در کاربری مختلف

همان‌طور که قبلاً نیز بیان گردید در جهت افزایش بهره‌وری و برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب، برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس مزرعه و در گستره مکانی وسیع با پوشش‌های مختلف (اعم از زراعی و غیر زراعی) ضروری است. زیرا بیشترین سهم از منابع آب قابل دسترس، در بخش کشاورزی مصرف می‌گردد. از سوی دیگر در قسمت ۲-۱ مشاهده گردید محصول سنجش از دوری WaPOR فائو در قیاس با یکی از دقیق‌ترین دستگاه‌های اندازه‌گیری تبخیر-تعرق واقعی (Scintillometer) توانسته با دقت مناسبی، میزان تبخیر-تعرق را در

همچنین این تصحیح باعث گردید میزان میانگین مطلق درصد خطا نیز بیشتر از پنجاه درصد کاهش یابد و به میزان ۵/۵ درصد از کل مشاهدات برسد.

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان اینگونه بیان نمود که مقدار تبخیر-تعرق واقعی در مدت زمان ۱۰ روزه حاصل از محصول WaPOR فائو، در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه Scintillometer، دارای صحت و دقت مناسبی هستند و می‌توان از این داده‌ها به عنوان داده‌های قابل اعتماد جهت استفاده در زمینه‌های گوناگون استفاده نمود.

اوج می‌رسد و تا فصل تابستان ادامه می‌یابد. این رفتار در کاربری‌های مراتع و اراضی دیم واضح‌تر قابل مشاهده است.

همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود در ماه آوریل که بارش قابل توجهی در حدود ۸۳ میلی‌متر اتفاق افتاده است، میزان تبخیر-تعرق در این دو کاربری که تقریباً رفتار مشابه با یکدیگر دارند و افزایش می‌یابد. به‌طور مثال میزان تبخیر-تعرق واقعی از سطح دیم از ۱/۴ میلی‌متر در ماه مارس به ۱۳/۶ میلی‌متر در ماه آوریل افزایش می‌یابد اما دو کشت برنج و باغ رفتاری متفاوت دارند در این دو کشت حداکثر تبخیر-تعرق واقعی در فصل تابستان رخ می‌دهد که در کشت برنج محسوس‌تر است و مقدار آن حدود ۲۲۶ میلی‌متر در ماه ژوئیه است. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که حداکثر نیاز آبی برنج هنگامی است که میزان آب‌های سطحی به دلیل تقارن با فصل گرم و عدم بارش در این فصول، در پایین‌ترین سطح خود می‌باشد. به این مفهوم که، علاوه بر نیاز بالای این محصول، رخداد زمانی تبخیر-تعرق از سطوح شالیزارها نیز در فصولی اتفاق می‌افتد که منابع آب دارای بیشترین ریسک شکست و تنش کم‌آبی، قرار دارد. لذا بر اساس نتایج بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت ادامه کشت این محصول خسارت‌های جبران ناپذیری بر منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی وارد می‌نماید که هرچه سریع‌تر بایستی اقدامات مدیریتی مؤثر در جهت پیشگیری از کشت برنج در این حوضه آبریز صورت پذیرد.

مقیاس مزرعه برآورد نماید پس از این ارزیابی‌ها و اطمینان از دقت قابل قبول محصول WaPOR فائو در برآورد تبخیر-تعرق واقعی، در ادامه مقادیر تبخیر-تعرق کاربری‌های مختلف حوضه آبریز زاینده‌رود با استفاده از داده‌های این محصول در طول سال ۲۰۱۶ مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

در این راستا، با استفاده از این محصول و نمونه‌های تهیه شده در کشت‌های مختلف طی بازدهی‌های میدانی (توضیح داده شده در قسمت ۱-۲-۳)، مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده از تصاویر ماهواره‌ای مربوط به دوازده ماه مربوط به سال ۲۰۱۶ در کاربری‌های مختلف برآورد گردید که نتایج در شکل ۳ قابل مشاهده هستند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، مقادیر تبخیر-تعرق واقعی بر اساس هفت کاربری غالب منطقه شامل زراعت بهاره، زراعت پاییزه، زراعت ترکیبی، باغات، دیم و مراتع و همچنین دو نوع پوشش زراعی خاص شامل برنج و یونجه قابل ملاحظه است. لازم به ذکر است مقادیر نشان داده شده میانگین نمونه‌های انتخاب شده در هر کاربری است و همچنین دلیل انتخاب کشت برنج، به دلیل حساسیت‌های موجود در جهت مصرف آب این نوع کشت خاص در حوضه آبریز گرم و خشک مانند زاینده‌رود بوده است. همان‌گونه که در شکل ۳ نیز قابل مشاهده می‌باشد، تقریباً در تمام پوشش‌ها به جز برنج و باغ، مقدار تبخیر-تعرق واقعی در اوایل فصل بهار که حداکثر بارش در آن اتفاق می‌افتد، به

