



نسخه از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال سیزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۰
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.13, No. 3, Autumn 2021

۷۳-۹۲

مقاله پژوهشی

برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال (SEBAL) و مقایسه آن با تبخیر و تعرق استاندارد فائو ۵۶ بهبود یافته با رابطه K_c -NDVI

هادی زارع خورمیزی^{۱*}، علی طولی^۲، حمیدرضا غفاریان مالمیری^۳

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی مرتع، دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه یزد

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۸

چکیده

نظارت بر تغییرات مکانی و زمانی تبخیر تعرق برای مدیریت آبیاری و نیاز آبی گیاهان زراعی، به‌ویژه در مناطق کم‌آب، بسیار مهم است. هدف از پژوهش حاضر برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال (SEBAL) و مقایسه آن با تبخیر و تعرق استاندارد فائو ۵۶، به‌منظور تعیین باغات پسته تحت تنش خشکی در استان یزد است. بدین‌منظور، از یک سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ با پانزده تصویر در سال ۲۰۱۵ استفاده شد. در ابتدا، تبخیر و تعرق در دوره‌های پانزده‌روزه فنولوژی پسته به‌دست آمد و سپس، با جمع تبخیر و تعرق در دوره‌های پانزده‌روزه، میزان تبخیر و تعرق در چهار مرحله اصلی فنولوژی پسته و کل یک دوره رشد سالیانه تعیین شد. تبخیر و تعرق استاندارد نیز به‌روش فائو ۵۶ و با استفاده از رابطه K_c -NDVI به‌دست آمد و به‌منزله استاندارد برای مقایسه تبخیر و تعرق واقعی سبال در نظر گرفته شد. براساس نتایج، الگوریتم سبال قابلیت مناسبی در تعیین میزان تبخیر و تعرق در منطقه مورد مطالعه دارد. با اینکه داده‌های معتبر لایسومتر برای مقایسه نتایج الگوریتم سبال با آن در منطقه یادشده وجود نداشت؛ مقایسه نتایج با روش استاندارد فائو ۵۶ نشان داد این دو روش مطابقت خوبی با یکدیگر دارند و میانگین ضریب تبیین (R^2)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) میان نتایج الگوریتم سبال و رویکرد فائو K_c -NDVI به‌ترتیب ۰.۸، ۱۶.۷ و ۱۴.۵ میلی‌متر بین دوره‌های پانزده‌روزه فنولوژی پسته به‌دست آمد. میانگین میزان تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد در طول یک فصل رشد پسته، در سطح منطقه مورد بررسی، به‌ترتیب ۹۵۰ و ۱۰۸۶ میلی‌متر است. مقایسه تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد نشان داد، در بخش اعظم این منطقه، تبخیر و تعرق واقعی کمتر از شرایط استاندارد است.

کلیدواژه‌ها: تنش خشکی، مدیریت آبیاری، فائو ۵۶، پسته، ضریب گیاهی.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: استان البرز، کرج، دانشکده منابع طبیعی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. تلفن: ۰۹۱۳۷۰۷۸۶۳۱

۱- مقدمه

ایران، به همراه کشورهای حوزه دریای مدیترانه، یکی از زیستگاه‌های اصلی پسته (*Pistacia vera* L.) در دنیا شناخته شده است (شرافتی و دیگران، ۱۳۹۲). کشور ایران، با داشتن شرایط مساعد آب‌وهوایی و سابقه طولانی در تولید پسته، جایگاه مناسبی در این زمینه برای خود فراهم آورده است. براساس گزارش فائو در سال ۲۰۱۴، ایران مهم‌ترین تولیدکننده پسته در جهان، با مساحت برداشت ۳۱۶۷۸۰ هکتار است (FAO, 2017). خشکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد گیاه و شایع‌ترین تنش محیطی به‌شمار می‌رود که تولید تقریباً ۲۵٪ اراضی جهان را محدود کرده است (Passioura, 2007). هرچند گیاه پسته، به‌علت تحمل بالا در برابر کم‌آبی، تولیدی با بازده متوسط دارد؛ مدیریت صحیح آبیاری در تولید دانه‌های باکیفیت بسیار مهم است (Bellvert et al., 2018).

تبخیر و تعرق (ET)^۱، که شامل تبخیر آب از سطح خاک و تعرق از پوشش گیاهی است، روندی اساسی را در چرخه هیدرولوژیکی نشان می‌دهد و عنصری کلیدی در مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی محسوب می‌شود (Gao et al., 2008). نظارت بر تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی با هدف مدیریت آبیاری و نیاز آبی، به‌ویژه در مناطق کم‌آب، بسیار مهم است (Bouwer et al., 2008; Kamble et al., 2013; Bezerra et al., 2015). مطالعات نشان داده‌اند که الگوهای زمانی و مکانی تبخیر و تعرق به عوامل بسیاری از جمله نوع گیاه، خاک، توپوگرافی، شرایط هواشناسی و تغییرات مکانی و زمانی محتوای رطوبت خاک بازمی‌گردد (Allen et al., 1998; Allen et al., 2011; Bezerra et al., 2013). تبخیر و تعرق روی سطوح همگن را با تکنیک‌های معمول مانند نسبت باون (BR)^۲، کوواریانس ادی (EC)^۳، بیلان آب و در سطح مزرعه با استفاده از سیستم لایسیمتر می‌توان اندازه‌گیری کرد (Bala et al., 2016). این روش‌ها

معمولاً پرهزینه و وقت‌گیرند و قابلیت تعمیم به سطوح وسیع ناهمگن را ندارند (Gao et al., 2008). در نتیجه، امروزه استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و روش‌های مبتنی بر سنجش از دور، که از یک‌سو این ناهمگنی و تغییرات را در نظر می‌گیرند و از سوی کم‌هزینه‌ترند و می‌توان در سطح وسیع آنها را انجام داد، با اقبال بسیار مواجه شده‌اند (کریمی و دیگران، ۱۳۹۵). به‌منظور تعیین تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، الگوریتم‌های متعددی توسعه یافته که یکی از پرکاربردترین آنها الگوریتم سبال (SEBAL)^۴ است (میرزایی و دیگران، ۱۳۹۷). سبال از الگوریتم‌های سنجش از دور است که تعادل انرژی سطحی لحظه‌ای را برای هر پیکسل از تصویر ماهواره‌ای محاسبه می‌کند (Bastiaanssen, 2000). باستینسن^۵ و همکاران (۲۰۰۵) ادعا کردند که الگوریتم سبال توانسته است میزان تبخیر و تعرق روزانه و فصلی را، در چهل مطالعه انجام‌شده در ۲۵ کشور جهان، به‌ترتیب، با دقت ۸۵ و ۹۵٪ تخمین بزند. الگوریتم سبال، در ایران، طی پژوهش‌های گوناگونی ارزیابی شده است (زمانی ثانی و دیگران، ۱۳۹۶؛ کرباسی و دیگران، ۱۳۹۵؛ قمرنیا و رضوانی، ۱۳۹۳) (Rahimzadegan & Janani, 2019). نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد الگوریتم سبال، در تعیین میزان تبخیر و تعرق واقعی، دقت مورد قبولی دارد. پژوهش‌هایی در سطح جهان نیز دقت این الگوریتم را بررسی و ارزیابی کرده‌اند (Rawat et al., 2017; Wagle et al., 2017; Mendonça et al., 2012; Jaber et al., 2016; Jiménez-Bello et al., 2015). نتایج این مطالعات نیز حاکی از آن است که الگوریتم سبال پتانسیل خوبی در تعیین میزان تبخیر و تعرق دارد.

1. Evapotranspiration
2. Bowen ratio
3. Eddy Covariance
4. The Surface Energy Balance Algorithm for Land
5. Bastiaanssen

از میان روش‌های غیرمستقیم تعیین تبخیر و تعرق گیاهان و محصولات زراعی و باغی، می‌توان به روش ذکرشده در نشریه فائو ۵۶ اشاره کرد. در این روش، تبخیر و تعرق پتانسیل ابتدا با استفاده از روش استاندارد پنمن-مانتیت محاسبه می‌شود و سپس، با به‌کارگیری ضریب گیاهی (K_C)، به تبخیر و تعرق واقعی گیاه تبدیل می‌شود (Allen et al., 1998). کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی و سازمان خواربار جهانی روش فائو پنمن-مانتیت را شیوه‌ای استاندارد برای محاسبه تبخیر و تعرق، با استفاده از داده‌های اقلیمی و ارزیابی سایر روش‌ها، پیشنهاد کردند (Hargreaves, 1994). طبق دستورالعمل فائو ۵۶، می‌توان تبخیر و تعرق گیاهان را در شرایط استاندارد یا غیراستاندارد اندازه‌گیری کرد. در شرایط استاندارد، در رشد یا تبخیر و تعرق گیاه تحت تأثیر تنش شوری و آبی، تراکم کشت پایین، آفات و بیماری‌های گیاهی، علف‌های هرز یا حاصلخیزی اندک خاک محدودیتی وجود ندارد (Allen et al., 1998)؛ بنابراین، این میزان تبخیر و تعرق را می‌توان استاندارد برای مقایسه الگوریتم‌های دیگر و تعیین تنش خشکی در نظر گرفت. براساس دستورالعمل فائو ۵۶، ضریب گیاهی را می‌توان با توجه به شرایط اقلیم، مراحل گوناگون رشد و نوع محصول، طبق جدول‌های مورد نظر تعیین کرد (Allen et al., 1998). برپایه شرایط طبیعی، ممکن است متغیرهای گوناگون پوشش گیاهی، نظیر درصد بایومس و پوشش، با شرایط استاندارد نشریه فائو ۵۶ متفاوت باشد. بنابراین، دستورالعمل فائو ۵۶ به‌صورت نقطه‌ای و درمورد شرایطی استاندارد اجرایی است و نمی‌توان آن را در مناطق وسیع با تغییرات درصد پوشش گیاهی محصولات به‌کار برد. ضریب گیاهی با توجه به پویایی‌های پوشش گیاهی مانند شاخص سطح برگ، میزان سبزی‌نگی و جزء پوشش گیاهی تعیین می‌شود (Farg et al., 2012). در این زمینه، داده‌های سنجش از دور را می‌توان در برآورد برخی متغیرهای کلیدی مرتبط با فنولوژی پوشش گیاهی استفاده کرد

از میان روش‌های غیرمستقیم تعیین تبخیر و تعرق گیاهان و محصولات زراعی و باغی، می‌توان به روش ذکرشده در نشریه فائو ۵۶ اشاره کرد. در این روش، تبخیر و تعرق پتانسیل ابتدا با استفاده از روش استاندارد پنمن-مانتیت محاسبه می‌شود و سپس، با به‌کارگیری ضریب گیاهی (K_C)، به تبخیر و تعرق واقعی گیاه تبدیل می‌شود (Allen et al., 1998). کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی و سازمان خواربار جهانی روش فائو پنمن-مانتیت را شیوه‌ای استاندارد برای محاسبه تبخیر و تعرق، با استفاده از داده‌های اقلیمی و ارزیابی سایر روش‌ها، پیشنهاد کردند (Hargreaves, 1994). طبق دستورالعمل فائو ۵۶، می‌توان تبخیر و تعرق گیاهان را در شرایط استاندارد یا غیراستاندارد اندازه‌گیری کرد. در شرایط استاندارد، در رشد یا تبخیر و تعرق گیاه تحت تأثیر تنش شوری و آبی، تراکم کشت پایین، آفات و بیماری‌های گیاهی، علف‌های هرز یا حاصلخیزی اندک خاک محدودیتی وجود ندارد (Allen et al., 1998)؛ بنابراین، این میزان تبخیر و تعرق را می‌توان استاندارد برای مقایسه الگوریتم‌های دیگر و تعیین تنش خشکی در نظر گرفت. براساس دستورالعمل فائو ۵۶، ضریب گیاهی را می‌توان با توجه به شرایط اقلیم، مراحل گوناگون رشد و نوع محصول، طبق جدول‌های مورد نظر تعیین کرد (Allen et al., 1998). برپایه شرایط طبیعی، ممکن است متغیرهای گوناگون پوشش گیاهی، نظیر درصد بایومس و پوشش، با شرایط استاندارد نشریه فائو ۵۶ متفاوت باشد. بنابراین، دستورالعمل فائو ۵۶ به‌صورت نقطه‌ای و درمورد شرایطی استاندارد اجرایی است و نمی‌توان آن را در مناطق وسیع با تغییرات درصد پوشش گیاهی محصولات به‌کار برد. ضریب گیاهی با توجه به پویایی‌های پوشش گیاهی مانند شاخص سطح برگ، میزان سبزی‌نگی و جزء پوشش گیاهی تعیین می‌شود (Farg et al., 2012). در این زمینه، داده‌های سنجش از دور را می‌توان در برآورد برخی متغیرهای کلیدی مرتبط با فنولوژی پوشش گیاهی استفاده کرد

1. Mean Absolute Error
2. Root Mean Square Error

طول جغرافیایی $39^{\circ}53'47''$ و $53^{\circ}47'15''$ از نصف‌النهار مبدأ واقع شده است. کل منطقه ۱۳۹۷۱ هکتار وسعت دارد که تقریباً ۳۱۶۰ هکتار آن با باغات پسته پوشیده شده است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را در سطح ایران و استان یزد، به همراه موقعیت دو ایستگاه هواشناسی گاریز و ابرکوه، نشان می‌دهد. میانگین بارندگی سالانه ایستگاه گاریز و ابرکوه به ترتیب ۱۰۶ و ۶۷ میلی‌متر است. در ایستگاه‌های هواشناسی نام‌برده، از پارامترهای دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت آفتابی به‌منظور محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع استفاده شد.

۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای

در پژوهش حاضر، ابتدا از ۲۳ تصویر ماهواره لندست ۸ در سال ۲۰۱۵ م. استفاده شد تا سری زمانی یک‌ساله‌ای ایجاد شود. تصاویر مورد استفاده از پایگاه <https://earthexplorer.usgs.gov> دریافت و سپس، تصحیحات اتمسفری و هندسی آنها انجام شد. با توجه به اینکه هدف تعیین میزان تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد در طول دوره رشد یک‌ساله پسته است، ابتدا باید داده‌های از دست‌رفته تصاویر ماهواره‌ای، با استفاده از پوشش ابر، بازسازی شوند. دو ورودی مهم در تعیین تبخیر و تعرق، با روش استاندارد فائو (K_c-NDVI) و الگوریتم سبال، دمای سطح زمین (LST) و شاخص NDVI است.

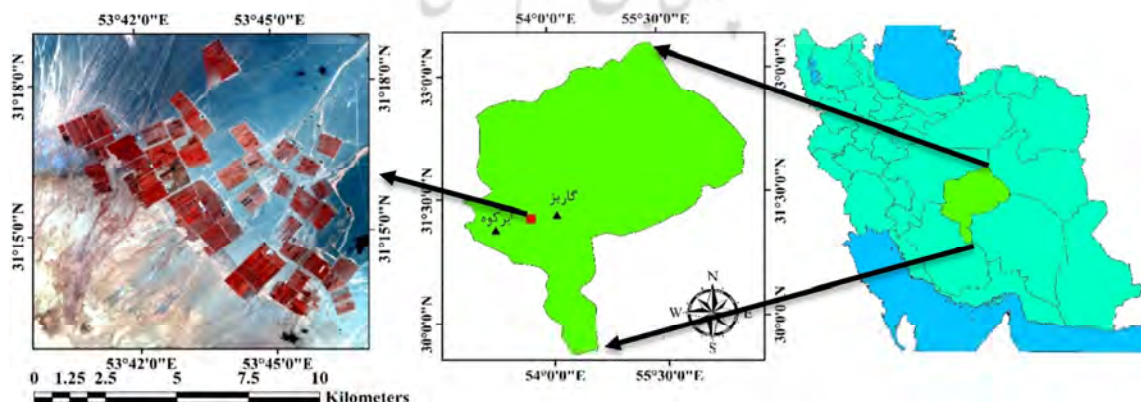
داده‌های لندست ۸ در دلتای رود نیل مصر برآورد شد. ارزیابی نتایج این مطالعه با روش فائو پنمن-مانتیت خطای RMSE بین این دو روش را ۰.۴۶ میلی‌متر در روز نشان داد (Elmer et al., 2019). طی پژوهشی در منطقه بیوانی در هاریانا، تبخیر و تعرق واقعی محصول گندم، با استفاده از الگوریتم سبال و روش استاندارد پنمن-مانتیت، تخمین زده و با نتایج لایسیمتر مقایسه شد. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که الگوریتم سبال پتانسیل خوبی برای برآورد تبخیر تعرق در منطقه مورد مطالعه دارد (Rawat et al., 2017).

هدف از پژوهش حاضر تعیین مقدار تبخیر و تعرق واقعی، با استفاده از الگوریتم سبال، در طول یک فصل رشد پسته و هدف دیگر مقایسه میزان تبخیر و تعرق واقعی حاصل از طریق الگوریتم سبال، با دستورالعمل نشریه فائو ۵۶ ارتقایافته طبق رابطه K_c-NDVI، در مراحل گوناگون فنولوژی پسته است. نتایج این پژوهش می‌تواند به رفع برخی محدودیت‌های دستورالعمل فائو ۵۶ کمک کند و همچنین، در مدیریت آب و آبیاری و جلوگیری از تنش خشکی در اراضی پسته مؤثر باشد.

۲-۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی در جنوب‌غرب استان یزد و بین عرض‌های جغرافیایی $31^{\circ}12'47''$ و $31^{\circ}19'09''$ و



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در سطح ایران و استان یزد، به همراه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی گاریز و ابرکوه

رابطه (۲)

$$R = (1-\alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1-\varepsilon_0)R_{L\downarrow}$$

در این معادله، α آلبدوی سطح و ε_0 گسیلندگی سطح به دست آمده از طریق شاخص سطح برگ است.

۲-۳-۲- شار گرمای خاک (G)

محاسبه شار گرمای خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مشکل است. اما مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که بین مقدار G/R_n و پارامترهایی چون NDVI و دمای سطح (T_s) و آلبدو رابطه‌ای وجود دارد. در روش سبال، ابتدا نسبت G/R_n در نیم‌روز با استفاده از معادله تجربی باستینسن (رابطه (۳)) محاسبه می‌شود (Bastiaanssen, 2000; Allen et al., 2002).

رابطه (۳)

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98NDVI^4)$$

در این معادله، T_s دمای سطحی برحسب درجه سانتی‌گراد، α آلبدوی سطحی و NDVI شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی است. مقدار G با ضرب کردن نسبت بالا در R_n به دست می‌آید.

۲-۳-۳- شار گرمای محسوس (H)

پیچیده‌ترین مرحله در الگوریتم سبال محاسبه شار گرمای محسوس است که طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{R_{ah}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این معادله، ρ چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا (1004 J/kg/k)، dT اختلاف دمای هوای نزدیک سطح (k) و R_{ah} مقاومت آیرودینامیک برای انتقال گرما است (s/m). حل معادله شار گرمای محسوس با وجود دو مجهول (dT و R_{ah}) پیچیده است. در روش سبال، برای برآورد شار گرمای محسوس، ابتدا دو پیکسل آستانه با نام پیکسل‌های سرد و گرم انتخاب می‌شود.

بازسازی شاخص NDVI و دمای سطح زمین نیازمند سری زمانی کامل یک‌ساله است. بنابراین، نخست، از ۲۳ تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ در سال ۲۰۱۵ استفاده و سری‌های زمانی یک‌ساله شاخص NDVI و دمای سطح زمین ایجاد شد. سپس، سری‌های زمانی ایجاد شده این دو متغیر با استفاده از الگوریتم‌های SSA و HANTS بازسازی شد. با توجه به طولانی بودن بحث بازسازی داده‌های از دست رفته، برای به دست آوردن اطلاعات بیشتر می‌توان به پژوهش‌ها در این زمینه مراجعه کرد (Ghafarian Malamiri et al., 2018; Ghafarian Malamiri et al., 2020) (زارع خورمیزی و دیگران، ۱۳۹۶؛ غفاریان مالمیری و زارع خورمیزی، ۱۳۹۶). پس از رفع خطاها و داده‌های از دست رفته، به منظور محاسبه میزان تبخیر و تعرق، از پانزده تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ طی تاریخ ۱۳۹۳/۰۱/۰۱ تا ۱۳۹۴/۸/۲۰ استفاده شد که مربوط به یک چرخه رشد سالیانه پسته است.

۲-۳-۳- الگوریتم سبال

اساس الگوریتم سبال استفاده از معادله توازن انرژی (رابطه (۱)) و محاسبه مقدار شار لحظه‌ای گرمای نهان تبخیر است که باقی‌مانده این معادله برای هر پیکسل شمرده می‌شود (Bastiaanssen et al., 1998a, b).

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

در این معادله، λET_{inst} شار گرمای نهان تبخیر (W/m^2)، R_n میزان تابش خالص خورشیدی (W/m^2)، G شار گرمای خاک (W/m^2) و H شار گرمای محسوس (W/m^2) است.

۲-۳-۱- تابش خالص خورشیدی (R_n)

مقدار تابش خالص از توازن چهار شار تابشی در سطح زمین به دست می‌آید که عبارت‌اند از تابش طول موج کوتاه ورودی ($R_{S\downarrow}$)، بازتابش طول موج کوتاه خروجی ($R_{S\uparrow}$)، تشعشعات طول موج بلند ورودی ($R_{L\downarrow}$) و تشعشعات طول موج بلند گسیل شده از سطح ($R_{L\uparrow}$). تابش خالص لحظه‌ای در واحد سطح با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Allen et al., 2002).

۲-۶- برآورد تبخیر- تعرق واقعی محصول (ET_c)
براساس دستورالعمل فائو ۵۶

روش پنمن-مانتیت فائو روشی استاندارد در محاسبه تبخیر و تعرق مرجع است که بسیاری از محققان آن را تأیید کرده‌اند (Allen et al., 1998). معادله پنمن-مانتیت به صورت رابطه (۹) بیان می‌شود (Allen et al., 1998).
رابطه (۹)

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d U_2)}$$

در این رابطه، ET_o تبخیر و تعرق مرجع (mm/day)، R_n تابش خالص در سطح گیاه (MJ/m²/day)، G شار گرمای خاک (MJ/m²/day)، T میانگین دمای هوا در ارتفاع دومتری و برحسب درجه سانتی‌گراد، U₂ سرعت باد در ارتفاع دومتری (m/s)، e_s فشار بخار اشباع (kpa)، e_a فشار بخار واقعی (kpa)، Δ شیب منحنی فشار بخار (kpa/°C)، γ ضریب ثابت سایکرومتری (kpa/°C) و C_n و C_d ضرایب ثابتی است که با توجه به نوع گیاه مرجع و دوره محاسباتی تعیین می‌شود. تبخیر و تعرق استاندارد گیاه یا نیاز آبی استاندارد گیاه، با ضرب تبخیر و تعرق گیاه مرجع در ضریب گیاهی، طبق رابطه (۱۰) حاصل می‌شود (Allen et al., 1998).