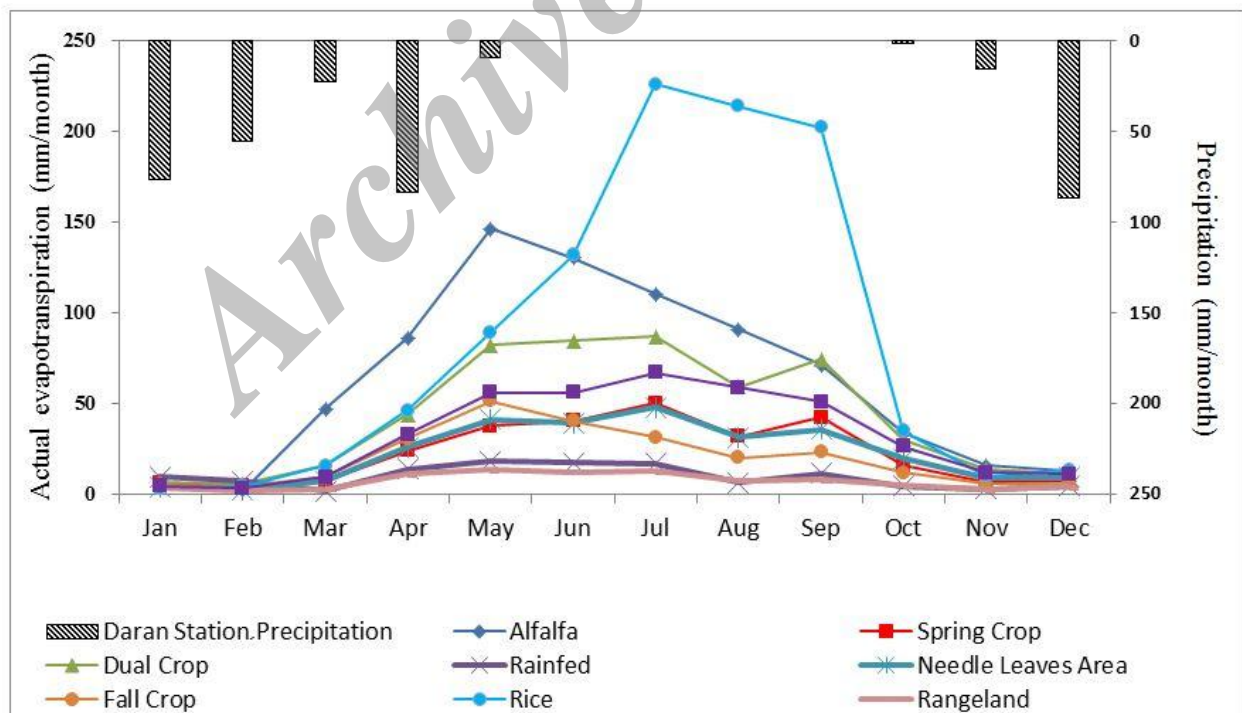


Fig. 3- Actual evapotranspiration estimated from satellite images in 2016
 شکل ۳- مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده از تصاویر ماهواره‌ای در ماه‌های سال ۲۰۱۶

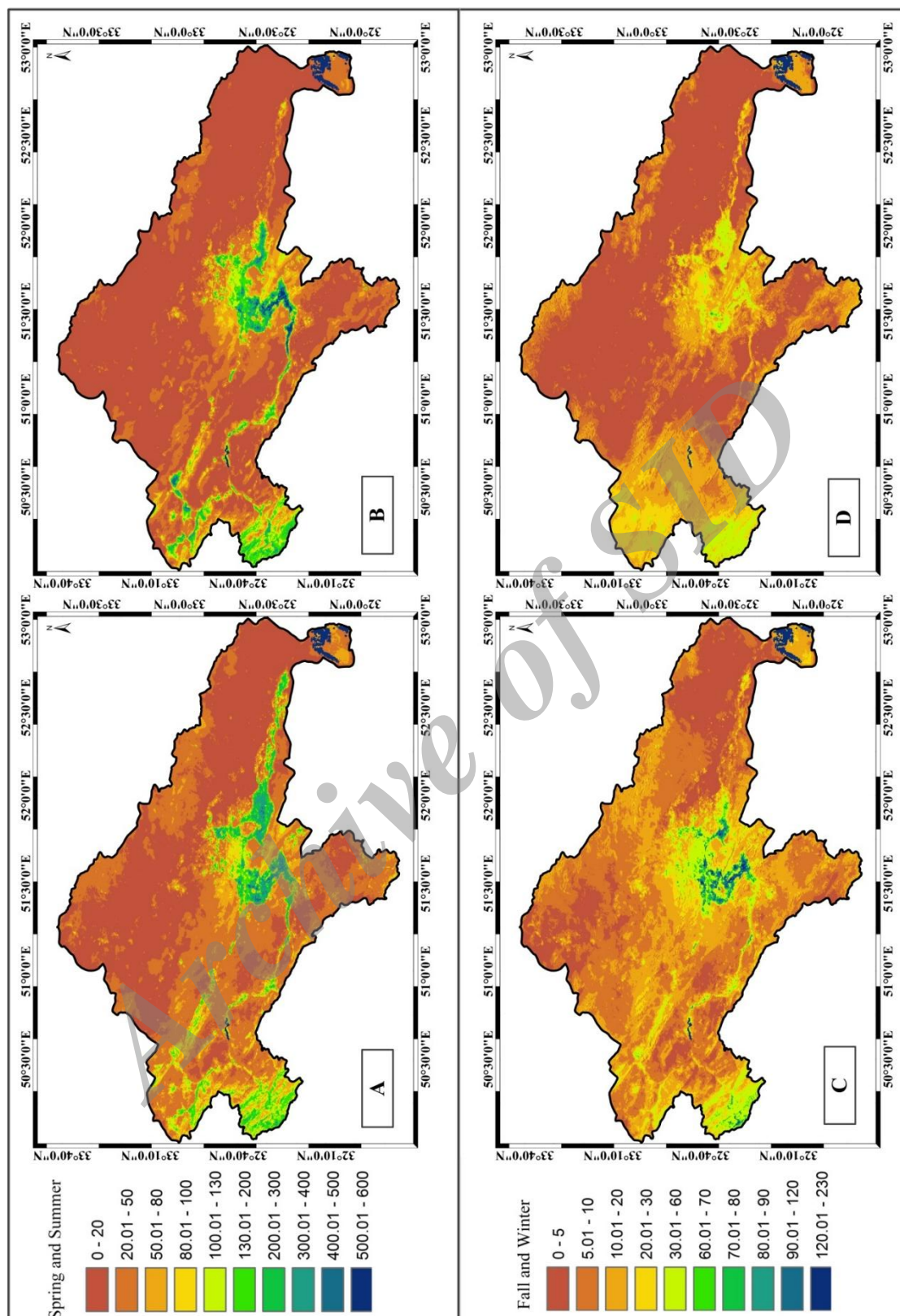


Fig. 4- Actual evapotranspiration (mm/month) estimated from WaPOR product for 2016 (a) spring (b) summer (c) autumn, and (d) winter

شکل ۴- نقشه‌های تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده از محصول WaPOR فائو مربوط به فصول بهار (الف) تابستان (ب) پاییز (ج) و زمستان (د) سال ۲۰۱۶ برحسب میلی‌متر بر ماه

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، کشت پاییزه نیز در فصل بهار به اوج خود می‌رسد و سپس با شیب نسبتاً تندی کاهش می‌یابد رفتار کشت‌های دوگانه نیز بسیار جالب و قابل پیش‌بینی بوده است. زیرا با کاشت محصولات در دوره اول (به صورت پاییزه) میزان تبخیر-تعرق با شروع فصل بهار افزایش و در اواسط آن به اوج خود می‌رسد و سپس با برداشت آن در اواخر تابستان (ماه اوت) به شدت کاهش می‌یابد، اما هیچگاه مقدار آن صفر نمی‌گردد. زیرا مزارع در تاریخ‌های مختلف، برداشت می‌شوند و سپس با کشت محصول دوم میزان تبخیر-تعرق واقعی دوباره افزایش می‌یابد.

شکل ۴ نشان‌دهنده نقشه‌های تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده مربوط به فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز سال ۲۰۱۶ است. همان‌طور که از این شکل نیز قابل مشاهده است، بیشترین تبخیر-تعرق واقعی به لحاظ گستره مکانی در فصل بهار و به لحاظ مقدار در فصل تابستان رخ داده است، این موضوع به صورت کمی در تفکیک کشت‌های غالب در حوضه آبریز زاینده‌رود در شکل ۴ نیز قابل ملاحظه بود.