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

ضریب گیاهی (K_c) با توجه به گونه گیاهی و دوره رشد آن تعیین می‌شود. در این زمینه، در پژوهشی، با بررسی فیزیولوژیکی گیاه پسته نشان داده شد که این گیاه سه مرحله رشد دارد (Goldhamer & Beede, 1993). مرحله اول از هنگام گرده‌افشانی تا زمانی را دربر می‌گیرد که پوست پسته بزرگ شده اما هنوز نرم است و استخوانی نشده است. رشد اندام‌های هوایی گیاه در مرحله دوم اتفاق می‌افتد. همچنین در این مرحله، پوست پسته ضخیم و سفت می‌شود. در مرحله سوم، دانه پسته به تدریج با مغز پر می‌شود. سپس دانه می‌رسد و پوست آن می‌ترکد. در این مرحله، پوست نازک بیرونی آن نیز از بین می‌رود. در منطقه مطالعاتی، آغاز نخستین مرحله دوره رشد پسته

سپس، شار گرمای محسوس در روند محاسبه‌ای تکراری تصحیح می‌شود (Allen et al., 2002).

۲-۴- تبخیر و تعرق روزانه

تبخیر و تعرق براساس معادله بیلان انرژی در لحظه گذر ماهواره محاسبه می‌شود. این مقدار باید به تبخیر و تعرق روزانه تبدیل شود. برای این منظور، کسر تبخیری برای هر پیکسل تصویر طبق رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$\Lambda = \frac{\lambda ET}{R_n - G} \Rightarrow \Lambda = \frac{R_n - G - H}{R_n - G} \quad \text{رابطه (۵)}$$

با ثابت فرض کردن کسر تبخیر (Λ) در دوره ۲۴ ساعته، مقدار تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته (ET₂₄) طبق رابطه (۶) حاصل می‌شود.

$$ET_{24} = \frac{86400 \times \Lambda \times (R_n - G_{24})}{\lambda} \quad \text{رابطه (۶)}$$

مطابق این معادله، کسر تبخیر در طول روز ثابت فرض می‌شود؛ R_n تابش خالص روزانه (W/m²)، λ گرمای نهان تبخیر (J/kg) و G₂₄ شار گرمای روزانه خاک (W/m²) است.

۲-۵- برآورد تبخیر و تعرق در دوره‌های متفاوت فنولوژی

برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی پسته در بازه‌های زمانی متفاوت، از رابطه (۷) استفاده شد. در این معادله، ET_{a-day} تبخیر و تعرق واقعی در روز گذر ماهواره، (ET_o)_i تبخیر و تعرق گیاه مرجع در روز i و n تعداد روزهای دوره زمانی مورد نظر است (Allen et al., 2002).

$$(ET_{a-period})_i = \frac{ET_{a-day}}{(ET_o)_i} \sum_{i=1}^n (ET_o)_i \quad \text{رابطه (۷)}$$

با تجمع تبخیر و تعرق در دوره‌های متفاوت فنولوژی پسته، مقدار تبخیر و تعرق واقعی این گیاه در یک دوره رشد کامل، با توجه به رابطه (۸)، محاسبه شد.

$$ET_{a-season} = \sum_{n=1}^n (ET_{a-period})_i \quad \text{رابطه (۸)}$$

بیشترین ضریب گیاهی (۱.۲) و خاک بدون پوشش دارای کمترین مقدار ضریب گیاهی (۰.۴) فرض شده است. این معادله مطابق رابطه (۱۱) است (Rocha et al., 2012; Zare & Koch, 2017; Inamdar et al., 2016; De Oliveira et al., 2009).

$$Kc = 1.25 \times NDVI + 0.2 \quad (11)$$

باید توجه داشت این رابطه در مورد مناطق خشک و نیمه خشک ایران صدق نمی کند زیرا، از یک سو، هیچ گاه پوشش گیاهی پسته با توجه به فواصل کاشت به مقدار $NDVI = 0.8$ نمی رسد و مزارعی مانند گندم و یونجه تقریباً بیشترین $NDVI = 0.8$ را دارند (Rocha et al., 2012). از دیگر سو، شرایط اقلیمی منطقه (درصد رطوبت و سرعت باد) در این رابطه لحاظ نشده است. به عبارت دیگر، Kc دو مزرعه با $NDVI$ یکسان، اما یکی در منطقه مرطوب و دیگری در اقلیم خشک، کاملاً متفاوت است. بنابراین، در این پژوهش ضریب تعدیل Kc فائو، که برای مناطق خشک و نیمه خشک در دور میانی و پایانی رشد در نظر گرفته شده بود، با رابطه (۱۱) جمع شد. Kc نهایی را می توان به صورت رابطه (۱۲) تعریف کرد که به منزله معیاری استاندارد در تعیین تنش آبی به کار رفته است.

رابطه (۱۲)

$$Kc = (1.25NDVI + 0.2)$$

$$+ [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

در این رابطه، u_2 میانگین صورت باد روزانه در ارتفاع دومتری طی کل مرحله رشد یا مراحل رشد میانی یا پایانی (طبق بازه زمانی مورد استفاده) و RH_{min} نیز میانگین حداقل رطوبت نسبی روزانه در کل مرحله رشد یا مراحل رشد میانی یا پایانی است. این ضریب به صورت میانگین در کل یک دوره رشد، برای منطقه مورد مطالعه، ۰.۱۸۶ است. بنابراین، رابطه نهایی در منطقه مورد نظر، با توجه به اقلیم خشک آن و میانگین سرعت باد و میانگین حداقل رطوبت نسبی، مطابق رابطه (۱۳) است.

$$Kc = 1.25NDVI + 0.386 \quad (13)$$

نیمه فروردین و پایان دوره سوم انتهای شهریور بود اما تأمین نیاز آبی این گیاه به همین دوره محدود نمی شود بلکه در دوره برداشت محصول و در دوره پس از برداشت نیز به آبیاری مداوم نیاز دارد. بنابراین، دوره برداشت و پس از برداشت به منزله چهارمین مرحله فنولوژی در نظر گرفته شد (دستورانی و دیگران، ۱۳۹۱). بدین ترتیب، انتهای آبان هر سال انتهای دوره رشد این گیاه محسوب می شود.

۲-۷- تعیین ضریب گیاهی

ضریب گیاهی پیشنهادی طبق دستورالعمل نشریه فائو ۵۶، برای پسته، در مراحل رشد اولیه و مرحله میانی و پایانی رشد، به ترتیب ۰.۴ و ۱.۱ و ۰.۴۵ است (Allen et al., 1998). این ضرایب متعلق به شرایط استاندارد و در منطقه نیمه مرطوب با میانگین سرعت باد ۲ متر بر ثانیه است. بنابراین، ضریب یادشده باید، طبق شرایط مزرعه مورد مطالعه، اصلاح شود. این اصلاحات با استفاده از روابط بیان شده در دستورالعمل فائو ۵۶ در هر یک از سه مرحله رشد انجام شد.

۲-۸- تعیین رابطه Kc - $NDVI$

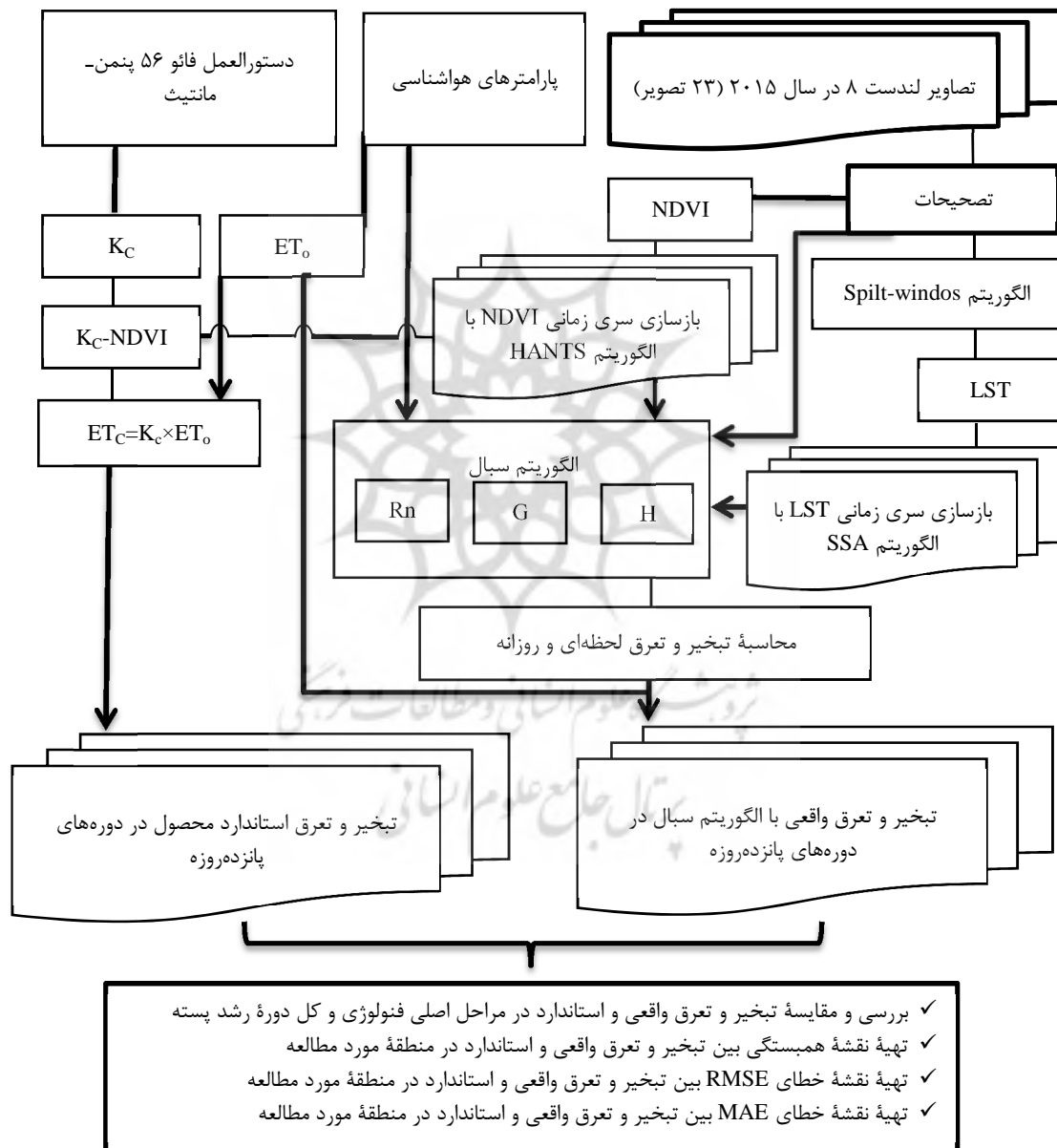
بر اساس شرایط طبیعی در باغات پسته، متغیرهای گوناگون پوشش گیاهی همچون درصد تاج پوشش و سن گیاه ممکن است با شرایط استاندارد نشریه فائو ۵۶ متفاوت باشد. بنابراین، Kc به دست آمده طبق دستورالعمل فائو ۵۶ به صورت نقطه ای و در شرایط استاندارد اجرایی است و نمی توان آن را در مناطق وسیع با تغییرات درصد پوشش گیاهی به کار برد. پژوهشگران برای رفع این مشکل از رابطه بین Kc و شاخص های گوناگون پوشش گیاهی سنجش از دور استفاده کردند (Farg et al., 2012; Oliveira et al., 2016; El-Shirbeny et al., 2014; Reyes-Gonzalez et al., 2015).