همان‌طور که از این شکل استنباط می‌شود در فصل زمستان (مربوط به سال ۱۳۹۴) حداکثر مقدار تبخیر-تعرق واقعی حدوداً ۸۰ میلی‌متر از پوشش‌های گیاهی با گستره محدود اتفاق افتاده است (شکل ۴-د) که با شروع فصل پاییز و افزایش بارش و منابع آب، بخصوص منابع سطحی میزان پوشش گیاهی زراعی و غیر زراعی به میزان چشمگیری در گستره مکانی وسیعی افزایش می‌یابد. به نحوی که مقدار حداکثر سطح پوشش تبخیر-تعرق واقعی در فصل بهار اتفاق می‌دهد همچنین مقدار آن در برخی از زمین‌های کشاورزی به حدود ۳۰۰ میلی‌متر نیز می‌رسد (شکل ۴-ا). اما، با شروع فصل تابستان و کاهش پوشش مراتع میزان گستره مکانی تبخیر-تعرق نیز کاهش می‌یابد. ولی میزان آن به لحاظ مقدار افزایش می‌یابد به نحوی که در برخی از مناطق به میزان ۶۰۰ میلی‌متر نیز افزایش می‌یابد که غالباً شالیزارها هستند (شکل ۴-ب). سپس با کاهش دما در فصل پاییز میزان و گسترش مکانی آن به شدت کاهش می‌یابد به طوری که برطبق مشاهدات، حداکثر مقدار تبخیر-تعرق واقعی ثبت شده در فصل پاییز در این سال، میزان ۱۲۰ میلی‌متر از سطوح با پوشش گیاهی رخداده است (شکل ۴-ج).

۳-۳- مقادیر تبخیر-تعرق واقعی سالانه در کاربری‌های گوناگون

با استفاده از نمونه‌هایی که از کشت‌های غالب منطقه، طی بازدید میدانی تهیه گردیده بود؛ میزان تبخیر-تعرق واقعی مربوط به سال

۲۰۱۶ در این مناطق به تفکیک کاربری‌های زراعی در شکل ۵ و به صورت نقشه در کل محدوده حوضه آبریز زاینده‌رود در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، میزان تبخیر-تعرق واقعی در زمین‌های که دوبار در سال کشت می‌گردند (کشت‌های دوگانه) حدود ۵۱۳ میلی‌متر در سال است مقدار ETa از سطح باغ‌های این استان ۳۸۷ میلی‌متر است که در جنگل‌های مصنوعی (مجتمع‌های درختی) که اغلب پوشیده از درختان سوزنی برگ هستند، بسیار کم‌تر و در حدود ۲۷۱ میلی‌متر است. مقادیر تبخیر از سطوح دیم نیز حدود ۱۱۲ میلی‌متر برآورد گردید که این مقدار به صورت میانگین از سطح مراتع شامل مراتع ضعیف و غنی حدود ۸۳ میلی‌متر است و تقریباً با میزان بارش در این ماه همخوانی مناسبی دارد (شکل ۵). بیشترین مقدار تبخیر-تعرق واقعی از شالیزارهای برنج می‌باشد که میانگین کل نمونه‌های مشاهداتی این کشت مقدار حدوداً ۹۹۲ میلی‌متر بوده است.

همان‌طور که از شکل ۶ استنباط می‌گردد، بیشترین مقادیر تبخیر-تعرق واقعی مربوط به باتلاق گاوخونی و سد زاینده‌رود است که اغلب مقادیر تبخیر از سطوح بدنه آب بوده و در حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر در سال ۲۰۱۶ اتفاق افتاده است. اما بیشترین مقدار تبخیر-تعرق واقعی در زمین‌های با پوشش گیاهی مربوط به اراضی اطراف شهرستان لنجان است که طی بازدیدهای میدانی مشخص گردید اکثر این مناطق تحت کشت برنج هستند. در نتیجه با توجه به شرایط منابع آب و نیاز بالای این محصول، در صورت ادامه و توسعه این کشت در این حوضه آبریز، پیامدهای بسیار مخربی قابل تصور است.

در مجموع به طور میانگین در حدود ۱۲۵ میلی‌متر از کل حوضه آبریز زاینده‌رود در سال ۲۰۱۶ تبخیر-تعرق انجام گرفته است. این در حالی است که این مقدار تبخیر-تعرق واقعی استان اصفهان در حدود ۱۱۸ میلی‌متر و استان چهارمحال و بختیاری ۲۰۶ میلی‌متر بوده است. بر اساس نتایج بدست آمده، می‌توان دلیل این امر را وجود منابع آب فراوان، بارندگی بیشتر و وضعیت اقلیمی استان چهارمحال و بختیاری بیان نمود. با بررسی‌های انجام شده مشخص گردید، سهم تبخیر-تعرق واقعی در کاربری‌های دیم، مراتع و پیکره آبی در این استان نسبت به استان اصفهان بیشتر است؛ اما در بخش کشاورزی میانگین تبخیر-تعرق واقعی استان اصفهان حدود ۲۷ درصد بیشتر از میانگین تبخیر-تعرق واقعی استان چهارمحال و بختیاری است. به طوری که میانگین تبخیر-تعرق واقعی زراعی و باغی استان اصفهان در حدود ۲۸۹ و در استان چهارمحال و بختیاری نیز حدود ۲۲۸ میلی‌متر بوده است.

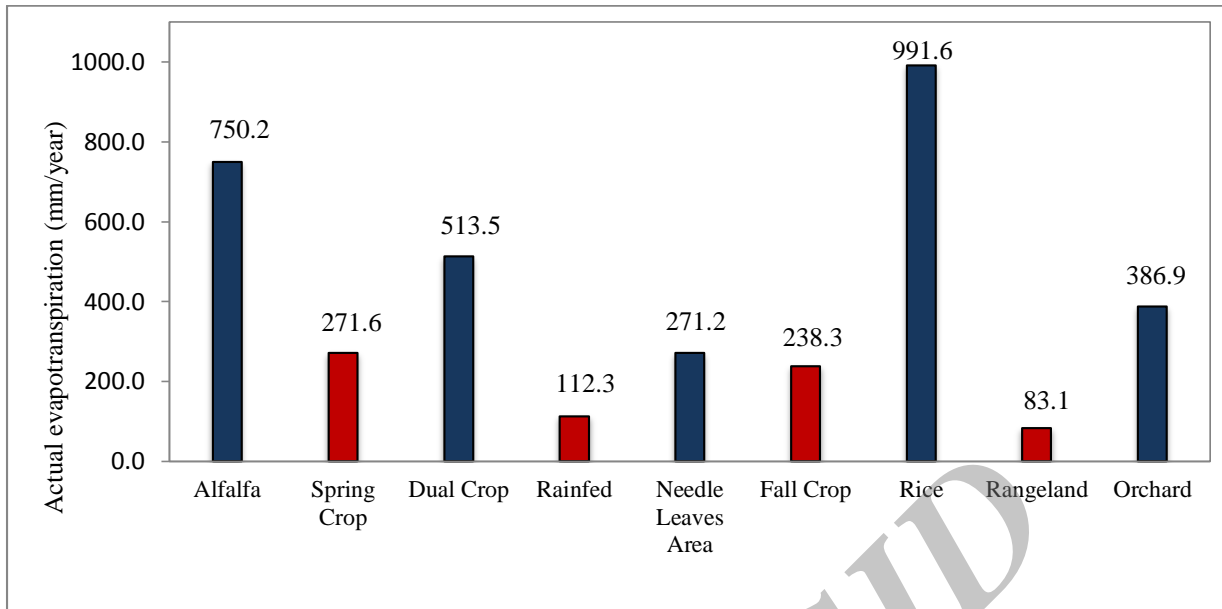


Fig. 5- Annual evapotranspiration estimated for the dominant land use in 2016

شکل ۵- مقدار تبخیر-تعرق واقعی سالانه برآورد شده در کاربری‌های غالب در سال ۲۰۱۶

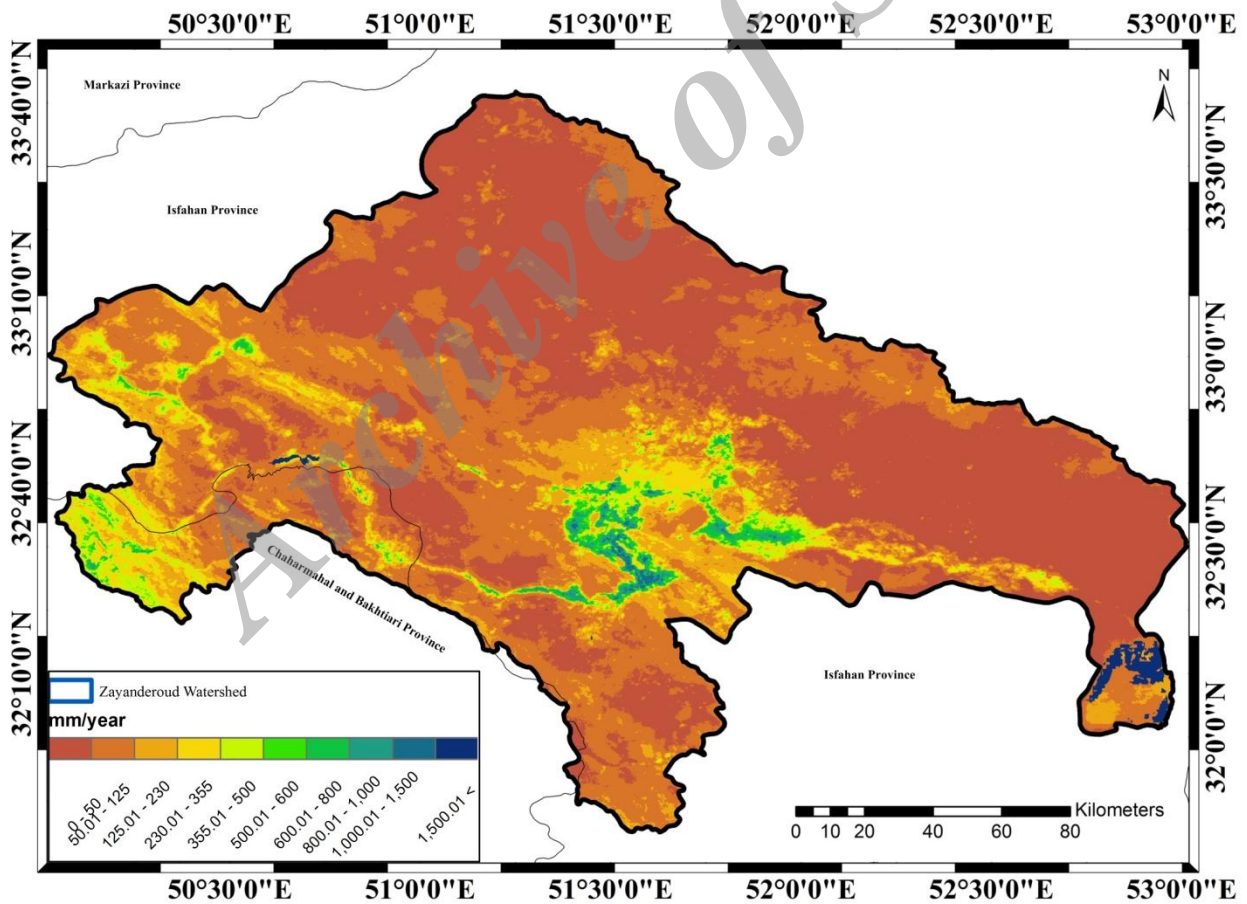


Fig. 6- Annual evapotranspiration estimated from satellite product

شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی تبخیر-تعرق واقعی سالانه برآورد شده از محصول ماهواره‌ای

۵/۲ به ۲/۱ کاهش یافت. همچنین این تصحیح باعث گردید میزان میانگین مطلق درصد خطا نیز بیشتر از پنجاه درصد کاهش یابد و به میزان ۵/۵ از در کل مشاهدات برسد.

باتوجه با نتایج حاصله می‌توان استنباط نمود که مقادیر تبخیر-تعرق واقعی حاصل از محصول WaPOR فائو دارای دقت و صحت قابل اعتمادی می‌باشد. بررسی میزان تبخیر-تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف نشان می‌دهد که بیشترین تبخیر-تعرق واقعی در سال ۲۰۱۶ مربوط به کشت‌های دوگانه، اراضی باغی، کشت‌های بهاره، کشت‌های پاییزه، دیم و مرتع است که به ترتیب دارای مقادیری در حدود ۵۱۳، ۳۸۷، ۲۷۲، ۲۷۱، ۱۱۲ و ۸۳ میلی‌متر در سال هستند. همچنین بر طبق اطلاعات مستخرج شده از این تصاویر در این سال مشاهده گردید، به‌صورت میانگین ۹۹۲ میلی‌متر آب از سطح شالیزارهای موجود در این حوضه آبریز به صورت تبخیر-تعرق، از دسترس خارج گردیده که باتوجه به اقلیم گرم و خشک و همچنین شرایط منابع آب مقدار قابل توجهی است.

۵- تشکر

نویسندگان مقاله حاضر از یاری آقای عثمان محمدی مدیر عملیات میدانی کمال تشکر را دارند. همچنین از موسسه تحقیقات منابع آب وزارت نیروی ایران جهت خرید دستگاه Scintillometer و تقبل تمامی هزینه‌های تحقیق حاضر قدردانی می‌نمایند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Biomass
- 2- Yield
- 3- Water Productivity Open-Access Portal (WaPOR)
- 4- Eddy Covariance
- 5- Wind Speed Across the Scintillometer Path
- 6- Inner Scale of Turbulence

۶- مراجع

- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M (1998) Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO. Irrigation and drainage paper 56 FAO Rome 300:6541
- Allen RG, Tasumi M, Morse A and Trezza R (2005) A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. Irrigation and Drainage Systems 19:251-268