با توجه به بررسی منابع، در زمینه Kc گیاه پسته و شاخص های گیاهی سنجش از دور رابطه ای تعیین نشده است. اما رابطه ای عمومی و کلی در این زمینه وجود دارد؛ به این صورت که $NDVI$ با مقدار ۰.۸ دارای

هادی زارع خورمیزی و همکاران

از محاسبه تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد در دوره‌های پانزده‌روزه فنولوژی پسته، با جمع میزان تبخیر و تعرق طی این دوره‌ها، میزان تبخیر و تعرق در مراحل اصلی فنولوژی پسته و کل دوره رشد سالیانه محاسبه شد. روندنمای مراحل پژوهش حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است.

پس از محاسبه میزان تبخیر و تعرق واقعی روزانه در تاریخ‌های گذر ماهواره لندست ۸، میزان تبخیر واقعی در دوره‌های زمانی پانزده‌روزه فنولوژی پسته به دست آمد. همچنین، طبق روش فائو ۵۶ پنمن-مانتیت و استفاده از رابطه K_C -NDVI، مقدار تبخیر و تعرق استاندارد در دوره‌های زمانی پانزده‌روزه تعیین شد. پس



شکل ۲. روندنمای کلی مراحل پژوهش

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی میزان تبخیر و تعرق با رویکرد فائو ۵۶ جدول ۱ مراحل گوناگون فنولوژی و تاریخ وقوع آنها و نیز ضریب گیاهی، تبخیر و تعرق گیاه مرجع و استاندارد را در سال ۲۰۱۵ نشان می‌دهد. فنولوژی پسته را به صورت کلی می‌توان به پانزده مرحله پانزده روزه تقسیم کرد (دستورانی و دیگران، ۱۳۹۱) (Goldhamer, 2005). به طور کلی در منطقه مورد مطالعه، میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع طی سال ۲۰۱۵ برابر با ۱۷۲۶ میلی‌متر است. میزان تبخیر و تعرق گیاه پسته در شرایط استاندارد با رویکرد فائو ۵۶، ۱۵۸۱ میلی‌متر است. با توجه به جدول ۲، تقریباً ۵۰٪ تبخیر و تعرق در مرحله سوم فنولوژی و ۷۸٪ تبخیر و تعرق در مرحله دوم و سوم آن رخ می‌دهد زیرا پسته، در این دو مرحله، به حداکثر رشد و سبزیگی و درصد پوشش می‌رسد؛ بنابراین، ضرایب گیاهی آن افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر در این دو مرحله، با توجه به اقلیم خشک منطقه، تبخیر و تعرق گیاه مرجع به شدت افزایش خواهد یافت.

۲-۹- ارزیابی نتایج

به منظور ارزیابی نتایج و همچنین تفکیک و تعیین تفاوت‌های بین تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد و شناسایی مناطق تحت تنش خشکی، از خطای جذر میانگین مربعات و میانگین خطای مطلق و ضریب تبیین بین مقادیر تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد استفاده شد. ضریب تبیین با استفاده از رابطه (۱۴) به دست آمد.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{err}}{SS_{tot}} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

در این رابطه، SS_{err} و SS_{tot} طبق روابط (۱۵) و (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$SS_{err} = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

RMSE و MAE نیز با استفاده از روابط (۱۷) و (۱۸) محاسبه شد. در این روابط، x_i و y_i به ترتیب داده‌های تبخیر و تعرق واقعی سبال و داده‌های تبخیر و تعرق استاندارد هستند.

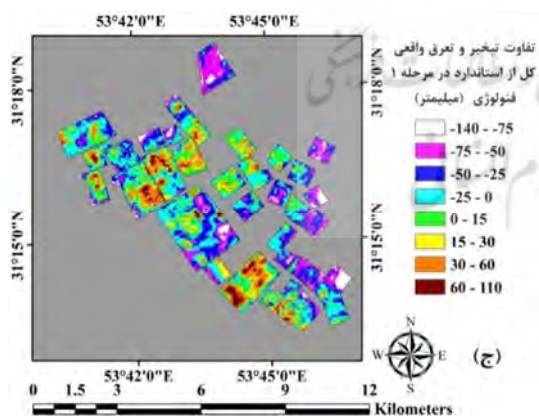
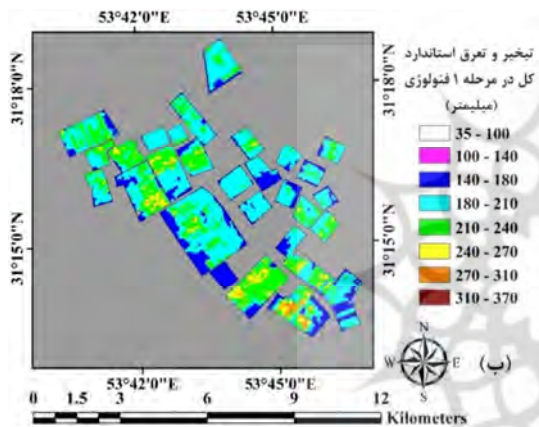
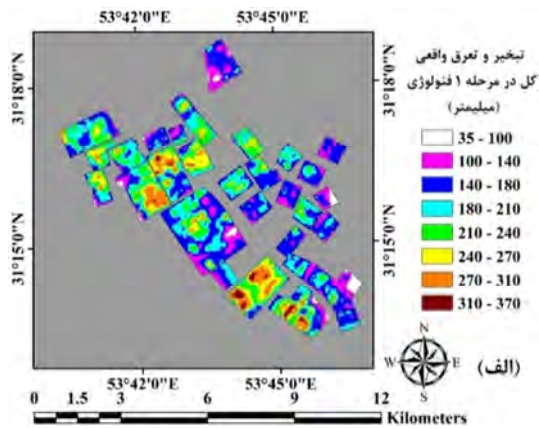
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

جدول ۱. چهار مرحله اصلی فنولوژی پسته و دوره‌های پانزده روزه فنولوژی به همراه ضرایب K_C و تبخیر و تعرق گیاه مرجع

مرحله	فنولوژی	دوره وقوع	ET_c (mm)	K_C (mm)	ET_o (mm)	$\sum ET_c$ (mm)
۱	گل‌دهی	۱۵ تا ۳۱ فروردین	۳۱.۷	۰.۳	۱۰۵.۹	
مرحله ۱	۲ حضور برگ	۱ تا ۱۵ اردیبهشت	۴۷.۷	۰.۴۳	۱۱۰.۹	۱۶۰
	۳ حجیم‌شدن پوست	۱۶ تا ۳۱ اردیبهشت	۸۰.۶	۰.۶۸	۱۱۸.۵	
مرحله ۲	۴ استخوانی‌شدن پوست ۱	۱ تا ۱۵ خرداد	۱۲۷.۰	۰.۹۳	۱۳۶.۶	
	۵ استخوانی‌شدن پوست ۲	۱۶ تا ۳۱ خرداد	۱۷۱.۳	۱.۱	۱۵۵.۷	۴۷۵.۵
	۶ استخوانی‌شدن پوست ۳	۱ تا ۱۵ تیر	۱۸۰.۲	۱.۱۷	۱۵۴.۰	
مرحله ۳	۷ پرشدن دانه ۱	۱۶ تا ۳۱ تیر	۱۸۰.۱	۱.۲۰	۱۵۰.۰	
	۸ پرشدن دانه ۲	۱ تا ۱۵ مرداد	۱۵۸.۶	۱.۲۰	۱۳۲.۱	
	۹ پرشدن و خندان‌شدن دانه	۱۶ تا ۳۱ مرداد	۱۷۶.۹	۱.۲۰	۱۴۷.۴	۷۶۱.۸
	۱۰ خندان‌شدن دانه	۱ تا ۱۵ شهریور	۱۴۱.۵	۱.۱۲	۱۲۶.۳	
	۱۱ ترکیدن پوست نازک بیرونی	۱۶ تا ۳۱ شهریور	۱۰۴.۷	۱	۱۰۴.۶	
برداشت و پس از	۱۲ برداشت	۱ تا ۱۵ مهر	۸۱.۳	۰.۸۷	۹۳.۵	
	۱۳ پس از برداشت ۱	۱۶ تا ۳۰ مهر	۵۶.۸	۰.۶۷	۸۴.۷	۱۸۳.۸
	۱۴ پس از برداشت ۲	۱ تا ۱۵ آبان	۲۹.۱	۰.۵۰	۵۸.۲	
	۱۵ پس از برداشت ۳	۱۶ تا ۳۰ آبان	۱۶.۶	۰.۳۵	۴۷.۴	
	جمع		۱۵۸۱		۱۷۲۶	۱۵۸۱

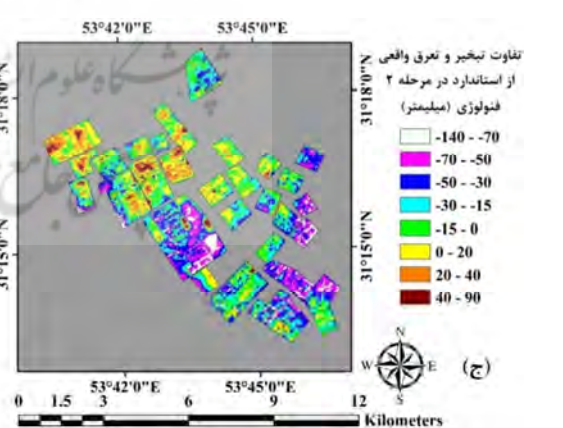
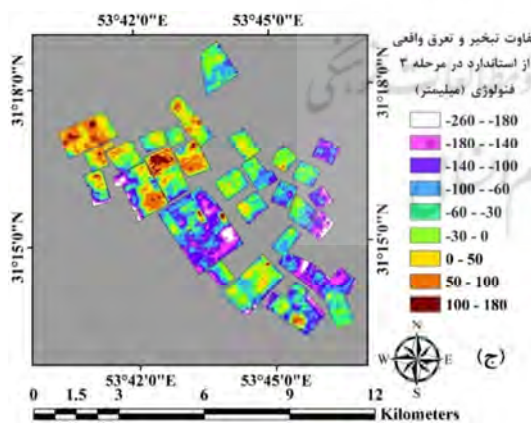
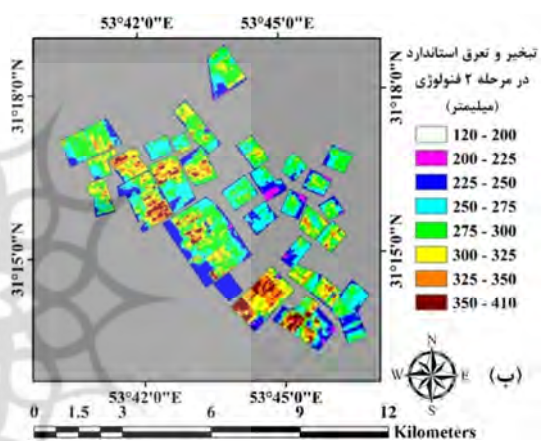
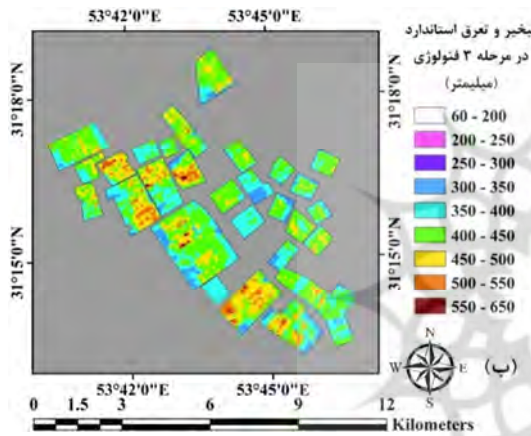
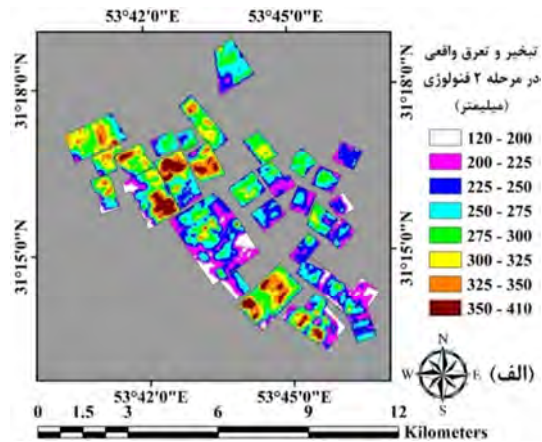
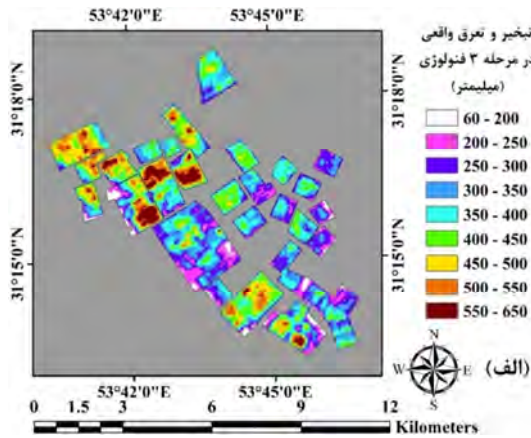
۳-۲- بررسی و مقایسه تبخیر و تعرق واقعی با استاندارد

رویکرد محاسبه تبخیر و تعرق استاندارد با توجه به نشریه فائو ۵۶ فقط درمورد مزارع استاندارد با پوشش یکنواخت می تواند مفید باشد (مانند پوشش یکنواخت گندم). با توجه به گستردگی منطقه مورد مطالعه و همچنین تغییرات سن، درصد پوشش و ارتفاع درختان پسته، تبخیر و تعرق واقعی را نمی توان با یک مقدار استاندارد (مانند جدول ۱) مقایسه کرد (زارع خورمیزی و غفاریان مالمیری، ۱۳۹۹). بنابراین، همان طور که در بخش مواد و روش ها توضیح داده شد، رابطه K_c با شاخص NDVI به کار رفت. در نتیجه، نقشه K_c برای هر دوره پنزده روزه فنولوژی با توجه به میزان NDVI تهیه شد و سپس، با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق گیاه مرجع، میزان تبخیر و تعرق استاندارد برای هر پیکسل تصویر در دوره های پنزده روزه به دست آمد. بعد از آن، با جمع تبخیر و تعرق در دوره های پنزده روزه، میزان تبخیر و تعرق در دوره های اصلی فنولوژی حاصل شد. در ادامه، میزان تبخیر و تعرق واقعی به دست آمده از طریق الگوریتم سبال و میزان تبخیر و تعرق استاندارد به دست آمده با رویکرد K_c -NDVI و نیز اختلاف آنها در هریک از چهار مرحله اصلی فنولوژی به ترتیب در شکل های ۳ تا ۶ نشان داده شده است. باید توجه داشت که، برای تعیین اختلاف تبخیر و تعرق، همواره نقشه تبخیر و تعرق واقعی از استاندارد در هریک از دوره ها و مراحل کسر شده است. بنابراین، مناطق با مقادیر مثبت دارای شرایط نرمال و بدون تنش خشکی اند و مناطق با مقادیر منفی همان مناطق تحت تنش خشکی شمرده می شوند. به طور کلی و با توجه به شکل های ۳ تا ۶، در برخی از دوره های فنولوژی و در برخی باغات پسته، میزان تبخیر و تعرق واقعی از تبخیر و تعرق استاندارد کمتر است که وجود شرایط تنش خشکی در آن مکان و زمان را نشان می دهد.



شکل ۳. مجموع میزان تبخیر و تعرق واقعی سبال (الف)، تبخیر و تعرق استاندارد (ب) و اختلاف آنها (ج) در دوره ۱۵ فروردین تا ۳۱ اردیبهشت (مرحله اول فنولوژی)

برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال (SEBAL) ...



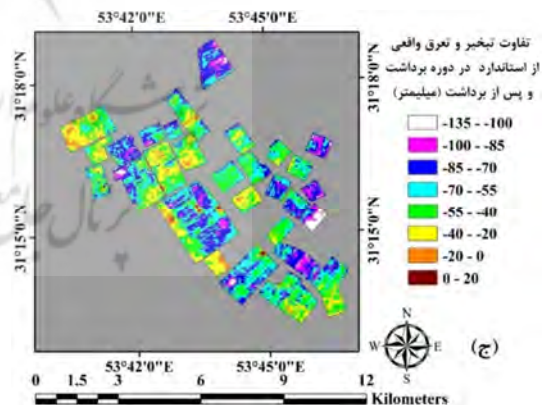
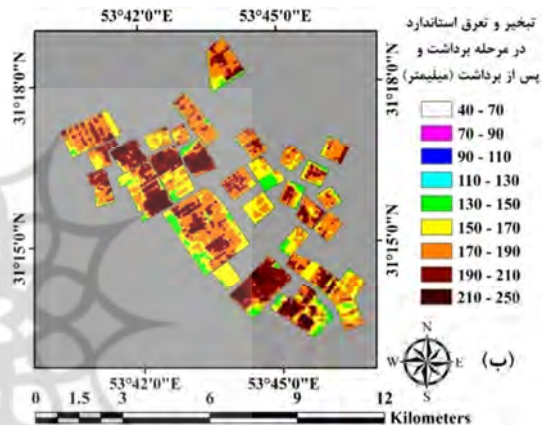
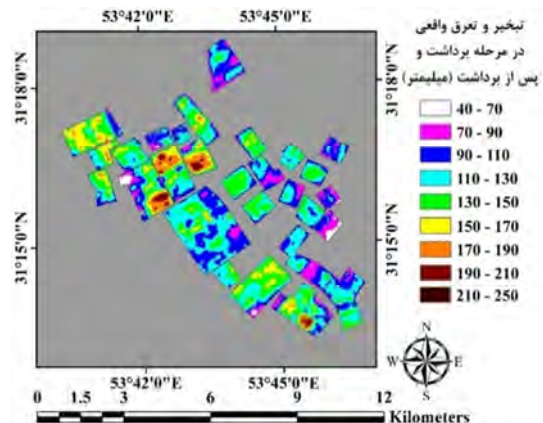
شکل ۵. مجموع میزان تبخیر و تعرق واقعی سبال (الف)، تبخیر و تعرق استاندارد (ب) و اختلاف آنها (ج) در دوره ۱۶ تیر تا ۳۱ شهریور (مرحله سوم فنولوژی)

شکل ۴. مجموع میزان تبخیر و تعرق واقعی سبال (الف)، تبخیر و تعرق استاندارد (ب) و اختلاف آنها (ج) در دوره ۱ خرداد تا ۱۵ تیر (مرحله دوم فنولوژی)

۳-۳- مقایسه تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد در طول یک فصل رشد پسته

شکل ۷ میزان تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد و همچنین اختلاف آنها را در طول یک فصل رشد پسته نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، تقریباً حداکثر میزان تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد ۱۶۲۰ میلی‌متر طی یک فصل رشد بوده که با الگوریتم سبال تخمین زده شده است. با توجه به جدول ۲، حداکثر تبخیر و تعرق استاندارد در طول یک فصل رشد، با رویکرد فائو ۵۶ (بدون رابطه K_C -NDVI)، ۱۵۸۱ میلی‌متر به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد رابطه K_C -NDVI، در مناطق دارای درصد پوشش گیاهی نزدیک به شرایط استاندارد فائو ۵۶، به‌درستی عمل کرده و بیشترین مقدار تبخیر و تعرق حاصل از رابطه K_C -NDVI به مقدار استاندارد فائو (۱۵۸۱ میلی‌متر) بسیار نزدیک است. میانگین میزان تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد در سطح منطقه مورد بررسی به ترتیب ۹۵۰ و ۱۰۸۶ میلی‌متر است. مقایسه تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد (شکل ۷) نشان می‌دهد، در بخش بزرگی از منطقه مورد مطالعه، تبخیر و تعرق واقعی پایین‌تر از شرایط استاندارد است که نشان از تنش خشکی در طول دوره رشد در این مناطق دارد.

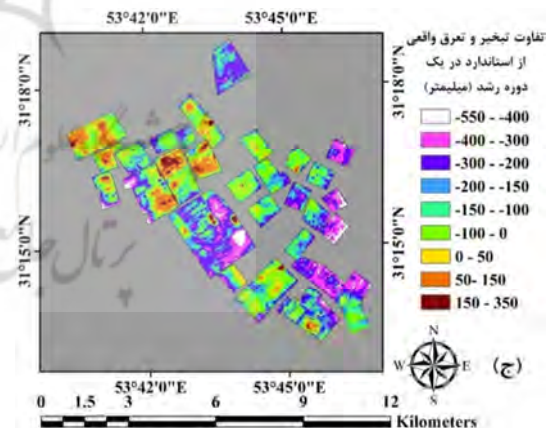
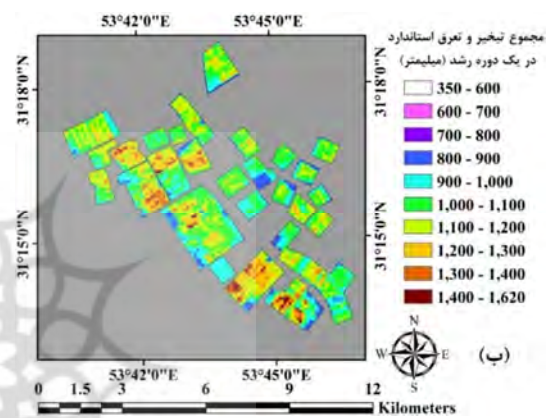
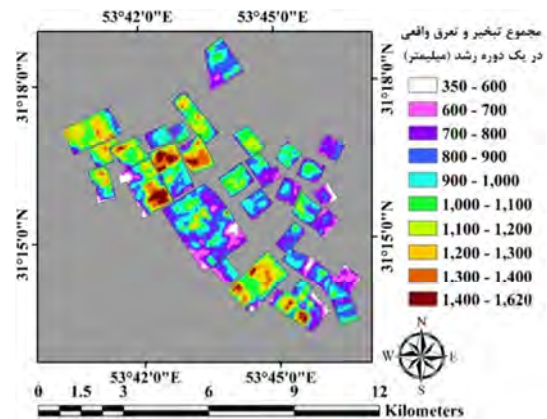
جدول ۲ مساحت و درصد از کل مساحت را در هر یک از کلاس‌های طبقه‌بندی شده در نقشه‌های شکل ۷ نشان می‌دهد. تبخیر و تعرق واقعی ۷۸٪ از سطح منطقه مورد مطالعه، در یک فصل رشد کامل، بین ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر است. با توجه به نقشه تبخیر و تعرق استاندارد فائو با رابطه K_C -NDVI، باید تبخیر و تعرق ۷۶.۸٪ سطح منطقه مورد مطالعه بین ۹۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر باشد. همچنین، در ۷۰٪ سطح این منطقه در یک فصل رشد، تبخیر بین ۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر و تعرق آن کمتر از شرایط استاندارد است.



شکل ۶. مجموع میزان تبخیر و تعرق واقعی سبال (الف)، تبخیر و تعرق استاندارد (ب) و اختلاف آنها (ج) در دوره ۱ مهر تا ۳۰ آبان (مرحله چهارم فنولوژی)

میانگین و انحراف معیار میزان تبخیر و تعرق واقعی از تبخیر و تعرق استاندارد، طی دوره‌های پانزده‌روزه در سطح کل مزارع، در شکل ۸ (سمت راست) نشان داده شده است. این شکل چند نکته مهم را می‌رساند؛ اول اینکه، در دوره زمانی شانزدهم خرداد تا پانزدهم مرداد، به‌طور میانگین تقریباً میزان تبخیر و تعرق واقعی به مقدار استاندارد نزدیک شده و در دوره اول اردیبهشت تا پانزدهم خرداد و از اول مرداد تا پایان فصل رشد، میزان تبخیر و تعرق واقعی از تبخیر و تعرق استاندارد کمتر است. دومین نکته این است که انحراف معیار تبخیر و تعرق واقعی، در مقایسه با استاندارد، در دوره‌های پانزده‌روزه بیشتر است. این موضوع یکنواخت نبودن آبیاری و مدیریت آبیاری در سطح کل منطقه را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که در برخی مناطق هدررفت آب و در برخی مناطق کمبود آب مشاهده می‌شود.

مجموع میزان تبخیر و تعرق واقعی و تبخیر و تعرق استاندارد در چهار مرحله اصلی فنولوژی و کل فصل رشد، به‌صورت میانگین در سطح کل مزارع پسته، در شکل ۸ (سمت چپ) نشان داده شده است. با توجه به شکل، در دوره ۱۵ تا ۳۱ اردیبهشت و اول خرداد تا پانزدهم تیر، تقریباً به‌صورت میانگین، میزان مجموع تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد یکسان بوده است. در دوره ۱۶ تا ۳۱ شهریور، تبخیر و تعرق واقعی از استاندارد ۱۱.۵٪ کمتر بوده و انحراف معیار نیز افزایش یافته که نشان‌دهنده فقدان مدیریت آبیاری در سطح کل منطقه است. در مرحله برداشت و پس از برداشت (اول مهر تا سی‌ام آبان) نیز، تبخیر و تعرق واقعی کمتر از استاندارد است. مجموع میزان تبخیر و تعرق استاندارد در یک دوره رشد پسته، به‌صورت میانگین، در سطح منطقه ۱۰۸۶ میلی‌متر است؛ در صورتی‌که میانگین میزان تبخیر و تعرق واقعی در سطح کل مزارع ۹۵۰ میلی‌متر است. میزان تبخیر و تعرق پسته در منابع گوناگون، با توجه به شرایط اقلیمی و مدیریت آبی مزرعه، متفاوت ذکر شده (دستورانی و دیگران، ۱۳۹۱) و به مقادیر ۸۰۰، ۶۰۰، ۱۰۱۸ میلی‌متر در برخی پژوهش‌های خارج از ایران اشاره شده است (Uina et al., 2005).



شکل ۷. مجموع میزان تبخیر و تعرق واقعی سبال (الف)، تبخیر و تعرق استاندارد (ب) و اختلاف آنها (ج) در دوره ۱۵ فروردین تا ۳۰ آبان (کل دوره رشد)

هادی زارع خورمیزی و همکاران

جدول ۲. مساحت و درصد مساحت هریک از کلاس‌های تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد و نیز اختلاف آنها (با توجه به شکل ۷)

تفاوت تبخیر و تعرق واقعی با استاندارد			نقشه تبخیر و تعرق استاندارد فائو (K _c -NDVI)			نقشه تبخیر و تعرق واقعی سبال		
درصد مساحت	مساحت (هکتار)	کلاس (mm)	درصد مساحت	مساحت (هکتار)	کلاس (mm)	درصد مساحت	مساحت (هکتار)	کلاس (mm)
۲.۴	۷۴.۸	-۵۵۰ - -۴۰۰	۰	۰	۳۵۰-۶۰۰	۲.۵	۷۷.۵	۳۵۰-۶۰۰
۹.۷	۳۰۴.۸	-۴۰۰ - -۳۰۰	۰	۰	۶۰۰-۷۰۰	۷.۰	۲۱۹.۳	۶۰۰-۷۰۰
۲۰.۰	۶۲۹.۵	-۳۰۰ - -۲۰۰	۰	۰	۷۰۰-۸۰۰	۱۵.۴	۴۸۵.۵	۷۰۰-۸۰۰
۱۳.۷	۴۳۲.۴	-۲۰۰ - -۱۵۰	۵.۴	۱۷۰.۶	۸۰۰-۹۰۰	۱۸.۹	۵۹۳.۴	۸۰۰-۹۰۰
۱۴.۷	۴۶۲.۶	-۱۵۰ - -۱۰۰	۲۰.۵	۶۴۶.۵	۹۰۰-۱۰۰۰	۱۸.۳	۵۷۷.۲	۹۰۰-۱۰۰۰
۲۳.۳	۷۳۴.۷	-۱۰۰ - ۰	۳۰.۸	۹۶۹.۳	۱۰۰۰-۱۱۰۰	۱۵.۰	۴۷۱.۱	۱۰۰۰-۱۱۰۰
۶.۸	۲۱۵.۵	۰ - ۵۰	۲۵.۵	۸۰۳.۶	۱۱۰۰-۱۲۰۰	۱۰.۵	۳۲۹.۰	۱۱۰۰-۱۲۰۰
۷.۸	۲۴۴.۱	۵۰ - ۱۵۰	۱۲.۵	۳۹۵.۳	۱۲۰۰-۱۳۰۰	۶.۶	۲۰۸.۴	۱۲۰۰-۱۳۰۰
۱.۵	۴۸.۰	۱۵۰ - ۳۵۰	۴.۲	۱۳۲.۰	۱۳۰۰-۱۴۰۰	۴.۰	۱۲۴.۶	۱۳۰۰-۱۴۰۰
-	-	-	۱.۰	۳۳.۰	۱۴۰۰-۱۶۲۰	۱.۹	۶۰.۷	۱۴۰۰-۱۶۲۰

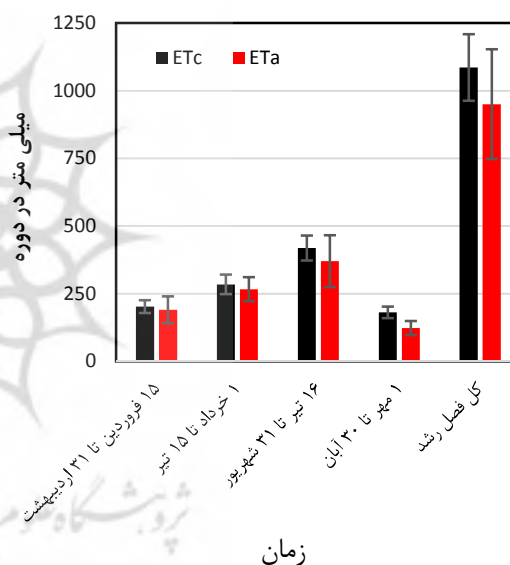
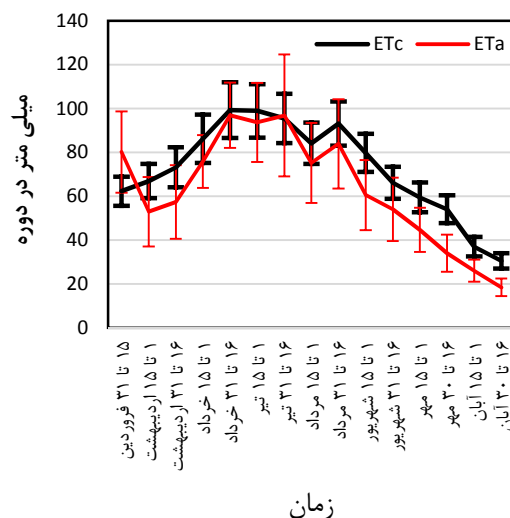
بسیار بیشتر از برآورد حاصل از تجزیه و تحلیل تعادل آب خاک (۷۵۹ میلی‌متر) بود. این تفاوت را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که تجزیه و تحلیل تعادل آب خاک برای ۱.۲ متر بالای خاک انجام شده؛ در حالی که ریشه‌های درختان پسته از آب لایه پایین نیز استفاده می‌کنند (Rahimian et al., 2014). در مطالعه‌های دیگر در استان یزد، مشخص شد که بیش از ۶۰٪ باغ‌های پسته مروت مصرف آب فصلی ۴۱۰ تا ۶۸۰ میلی‌متر (با میانگین ۵۹۴ میلی‌متر) دارند؛ در حالی که ET_o تجمعی و ET_c پسته، در مدت مشابه، ۱۵۵۸ میلی‌متر و ۹۲۰ میلی‌متر بود. به عبارت دیگر، درختان پسته این منطقه تحت تنش خشکی قرار دارند که باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود (Rahimian et al., 2019).

مقایسه تبخیر و تعرق واقعی با استاندارد نشان می‌دهد، در بیشتر منطقه مورد مطالعه، تبخیر و تعرق واقعی از شرایط استاندارد پایین‌تر است. بنابراین، باید توجه داشت که در برخی بخش‌های منطقه مورد مطالعه شرایط تنش خشکی برقرار است. در سایر مطالعات نیز، با استفاده از الگوریتم سبال، تبخیر و تعرق پسته تخمین زده شده و مناطق تحت تنش خشکی مشخص شده است. در مطالعه‌ای در منطقه اردکان یزد، میزان تبخیر و تعرق استاندارد فائو ۵۶ و واقعی، با استفاده از الگوریتم سبال، به ترتیب ۱۳۷۵ و ۱۱۳۳ میلی‌متر به دست آمد (دستورانی و دیگران، ۱۳۹۱). در منطقه باغات پسته اردکان یزد، تبخیر و تعرق پسته در فصل رشد سال ۲۰۱۲، با استفاده از الگوریتم سبال، ۱۲۷۵ میلی‌متر تخمین زده شد که

RMSE و MAE بین مقدار تبخیر و تعرق واقعی اندازه‌گیری شده طبق الگوریتم سبال، با تبخیر و تعرق استاندارد اندازه‌گیری شده با رویکرد K_C -NDVI فائو، نشان می‌دهد الگوریتم سبال توانسته میزان تبخیر و تعرق واقعی را به خوبی اندازه‌گیری کند و این دو روش با هم مطابقت خوبی دارند. به‌طور میانگین، میزان ضریب همبستگی، خطای RMSE و MAE بین تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد به ترتیب ۰.۸ و ۱۶.۷ و ۱۴.۵ میلی‌متر بین دوره‌های پانزده‌روزه است. البته باید توجه داشت مقایسه تبخیر و تعرق واقعی با استاندارد فائو نمی‌تواند میزان خطا در تعیین تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال را نشان دهد زیرا برای به‌دست آوردن تبخیر و تعرق واقعی با رویکرد فائو ۵۶، علاوه بر در نظر گرفتن ضریب گیاهی (K_C)، باید ضریب تنش (K_S) را هم در نظر گرفت. نکته دوم این است که، در شکل ۹، مناطق دارای بالاترین میزان ضریب تبیین (R^2) و کمترین میزان خطای RMSE و MAE نشان داده شده است. این مناطق به شرایط استاندارد نزدیک‌اند، آبیاری آنها مناسب و تنش خشکی در آنها حداقل است. اما مناطق و مزارع دارای همبستگی پایین و خطای RMSE و MAE بالا تحت تنش خشکی قرار دارند و آبیاری و میزان تبخیر و تعرق این مناطق از شرایط استاندارد فاصله دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مقدار تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال، در طول یک سال و نیز یک فصل رشد پسته، تعیین شد. سپس میزان تبخیر و تعرق واقعی حاصل از الگوریتم سبال با دستورالعمل نشریه فائو ۵۶، با رویکرد K_C -NDVI، در مراحل گوناگون فنولوژی پسته مقایسه شد. نتایج این پژوهش نشان داد الگوریتم سبال قابلیت مناسبی به منظور تعیین تبخیر و تعرق در منطقه مورد مطالعه دارد. هرچند در این منطقه داده‌های معتبر (لایسیمتر) برای مقایسه با نتایج الگوریتم سبال موجود نبود؛ مقایسه این نتایج با روش



شکل ۸. مقایسه میانگین و انحراف معیار میزان تبخیر و تعرق واقعی از تبخیر و تعرق استاندارد، طی دوره‌های پانزده‌روزه، در سطح کل مزارع (راست) و مجموع میزان تبخیر و تعرق واقعی و تبخیر و تعرق استاندارد در چهار مرحله اصلی فنولوژی و کل فصل رشد (چپ)

۳-۴- بررسی ضریب همبستگی و خطای RMSE و

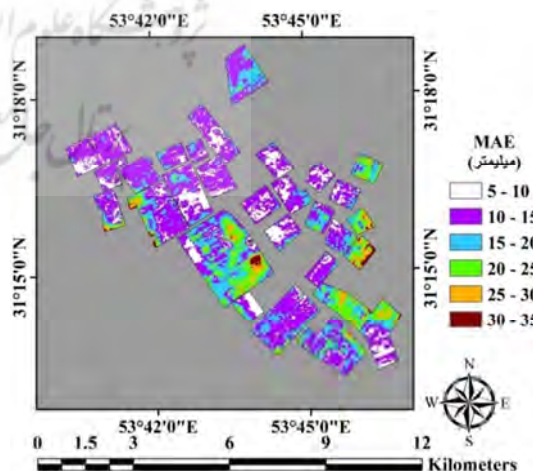
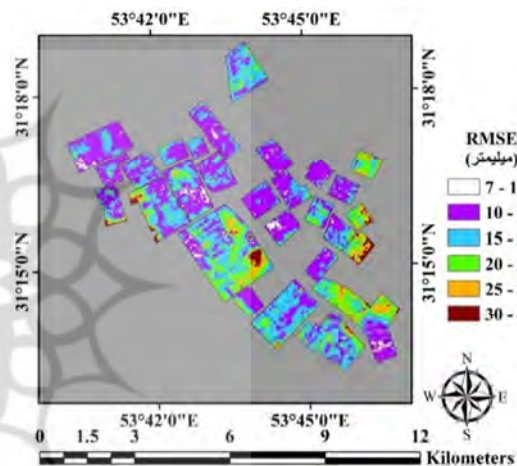
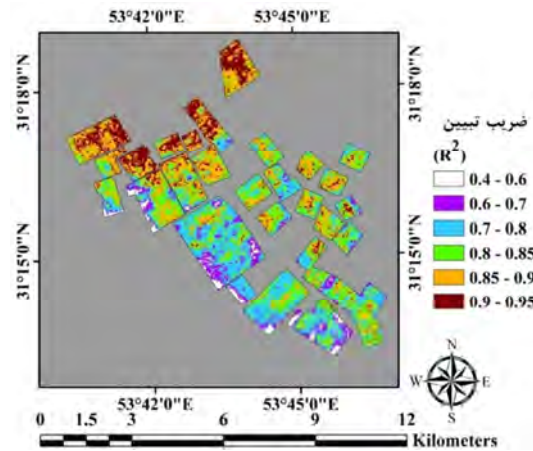
MAE بین تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد

نقشه میزان همبستگی (R^2) و خطای RMSE و MAE بین تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد در شکل ۹ نشان داده شده است. این شکل چند نکته مهم را بیان می‌کند. اول اینکه میزان همبستگی بالا و خطای پایین

استاندارد فائو ۵۶ نشان داد این دو روش مطابقت خوبی با یکدیگر دارند و بدین ترتیب، میانگین میزان ضریب تبیین، RMSE و MAE بین نتایج الگوریتم سبال و رویکرد فائو KC-NDVI به ترتیب ۰.۸، ۱۶.۷ و ۱۴.۵ میلی متر بین دوره‌های پانزده روزه (مقدار RMSE و MAE روزانه ۱.۱ و ۰.۹۶) فنولوژی پسته به دست آمد. همچنین، باید توجه داشت که میزان تبخیر و تعرق استاندارد با روش فائو ۵۶ همواره تبخیر و تعرق واقعی محصول را ارائه نمی‌دهد زیرا ممکن است عواملی مانند تنش آبی و شوری منجر به کاهش میزان تبخیر و تعرق محصول شود. برای رفع این مشکل، باید ضریب تنش (K_s) نیز در نظر گرفته شود. با در نظر گرفتن ضریب تنش در تبخیر و تعرق با روش فائو ۵۶، می‌توان تبخیر و تعرق واقعی محصول را به دست آورد. بنابراین، مقایسه تبخیر و تعرق واقعی سبال با تبخیر و تعرق استاندارد به روش فائو ۵۶ معیاری برای نزدیک شدن به شرایط استاندارد آبیاری است و نمی‌توان آن را معیاری مطلق برای ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی الگوریتم سبال محسوب کرد؛ مگر اینکه ضریب تنش نیز در نظر گرفته شود.

۵- منابع

دستورانی، م.، پورمحمدی، س.، رحیمیان، م.ح.، ۱۳۹۱، تخمین تبخیر-تعرق واقعی باغات پسته منطقه اردکان به کمک سنجش از دور، پژوهش آب در کشاورزی، دوره اول، شماره ۲۶، صص. ۱۳-۱. زارع خورمیزی، ه.، غفاریان مالگیری، ح.ر.، ۱۳۹۹، تخمین ضریب گیاهی و رابطه KC-NDVI گیاه پسته (*Pistacia vera* L.) با بهره‌گیری از سنجش از دور در حاشیه کویر ابرکوه یزد، مدیریت بیابان، دوره هشتم، شماره ۱۵، صص. ۱۰۱-۱۲۰. زارع خورمیزی، ه.، حسینی، س.ز.، مختاری م.ح.، غفاریان مالگیری، ح.، ۱۳۹۶، بازسازی سری‌های زمانی NDVI سنجنده MODIS با استفاده از



شکل ۹. نقشه میزان همبستگی، RMSE و MAE بین تبخیر و تعرق واقعی و استاندارد

دشت میان دربند)، نشریه آب و خاک، دوره بیست و هشتم، شماره ۱، صص. ۷۲-۸۱.

کرباسی، م، مقدم، م، نیکبخت، ج، کاویانی، ع، ۱۳۹۵، تخمین تبخیر و تعرق واقعی گیاه با استفاده از الگوریتم سبال (مطالعه موردی: منطقه خرمدره در استان زنجان)، اکوهیدرولوژی، دوره سوم، شماره ۳، صص. ۴۳۷-۴۲۷.

کریمی، ع، فرهادی بانسوله، ب، حسادی، ه، ۱۳۹۵، برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبس و تصاویر لندست در ماهیدشت، نشریه آب و خاک، دوره سی ام، شماره ۳، صص. ۷۱۶-۷۰۶.

میرزایی، ف، کشاورز، م، وظیفه دوست، م، ۱۳۹۷، توسعه الگوریتم SM-SEBAL به منظور محاسبه تبخیر و تعرق واقعی به کمک سنجش از دور، فصلنامه علمی- پژوهشی مهندسی منابع آب، دوره یازدهم، شماره ۳۸، صص. ۱۲۸-۱۰۷.

ولیزاده کامران، خ، لنگباف، م، ۱۳۹۷، برآورد تبخیر- تعرق واقعی ذرت با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و مدل سبال در منطقه خوزستان، نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره بیست و دوم، شماره ۶۵، صص. ۲۹۹-۲۸۷.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith M., 1998, **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements**, Irrigation and Drainage Paper, No. 56, FAO, Rome, Italy.

Allen, R.G., Waters, R., Tasumi, M., Trezza, R. & Bastiaanssen, W., 2002, **SEBAL, Surface Energy Balance Algorithms for Land, Idaho Implementation**, Advanced Training and Users Manual, Version 1.0.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A. & Jensen, M.E., 2011, **Evapotranspiration Information Reporting: I. Factors Governing Measurement Accuracy**, Agricultural Water Management, 98, PP. 899-920.

الگوریتم تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی (HANTS) (مطالعه موردی: استان یزد)، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، دوره بیست و یکم، شماره ۳، صص. ۲۵۵-۲۲۱.

زمانی ثانی، ا، خورانی، ا، صادقی لاری، ع، سدید، ج، ۱۳۹۶، ارزیابی برآورد تبخیر- تعرق گیاه گندم با استفاده از الگوریتم سبال (مطالعه موردی: ایستگاه تحقیقات کشاورزی شهرستان حاجی آباد)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره چهل و نهم، شماره ۴، صص. ۶۸۱-۶۶۷.

شرافتی، ع، ارزانی، ک، رضانی مقدم، م، ۱۳۹۲، ارزیابی گل‌دهی و میوه‌دهی دوازده رقم پسته (*Pistacia vera L.*) در شرایط آب‌وهوایی خراسان، به‌نژادی نهال و بذر، دوره بیست و نهم، شماره ۲، صص. ۲۵۶-۲۴۳.

عباس‌نژاد الجین، ا، درویش‌صفت، ع، ا، بذرافشان، ج، ۱۳۹۹، تهیه و ارزیابی نقشه‌های تبخیر و تعرق براساس داده‌های ماهواره لندست ۸ و مدل SEBAL در جنگل‌های هیرکانی (مطالعه موردی: جنگل‌های پل سفید و کیاسر)، نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، دوره هفتاد و سوم، شماره ۳، صص. ۲۷۰-۲۵۹.

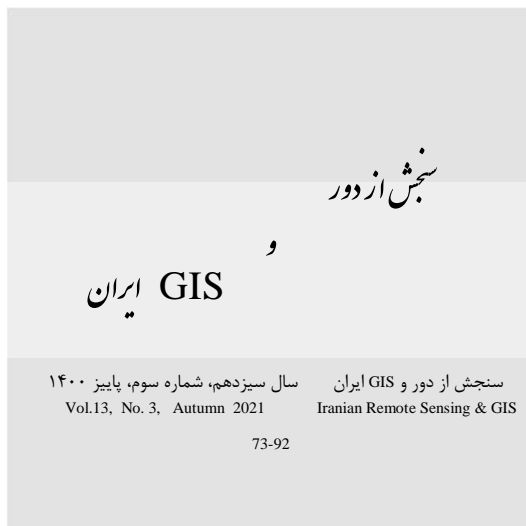
غفاریان مالمیری، ح، زارع خورمیزی، ه، ۱۳۹۶، بازسازی سری‌های زمانی داده‌های ماهواره‌ای دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی (HANTS)، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دوره هشتم، شماره ۳، صص. ۵۵-۳۷.

قمرنیا، ه، رضوانی س.و، ۱۳۹۳، محاسبه و پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با استفاده از الگوریتم سبال (SEBAL) در غرب ایران

- Bala, A., Rawat, K.S., Misra, A.K. & Srivastava, A., 2016, **Assessment and Validation of Evapotranspiration Using SEBAL Algorithm and Lysimeter Data of IARI Agricultural Farm**, India. Geocarto International, 31(7), PP. 739-764.
- Bastiaanssen, W.G.M., 2000, **SEBALbased Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey**, Journal of Hydrology, 229, PP. 87-100.
- Bastiaanssen, W.G., Menenti, M., Feddes, R.A. & Holtslag, A.A.M., 1998a, **A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL). 1. Formulation**, Journal of Hydrology, 212, PP. 198-212.
- Bastiaanssen, W.G., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink, G.J. & Van der Wal, T., 1998b, **A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 2: Validation**, Journal of Hydrology, 212, PP. 213-229.
- Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J. & Makin, I.W., 2000, **Remote Sensing for Irrigated Agriculture: Examples from Research and Possible Applications**, Agricultural Water Management, 46 (2), PP. 137-155.
- Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B.P. & Allen, R.G., 2005, **SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management Under Actual Field Conditions**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131(1), PP. 85-93.
- Bellvert, J., Adeline, K., Baram, S., Pierce, L., Sanden, B. & Smart, D., 2018, **Monitoring Crop Evapotranspiration and Crop Coefficients over an Almond and Pistachio Orchard throughout Remote Sensing**, Remote Sensing, 10(12), PP. 2001.
- Bezerra, B.G., Santos, C.A.C., Silva, B.B., Perez-Marin, A.M., Bezerra, M.V.C., Bezerra, J.R.C. & Ramana Rao, T.V., 2013, **Estimation of Soil Moisture in the Root-Zone from Remote Sensing Data**, Revista Brasileira de Ciência do Solo, 37, PP. 595-603.
- Bezerra, B.G., Silva, B.B., Santos, C.A.C.D. & Bezerra, J., 2015, **Actual Evapotranspiration Estimation Using Remote Sensing: Comparison of SEBAL and SSEB Approaches**, Advances in Remote Sensing, 4(3), PP. 234-247.
- Bouwer, L.M., Biggs, T.W. & Aerts, C.J.H., 2008, **Estimates of Spatial Variation in Evaporation Using Satellite-Derived Surface Temperature and a Water Balance Model**, Hydrological Processes, 22, PP. 670-682.
- De Oliveira, A.S., Trezza, R., Holzapfel, E.A., Lorite, I. & Paz, V.P.S., 2009, **Irrigation Water Management in Latin America**, Chilean Journal of Agricultural Research, 69(1), PP. 7-16.
- Elnmer, A., Khadr, M., Kanae, S. & Tawfik, A., 2019, **Mapping Daily and Seasonally Evapotranspiration Using Remote Sensing Techniques over the Nile Delta**, Agricultural Water Management, 213, PP. 682-692.
- El-Shirbeny, M.A., Ali, A.M., Badr, M.A. & Bauomy, E.M., 2014, **Assessment of Wheat Crop Coefficient Using Remote Sensing Techniques**, World Research Journal of Agricultural Sciences, 1(2), PP. 12-17.
- FAOSTAT, 2017, **FAO Statistics Database**, <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/Q/QC/E>. Accessed 20 Jan 2017.
- Farg, E., Arafat, S.M., El-Wahed, M.A. & El-Gindy, A.M., 2012, **Estimation of Evapotranspiration ETc and Crop Coefficient KC of Wheat, in South Nile Delta of Egypt Using Integrated FAO-56 Approach and Remote Sensing Data**, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 15(1), PP. 83-89.
- Gao Y., Long D. & Li Z.L., 2008, **Estimation of Daily Actual Evapotranspiration from Remotely Sensed Data under Complex Terrain over the Upper Chao River Basin in North China**, International Journal of Remote Sensing, 29 (11), PP. 3295-3315.
- Ghafarian Malamiri, H., Rousta, I., Olafsson, H., Zare, H. Zhang, H., 2018, **Gap-Filling of**

- MODIS Time Series Land Surface Temperature (LST) Products Using Singular Spectrum Analysis (SSA)**, Atmosphere, 9(9), PP. 334.
- Ghafarian Malamiri, H.R., Zare, H., Rousta, I., Olafsson, H., Izquierdo Verdiguier, E., Zhang, H. & Mushore, T.D., 2020, **Comparison of Harmonic Analysis of Time Series (HANTS) and Multi-Singular Spectrum Analysis (M-SSA) in Reconstruction of Long-Gap Missing Data in NDVI Time Series**, Remote Sensing, 12(17), P. 2747.
- Goldhamer, D.A., 2005, **Tree Water Requirements and Regulated Deficit Irrigation**, Pistachio Production Manual, 4, PP. 103-116.
- Goldhamer, D.A. & Beede., R., 1993, **Results of Four Years of Regulated Deficit Irrigation on Deep Rooted Pistachio Trees**, Annual Report of the California Pistachio Industry, Crop Year 1992-93, California Pistachio Commission, Fresno, CA 107-110.
- Hargreaves, G.H., 1994, **Defining and Using Reference Evapotranspiration**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 120 (6), PP. 1132-1139.
- Inamdar, P., Singh, T.P., Metha, K. & Kumbhar, V., 2016, **Assessment of Irrigation and Agriculture Potential of the Krishna River Basin using Geospatial Techniques**, Indian Journal of Science and Technology, 9(44), PP. 1-9.
- Jaber, H.S., Mansor, S., Pradhan, B. and Ahmad, N., 2016, **Evaluation of SEBAL Model for Evapotranspiration Mapping in Iraq Using Remote Sensing and GIS**, International Journal of Applied Engineering Research, 11, PP. 3950-3955.
- Jiménez-Bello, M.Á., Castel, J.R., Testi, L. & Intrigliolo, D.S., 2015., **Assessment of a Remote Sensing Energy Balance Methodology (SEBAL) Using Different Interpolation Methods to Determine Evapotranspiration in a Citrus Orchard**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(4), PP. 1465-1477.
- Kamble, B., Irmak, A., Hubbarb, K. & Gowda, P., 2013, **Irrigation Scheduling Using Remote Sensing Data Assimilation Approach**, Advances in Remote Sensing, 2, PP. 258-268.
- Long, D., Singh, V.P. & Li, Z.L., 2011, **How Sensitive is SEBAL to Changes in Input Variables, Domain Size and Satellite Sensor?**, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116 (D21).
- Mendonça, J.C., Sousa, E.D., André, R.G.B., Silva, B.D. & Ferreira, N.D.J., 2012, **Assessment of Evapotranspiration in North Fluminense Region, Brazil, using Modis Products and Sebal Algorithm**, Evapotranspiration-Remote Sensing and Modeling, 1, PP. 1-18.
- Oliveira, T.C.D., Ferreira, E. & Dantas, A.A.A., 2016, **Temporal Variation of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Calculation of the Crop Coefficient (K_C) from NDVI in Areas Cultivated with Irrigated Soybean**, Ciência Rural, 46(9), PP. 1683-1688.
- Passioura, J.B., 2007, **The Drought Environment Physical, Biological and Agricultural Perspectives**, Journal of Experimental Botany, 58, PP. 113-117.
- Paul, G., Gowda, P.H., Vara Prasad, P.V., Howell, T.A., Staggenborg, S.A. & Neale, C.M., 2013, **Lysimetric Evaluation of SEBAL Using High Resolution Airborne Imagery from BEAREX08**, Advances in Water Resources, 59, PP. 157-168.
- Rahimian, M.H., Taghvaeian, S., Nouri, M.R., Tabatabaei, S.H., Mokhtari, M.H., Hasheminejad, Y. & Neshat, E., 2014, **Estimating Pistachio Evapotranspiration Using MODIS Imagery: A Case Study from Ardakan, Iran**, In World Environmental and Water Resources Congress, 2014, PP. 1784-1794.
- Rahimian, M.H., Shayannejad, M., Eslamian, S., Gheysari, M. & Jafari, R., 2019, **Daily and Seasonal Pistachio Evapotranspiration in**

- Saline Condition: Comparison of Satellite-Based and Ground-Based Results**, Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 47(5), PP. 777-787.
- Rahimzadegan, M. & Janani, A., 2019, **Estimating Evapotranspiration of Pistachio Crop Based on SEBAL Algorithm Using Landsat 8 Satellite Imagery**, Agricultural Water Management, 217, PP. 383-390.
- Rawat, K.S., Bala, A., Singh, S.K. & Pal, R.K., 2017, **Quantification of Wheat Crop Evapotranspiration and Mapping: A Case Study from Bhiwani District of Haryana, India**, Agricultural Water Management, 187, PP. 200-209.
- Reyes-Gonzalez, A., Hay, C., Kjaersgaard, J. & Neale, C., 2015, **Use of Remote Sensing to Generate Crop Coefficient and Estimate Actual Crop Evapotranspiration**, In 2015 ASABE Annual International Meeting (P. 1), American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Rocha, J., Perdigão, A., Melo, R. & Henriques, C., 2012, **Remote Sensing Based Crop Coefficients for Water Management in Agriculture**, Sustainable Development-Authoritative and Leading Edge Content for Environmental Management, PP. 167-192.
- Ruhoff, A.L., Paz, A.R., Collischonn, W., Aragao, L.E., Rocha, H.R. & Malhi, Y.S., 2012, **A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas**, Remote Sensing, 4(3), PP. 703-725.
- Ulna, M., Kanber, R., Steduto, P., Aydin, Y. & Diker., K., 2005, **Effects of Different Water and Nitrogen Levels on the Yield and Periodicity of Pistachio**, Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 29, PP. 39-49.
- Wagle, P., Bhattarai, N., Gowda, P. Kakani, V., 2017, **Performance of Five Surface Energy Balance Models for Estimating Daily Evapotranspiration in High Biomass Sorghum**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 128, PP. 192-203.
- Zare, M. & Koch, M., 2017, **Computation of the Irrigation Water Demand in the Miandarband Plain, Iran, Using FAO-56- and Satellite-Estimated Crop Coefficients**, Journal of Thai Interdisciplinary Research, 12(3), PP. 15-25.



Estimation of Actual Evapotranspiration Using SEBAL Algorithm and Comparison with Improved FAO 56 Standard Evapotranspiration with K_C -NDVI Relationship

Zare khormizi H.^{1*}, Tavili A.², Ghafarian Malamiri H.R.³

1. Ph.D. Student of Range Management, Faculty of Natural Resources, University of Tehran
2. Associate Prof., Dep. of Rehabilitation of Arid and Mountainous, Faculty of Natural Resources, University of Tehran
3. Assistant Prof., Dep. of Geography, Yazd University

Abstract

Monitoring the spatial and temporal variations of evapotranspiration is crucial for irrigation management and the crop water requirement, especially in arid and semi-arid areas. The purpose of the present study is to estimate the actual evapotranspiration using the SEBAL algorithm and compare it with the FAO 56 standard evapotranspiration to determine pistachio orchards under drought stress in Yazd province. To do so, Landsat 8 satellite images time series with 15 images in 2015 were used. At first, actual evapotranspiration was calculated in 15 days of pistachio phenology and then by summation of evapotranspiration in 15 days, total evapotranspiration was determined in four main stages of pistachio phenology covering the whole period of annual growth. The FAO 56 standard evapotranspiration was also obtained by using the K_C -NDVI relationship as the standard for comparing with actual evapotranspiration. Based on the results, SEBAL algorithm has an acceptable capability to determine the evapotranspiration rate in the study area. However, due to lack of valid Lysimeter data in the study area, It was not possible to validate the results of the SEBAL algorithm. But comparing the results with the FAO 56 standard method showed that the two methods are in good agreement with each other. In average, the coefficient determination, RMSE and MAE between the results of SEBAL algorithm and FAO K_C -NDVI approach were 0.8, 16.7 mm and 14.5 mm, respectively, for the 15-day of pistachio phenology stages. The average of actual and standard evapotranspiration rates during a pistachio growing season at the study area were 950 and 1086 mm, respectively. Comparison of actual and standard evapotranspiration shows that in most of the study area actual evapotranspiration is lower than standard conditions.

Keywords: Drought stress, Irrigation management, FAO 56, Pistachio, Crop coefficient.