نتایج به‌صورت کلی نشان می‌دهد، در سال ۲۰۱۶ از حوضه آبریز زاینده‌رود حدود ۳/۴ میلیارد متر مکعب آب به‌صورت تبخیر-تعرق واقعی از دسترس خارج گردیده است که سهم استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری به ترتیب برابر ۳ و ۰/۴ میلیارد مترمکعب است. اگرچه در بعضی از کاربری‌ها (همانند کشاورزی) سهم استان اصفهان بیشتر بوده است اما دلیل اصلی اختلاف حجم مصرفی از طریق تبخیر-تعرق واقعی، به سبب سهم بیشتر استان اصفهان به لحاظ وسعت در این حوضه آبریز است.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ETA) در مقیاس مزرعه و گستره مکانی وسیع، یکی از اطلاعات مورد نیاز و ضروری جهت برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب و افزایش بهره‌وری است. اگرچه برآورد تبخیر و تعرق واقعی در سطح وسیع با محدودیت‌های مکانی، زمانی و هزینه‌ای زیادی روبرو می‌باشد اما با پیشرفت علوم نوین مانند سنجش از دور و ارائه محصولات ماهواره‌ای می‌توان این متغیر مهم را با دقت‌های قابل اعتماد برآورد نمود یکی از پرکاربردترین و جدیدترین آن‌ها محصول WaPOR فائو می‌باشد. با توجه به تنوع بالای کشت و همچنین اقلیم متنوع حوضه زاینده‌رود، این حوضه به عنوان منطقه مورد مطالعاتی انتخاب گردید.

در تحقیق حاضر ابتدا این محصول با استفاده از مقادیر تبخیر-تعرق واقعی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه Scintillometer و آماره‌های میانگین مطلق خطا (MAE)، مجذور میانگین خطا (RMSE) و میانگین مطلق درصد خطا (MAPE) و ضریب همبستگی (R) صحت‌سنجی شد و سپس مقدار تبخیر-تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف در مقیاس حوضه آبریز تحلیل گردید. مقدار MAE مربوط به محصول ETA در قیاس با داده‌های اندازه‌گیری‌های میدانی، حدود ۵ میلی‌متر در مدت ۱۰ روز و به صورت کم برآورد است که این مقدار باعث و میانگین مطلق درصد خطا در حدود ۱۲ درصد از کل مشاهدات گردیده است. میزان مجذور میانگین خطا بازه زمانی ۱۰ روز نیز حدود ۶ میلی‌متر می‌باشد که نشان‌دهنده صحت بالای برآورد تبخیر-تعرق واقعی از محصول WaPOR فائو است. همچنین نتایج حاکی از همبستگی بسیار مناسب ($R=0.97$) داده‌های تبخیر-تعرق واقعی حاصل از این محصول با داده‌های مشاهداتی در سطح یک درصد می‌باشد. در نتیجه می‌توان با برطرف نمودن آریبی میزان صحت برآوردها را در جهت کاهش خطا افزایش داد. در تحقیق حاضر پس از برطرف نمودن این آریبی از تبخیر-تعرق واقعی محصول WaPOR فائو میزان مجذور میانگین خطا از ۶ به ۲/۵ و میانگین مطلق خطا از

- Grafton RQ, Chu HL, Stewardson M and Kompas T (2011) Optimal dynamic water allocation: irrigation extractions and environmental tradeoffs in the Murray River Australia. *Water Resources Research* 47:86-97
- Hartogensis O, De Bruin H and Van De Wiel B (2002) Displaced-beam small aperture scintillometer test Part II: CASES-99 stable boundary-layer experiment. *Boundary-Layer Meteorology* 105:149-176
- Hemakumara H, Chandrapala L and Moene AF (2003) Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. *Agricultural Water Management* 58:109-122
- Hill R and Ochs G (1978) Fine calibration of large-aperture optical scintillometers and an optical estimate of inner scale of turbulence. *Applied Optics* 17:3608-3612
- Jeyaseelan A (2003) Droughts & floods assessment and monitoring using remote sensing and GIS. *Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology*:291
- Khojeh AR, Zarkesh MMK, Arasteh PD, Moridi A and Mohammadi RA (2016) Sensitivity analysis of calculated evapotranspiration using daily energy balance model and comparing it with SEBAL model. *Journal of Iran-Water Resources Research (IR-WRR)* 12:18-28 (In Persian)
- Kohsiek W, Meijninger W, Moene A, Heusinkveld B, Hartogensis O, Hillen W and De Bruin H (2002) An extra large aperture scintillometer for long range applications. *Boundary-layer meteorology* 105:119-127
- Liaqat UW and Choi M (2017) Accuracy comparison of remotely sensed evapotranspiration products and their associated water stress footprints under different land cover types in Korean peninsula. *Journal of Cleaner Production* 155:93-104
- Lorenz DJ, Otkin JA, Svoboda M, Hain CR, Anderson MC and Zhong Y (2017) Predicting US drought monitor states using precipitation soil moisture and evapotranspiration anomalies part I: Development of a nondiscrete USDM index. *Journal of Hydrometeorology* 18:1943-1962
- Meijninger W, Beyrich F, Lüdi A, Kohsiek W and Bruin HD (2006) Scintillometer-based turbulent fluxes of sensible and latent heat over a heterogeneous land surface-a contribution to LITFASS-2003. *Boundary-layer meteorology* 121:89-110
- Monteith JL (1965) Evaporation and environment *Symp Soc Exp Biol* p 4
- Qureshi ME, Grafton RQ, Kirby M and Hanjra MA (2011) Understanding irrigation water use efficiency
- Allen RG, Tasumi M and Trezza R (2007) Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133:380-394
- Bagheri M (2013) Assessment of remote sensing technique for estimation of water balance components in basin scale emphasizing on net groundwater exploitation a case study on Urmia lake basin. Tarbiat Modares University, 250p (In Persian)
- Bastiaanssen W, Cheema M, Immerzeel W, Miltenburg I and Pelgrum H (2012) Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model. *Water Resources Research* 48:100-120
- Bastiaanssen W, Menenti M, Feddes R and Holtslag A (1998) A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1 Formulation. *Journal of Hydrology* 212:198-212
- Chong H and Sunding D (2006) Water markets and trading. *Annual Review of Environment and Resources* 31:239-264
- Coe M, Cumming D and Phillipson J (1976) Biomass and production of large African herbivores in relation to rainfall and primary production. *Oecologia* 22:341-354
- Colmer TD and Barton L (2017) A review of warm-season turfgrass evapotranspiration responses to deficit irrigation and drought resistance. *Crop Science* 57:98-110
- Evans RG and Sadler EJ (2008) Methods and technologies to improve efficiency of water use. *Water Resources Research* 44:151-163
- Fao (2008) Food and agriculture organization of the united nations. *Aquastat Database from Water Report* 34:220-232
- Foster S, Evans R and Escolero O (2015) The groundwater management plan: in praise of a neglected 'tool of our trade'. *Hydrogeology Journal* 23:847-850
- French AN, Hunsaker DJ and Thorp KR (2015) Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. *Remote Sensing of Environment* 158:281-294
- Ghamarnia H, Gholamian SM and Kamali N (2016) Estimating of crop coefficient and actual evapotranspiration of corn using LANDSAT8 Images (case study: Sarab Nilufar plain in Kermanshah). *Journal of Iran-Water Resources Research (IR-WRR)* 12:93-107 (In Persian)

- evapotranspiration from irrigated fields. *Sensors* 7:979-1000
- Sima S and Tajrishi M (2015) Estimation of Urmia lake evaporation using remote sensing data. *Journal of Iran-Water Resources Research (IR-WRR)* 11:32-48 (In Persian)
- Su Z (2002) The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences* 6:85-100
- Wagle P, Bhattarai N, Gowda PH and Kakani VG (2017) Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 128:192-203
- Wang T-I, Ochs G and Clifford S (1978) A saturation-resistant optical scintillometer to measure C_2 . *JOSA* 68:334-338
- Wesely ML (1976) The combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index. *Journal of Applied Meteorology* 15:43-49
- Wu B, Jiang L, Yan N, Perry C and Zeng H (2014) Basin-wide evapotranspiration management: concept and practical application in Hai basin China agricultural. *Water Management* 145:145-153
- Yang Y, Anderson M, Gao F, Hain C, Kustas W, Noormets A, Sun G, Wynne R and Thomas V (2017) Evaluation of drought impact on evapotranspiration (et) over a forested landscape in North Carolina USA using daily Landsat-scale ET. *Geophysical Research* 38:13-27
- at different scales for better policy reform: a case study of the Murray-Darling Basin. *Australia Water Policy* 13:1-17
- Ochs G and Wang T-I (1978) Finite aperture optical scintillometer for profiling wind and C_n^2 . *Applied Optics* 17:3774-3778
- Olivera-Guerra LE, Mattar C, Santamaría-Artigas A, Durán-Alarcón C and Fuster R (2013) A first evaluation of an operational method (SSEBop) to estimate Actual Evapotranspiration by using MODIS data over the semi-arid region of Chile. 4th International Symposium on Recent Advances in Quantitative
- Papadavid G, Hadjimitsis DG, Toullos L and Michaelides S (2013) A modified SEBAL modeling approach for estimating crop evapotranspiration in semi-arid conditions. *Water Resources Management* 27:3493-3506
- Rahimpour M (2015) Trends assessment of changes in water budget components and land use of Lake Urmia (Iran) and Lake Van (Turkey) basins using remote sensed data. Tarbiat Moadderes University (In Persian)
- Rodell M, Beaudoin HK, L'ecuyer TS, Olson WS, Famiglietti JS, Houser PR, Adler R, Bosilovich MG, Clayson CA and Chambers D (2015) The observed state of the water cycle in the early twenty-first century. *Journal of Climate* 28:82-98
- Senay GB, Budde M, Verdin JP and Melesse AM (2007) A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual