



تخمین ضریب گیاهی و رابطه KC-NDVI گیاه پسته (*Pistacia vera* L.) با بهرگیری از سنجش از دور در حاشیه کویر ابرکوه یزد

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

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی مرتع، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

* نویسنده مسئول: hadi.zarekh@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۲

چکیده

تعیین نیاز آبی گیاه در مدیریت منابع آب کشاورزی بسیار مهم است. یکی از روش‌های ساده و موفق برای تعیین تبخیر و تعرق، روش فائو ۵۶ است. مشکل اصلی در این روش، تخمین ضریب گیاهی یا K_C به‌ویژه برای مناطقی است که از لحاظ متغیرهای مختلف پوشش گیاهی ناهمگن باشند. هدف از پژوهش حاضر تخمین ضریب گیاهی و رابطه K_C -NDVI گیاه پسته با نام علمی *Pistacia vera* L. با استفاده از سنجش از دور و دستورالعمل فائو ۵۶ در باغ‌های پسته حاشیه کویر ابرکوه استان یزد است. رابطه K_C -NDVI در تعیین نیاز آبی و مدیریت منابع آب کاربرد زیادی دارد. در پژوهش حاضر ابتدا تبخیر و تعرق واقعی گیاه پسته به‌وسیله خوارزمیک (الگوریتم) سیال در ۱۶ تاریخ مختلف مربوط به چرخه رشد یکساله پسته محاسبه شد. سپس با تقسیم مقدار تبخیر و تعرق واقعی بر تبخیر و تعرق گیاه مرجع نقشه‌های K_C تهیه شد. در پایان رابطه این نقشه‌ها با شاخص NDVI به‌دست آمد. بر پایه نتایج، بین ضریب گیاهی پسته و شاخص NDVI همبستگی معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد ($P\text{-value} < 0.01$) وجود دارد. در ابتدا و انتهای دوره رشد پسته، کمترین مقدار همبستگی بین ضریب گیاهی پسته و شاخص NDVI به‌دست آمد و در میانه فصل رشد و اوج گرما و تبخیر و تعرق، بیشترین مقدار همبستگی مشاهده شد. به طور کلی ضریب گیاهی پسته با توجه به مقدار شاخص NDVI در منطقه مورد مطالعه بین دو حد ۰/۳ تا ۰/۹ قرار می‌گیرد. رابطه K_C و NDVI در مرحله: (۱) شروع رشد، (۲) توسعه رشد، (۳) مرحله میانی رشد، و (۴) برداشت و افول رشد به ترتیب به صورت $K_{C-1}=1.66 NDVI+0.261$ ، $K_{C-2}=1.29 NDVI+0.338$ ، $K_{C-3}=2.10 NDVI+0.147$ ، $K_{C-4}=1.21 NDVI+0.231$ است.

واژگان کلیدی: خوارزمیک سیال؛ ضریب گیاهی؛ تبخیر و تعرق؛ نیاز آبی؛ یزد

■ مقدمه

مدیریت منابع آب به دلیل افزایش جمعیت و تقاضای روز افزون آب به ویژه در خاورمیانه و ایران، که به عنوان مناطق خشک و نیمه خشک طبقه‌بندی می‌شوند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ایران به همراه کشورهای حوزه دریای مدیترانه به عنوان یکی از زیستگاه‌های اصلی پسته (*Pistacia vera* L.) در دنیا شناخته شده است (۴۳). این گیاه نقش مهمی در اقتصاد کشورهای خشک و نیمه خشک همچون ایران، ترکیه و سوریه دارد. ایران با مساحت برداشت ۳۱۶۷۸۰ هکتار بزرگترین تولید کننده پسته در جهان در سال ۲۰۱۴ می‌باشد (۱۵). به علت توانایی تحمل خشکی گیاه پسته با مقدار آب کم، دارای تولید با بازده متوسط است (۱۰)؛ با این حال مدیریت آبیاری در تولید دانه‌های با کیفیت بسیار مهم است (۱۰).

تبخیر و تعرق واقعی نماینده‌ای از نیازهای آبی گیاه می‌باشد (۱۶). برآورد تبخیر و تعرق گیاه ET_c و ضریب گیاهی محصول با استفاده از داده‌های سنجش از دور برای برنامه‌ریزی استفاده از آب آبیاری در مناطق خشک و نیمه خشک ضروری است. تبخیر و تعرق بر روی یک سطح همگن را با استفاده از روش‌های معمول مانند نسبت باون^۱، کوواریانس ادی^۲، بیلان آب و در سطح مزرعه با استفاده از لایسیمتر می‌توان اندازه‌گیری نمود (۵). این روش‌ها به طور معمول پر هزینه و وقت گیرند و قابلیت تعمیم به یک سطح وسیع ناهمگن را ندارند (۱۷). در چند دهه اخیر با گسترش و پیشرفت سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای، خوارزمیک‌های متعددی برای تعیین مقدار تبخیر و تعرق واقعی توسعه یافته‌اند. از معروف‌ترین این خوارزمیک‌ها می‌توان به سامانه بیلان انرژی SEBS^۳ (۴۵)، بیلان انرژی در سطح زمین SEBAL^۴ (۷ و ۸)، خوارزمیک SEBI^۵ (۳۰) و Metric^۶ (۲) اشاره کرد. در این زمینه خوارزمیک سبال یکی از پرکاربردترین روش‌های تعیین تبخیر و تعرق واقعی به کمک سنجش از دور است (۳۲). سبال یک الگوریتم سنجش از دوری است که تعادل انرژی سطحی لحظه‌ای را برای هر پیکسل از تصویر ماهواره‌ای انجام می‌دهد (۹).

پژوهش‌های بسیاری در مناطق مختلف جهان به بررسی دقت خوارزمیک سبال پرداخته‌اند (۵، ۲۶، ۲۷، ۳۸، ۳۹، ۴۶ و ۵۲). باستینسن و همکاران ادعا نمودند که خوارزمیک سبال توانسته است مقدار تبخیر تعرق را در ۴۰ بررسی انجام شده در ۲۵ کشور جهان، با دقت ۸۵ درصد در مقیاس روزانه و دقت ۹۵ درصد در مقیاس فصلی تخمین بزند (۶). در ایران نیز پژوهش‌های مختلفی به ارزیابی دقت خوارزمیک سبال پرداخته‌اند؛ به طور کلی نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد این خوارزمیک دارای دقت مناسبی می‌باشد (۲۱، ۳۰، ۳۳، ۴۸ و ۴۹).

یکی از روش‌های تجربی برای تعیین تبخیر تعرق گیاهان و محصولات زراعی، روش ذکر شده در نشریه فائو ۵۶ است (۳). این روش از گسترده‌ترین، موفقیت آمیزترین و ساده‌ترین روش برای برآورد تبخیر و تعرق گیاهان و مدیریت آبیاری می‌باشد (۱، ۳ و ۱۸). در این روش ابتدا تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش استاندارد پنمن - مانیتث محاسبه و سپس با استفاده از ضریب گیاهی یا K_c به تبخیر - تعرق واقعی گیاه تبدیل می‌شود (۳). ضریب گیاهی را می‌توان بر اساس شرایط اقلیم، مراحل مختلف رشد و نوع محصول بر پایه جداول مربوطه در نشریه فائو ۵۶ تعیین کرد (۳). با این حال تخمین K_c زمانی که درصد پوشش محصول، روش‌های آبیاری و دیگر عوامل در منطقه متفاوت باشد، پیچیده می‌شود (۱). بر اساس شرایط طبیعی ممکن است متغیرهای مختلف پوشش گیاهی هم‌چون درصد زیتوده (بیوماس) و پوشش گیاهی با شرایط استاندارد نشریه فائو ۵۶ متفاوت باشد. بنابراین دستورالعمل فائو ۵۶ به صورت نقطه‌ای و برای یک شرایط استاندارد عمل می‌کند. ضریب گیاهی به دوره‌های فنولوژیک و پویایی‌های پوشش گیاهی نظیر شاخص سطح برگ، مقدار سبزی‌نگی و درصد پوشش گیاهی بستگی دارد (۱۶). از آنجایی که دوره‌های فنولوژی و پویایی‌های گیاهی با شاخص‌های گیاهی در ارتباط هستند، شاخص‌های گیاهی از جمله NDVI^۱ جایگزینی را برای تخمین ضریب گیاهی فراهم می‌کند (۱۳، ۱۸، ۲۹ و ۴۴). در این زمینه پژوهش‌هایی به بررسی ارتباط بین ضریب

^۵ Surface Energy Balance Algorithm for Land^۶ Surface Energy Balance Index^۷ Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration^۱ Crop Evapotranspiration^۲ Bowen ratio^۳ Eddy Covariance^۴ Surface Energy Balance System

Kc به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۹ برای سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ به‌دست آمد (۲۹).

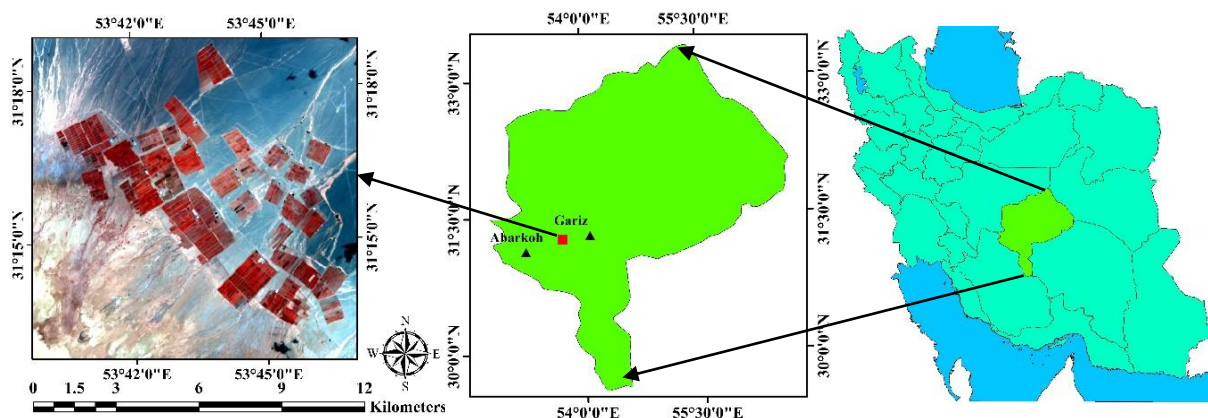
هدف از پژوهش حاضر تخمین ضریب گیاهی Kc و رابطه Kc و NDVI گیاه پسته (*Pistacia vera* L.) در مراحل مختلف فنولوژی می‌باشد. نتایج این پژوهش می‌تواند برای تخمین تبخیر و تعرق پسته و مدیریت آبیاری برای جلوگیری از تنش خشکی در اراضی پسته مناطق خشک مؤثر باشد.

■ مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی در پژوهش حاضر در استان یزد و در ۲۰ کیلومتری جنوب دهستان دهشیر واقع شده است. این منطقه بین عرض‌های جغرافیایی $31^{\circ}12'47''$ و $31^{\circ}11'09''$ و طول جغرافیایی $53^{\circ}47'15''$ و $53^{\circ}45'47''$ از نصف النهار مبدا قرار گرفته است (شکل ۱). وسعت کل منطقه مورد بررسی ۱۳۹۷۱ هکتار است که حدود ۳۱۶۰ هکتار آن باغ پسته است. میانگین بلند مدت بارندگی سالانه ایستگاه گاریز و ابرکوه (شکل ۱) به ترتیب ۱۰۶ و ۶۷ میلی‌متر است. میانگین کمینه و بیشینه دمای ماهانه در ماه‌های سرد و گرم سال به ترتیب در ایستگاه گاریز، $4/3^{\circ}\text{C}$ و $33/9^{\circ}\text{C}$ و در ایستگاه ابرکوه 1°C و $38/9^{\circ}\text{C}$ می‌باشد. به‌طور کلی منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم گرم و خشک است و این مقدار اندک بارندگی نیز در فصل زمستان که نیاز آبی حداقل است صورت می‌گیرد.

گیاهی و شاخص‌های گیاهی سنجش از دوری پرداخته‌اند. در مطالعه‌ای ضریب گیاهی گندم با نام علمی *Triticum aestivum* L. و تبخیر و تعرق آن ET_c با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای با داده‌های هواشناسی و شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و SAVI^۲ برآورد شد. نتایج این پژوهش نشان داد همبستگی خطی بین شاخص‌های NDVI و SAVI با ضریب گیاهی Kc وجود دارد. به طوری که مقدار همبستگی بین شاخص NDVI و Kc در مراحل اولیه رشد، مرحله میانی و پایانی رشد به ترتیب ۰/۸۲، ۰/۹۰ و ۰/۹۷ و همبستگی شاخص SAVI با Kc در مراحل نام برده شده ۰/۸، ۰/۸۶ و ۰/۹۶ می‌باشد (۱۶). در مطالعه‌ای دیگر نشان داده شد تغییر زمانی NDVI الگوی مشابهی با چرخه رشد گیاه دارند و مقدار Kc-NDVI سنجنده MODIS برای سویا (*Glycine max* L.) با مقدار Kc-FAO همبستگی خوبی داشتند ($R^2 = 0/72$) (۳۵). در بررسی دیگر رابطه خطی برای تعیین تبخیر و تعرق محصول گندم بین Kc FAO و Kc-NDVI با ضریب همبستگی ۰/۹۶ به‌دست آمد (۱۴). پژوهشی دیگر با هدف تولید Kc و تخمین تبخیر تعرق واقعی محصول ET_c در محصولات علوفه‌ای با استفاده از سنجش از دور در شمال مکزیک انجام شد. نتایج این پژوهش همبستگی ۰/۹۷ بین Kc-NDVI و Kc-FAO56 را برای محصول‌های یونجه (*Medicago sativa* L.) و ذرت (*Zea mays* L.) نشان داد (۳۹). در پژوهشی دیگری نیز رابطه خطی ساده بین شاخص NDVI سنجنده MODIS و ضریب Kc برای محصولات ذرت، گندم، سویا برقرار است. به طوری که ضریب همبستگی در این مطالعه بین شاخص NDVI و



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

^۱ Normalized Difference Vegetation Index

^۲ Soil-Adjusted Vegetation Index

داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده

در پژوهش حاضر از داده‌های ماهواره لندست ۸ استفاده شد. لندست ۸ دو سنجنده به نام‌های OLI^۱ و TIRS^۲ را حمل می‌کند. سنجنده OLI داده‌ها را به قدرت تفکیک مکانی ۳۰ m و ۸ باند در محدوده طیف مرئی، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز طول موج کوتاه و یک باند پانکروماتیک با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ m جمع‌آوری می‌کند. سنجنده TIRS با دو محدوده طیفی ۱۱/۲-۱۰/۶ و ۱۲/۵-۱۱/۵ میکرومتری به ترتیب برای باند ۱۰ و ۱۱ قادر به ثبت تابش‌های مادون قرمز حرارتی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ m می‌باشد (۲۵ و ۴۷). در پژوهش حاضر در ابتدا از ۲۳ تصویر ماهواره لندست ۸ در سال ۲۰۱۵ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۳) برای ایجاد سری زمانی یکساله استفاده شد. سپس تصحیح هندسی و رادیومتریکی بر روی تمام تصاویر انجام شد (۳۷).

در مرحله بعد داده‌های دور افتاده و از دست رفته توسط پوشش ابر در سری‌های زمانی با شاخص گیاهی NDVI و دمای سطح زمین^۳ به ترتیب با استفاده از خوارزمیک‌های HANTS^۴ و SSA^۵ بازسازی شد.

با توجه به طولانی بودن بحث مربوط به بازسازی داده‌های از دست رفته، می‌توان برای به دست آوردن اطلاعات بیشتر به پژوهش‌ها در این زمینه مراجعه شود (۱۹، ۲۰ و ۵۰). پس از رفع داده‌های از دست رفته و دور افتاده، از تصاویر تاریخ‌های ۱۳۹۳/۱۲/۲۵ تا ۱۳۹۴/۰۸/۲۰ استفاده شد. سبب محاسبه شد. تاریخ میلادی داده‌های مورد استفاده و معادل تاریخ شمسی آن در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱. تاریخ‌های میلادی و شمسی سری زمانی یکساله مورد استفاده

تاریخ میلادی تصویر	تاریخ شمسی تصویر	تاریخ میلادی تصویر	تاریخ شمسی تصویر	تاریخ میلادی تصویر	تاریخ شمسی تصویر
۲۰۱۵/۰۱/۱۱	۱۳۹۳/۱۰/۲۱	۲۰۱۵/۰۵/۱۹	۱۳۹۴/۰۲/۲۹	۲۰۱۵/۰۹/۲۴	۱۳۹۴/۰۷/۰۲
۲۰۱۵/۰۱/۲۷	۱۳۹۳/۱۱/۰۷	۲۰۱۵/۰۶/۰۴	۱۳۹۴/۰۳/۱۴	۲۰۱۵/۱۰/۱۰	۱۳۹۴/۰۷/۱۸
۲۰۱۵/۰۲/۱۲	۱۳۹۳/۱۱/۲۳	۲۰۱۵/۰۶/۲۰	۱۳۹۴/۰۳/۳۰	۲۰۱۵/۱۰/۲۶	۱۳۹۴/۰۸/۰۴
۲۰۱۵/۰۲/۲۸	۱۳۹۳/۱۲/۰۹	۲۰۱۵/۰۷/۰۶	۱۳۹۴/۰۴/۱۵	۲۰۱۵/۱۱/۱۱	۱۳۹۴/۰۸/۲۰
۲۰۱۵/۰۳/۱۶	۱۳۹۳/۱۲/۲۵	۲۰۱۵/۰۷/۲۲	۱۳۹۴/۰۴/۳۱	۲۰۱۵/۱۱/۲۷	۱۳۹۴/۰۹/۰۶
۲۰۱۵/۰۴/۰۱	۱۳۹۴/۰۱/۱۲	۲۰۱۵/۰۸/۰۷	۱۳۹۴/۰۵/۱۶	۲۰۱۵/۱۲/۱۳	۱۳۹۴/۰۹/۲۲
۲۰۱۵/۰۴/۱۷	۱۳۹۴/۰۱/۲۸	۲۰۱۵/۰۸/۲۳	۱۳۹۴/۰۶/۰۱	۲۰۱۵/۱۲/۲۹	۱۳۹۴/۱۰/۰۸
۲۰۱۵/۰۵/۰۳	۱۳۹۴/۰۲/۱۳	۲۰۱۵/۰۹/۰۸	۱۳۹۴/۰۶/۱۷		

^۳Land Surface Temperature^۴Harmonic ANALysis of Time Series^۵Singular Spectrum Analysis^۱Operational Land Imager^۲Thermal Infrared Sensor

خوارزمیک سبال

اساس خوارزمیک سبال استفاده از رابطه توازن انرژی (رابطه ۱) و محاسبه مقدار شار لحظه‌ای گرمای نهان تبخیر به عنوان باقیمانده این رابطه برای هر پیکسل می‌باشد (۷ و ۸). بنابراین مقدار شار گرمای نهان تبخیر برای هر پیکسل با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (۴).

$$\lambda ET_{inst} = R_n - G - H \quad (1)$$

در این رابطه λET_{inst} شار گرمای نهان تبخیر، R_n مقدار تابش خالص خورشیدی، G شار گرمای خاک و H شار گرمای محسوس می‌باشد. واحد تمامی این پارامترها بر حسب W/m^2 می‌باشد.

بدیهی است توضیح کامل این خوارزمیک در پژوهش حاضر مقدور نمی‌باشد و برای جزئیات کامل این خوارزمیک به راهنمای اصلی خوارزمیک سبال مراجعه شود (۴).

تابش خالص خورشیدی (R_n)

مقدار تابش خالص خورشید از توازن چهار شار تابشی در سطح زمین به دست می‌آید که عبارتند 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 ($R_{L\uparrow}$) محاسبه می‌گردد. در پژوهش حاضر تابش خالص لحظه‌ای در واحد سطح با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (۴).

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

در این رابطه، R_n تابش خالص خورشیدی بر حسب W/m^2 ، α آلبدوی سطح و ε_0 گسیلندگی سطح می‌باشد.

شار گرمای خاک (G)

شار گرمای خاک مقدار انتقال گرما در خاک و پوشش گیاهی بر اثر هدایت ملکولی است. محاسبه شار گرمای خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای دشوار است. اما مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که بین مقدار G/R_n و پارامترهایی چون NDVI و دمای سطح و آلبدو رابطه

وجود دارد. در پژوهش حاضر نسبت G/R_n در نیم روز با استفاده از رابطه تجربی ارائه شده توسط باستینسن (رابطه ۳) به صورت ذیل محاسبه شد (۴ و ۹).

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98NDVI^4) \quad (3)$$

در رابطه فوق، T_s دمای سطحی در حسب درجه سانتی‌گراد، α آلبدوی سطحی و NDVI شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی است. در پایان مقدار G با ضرب کردن نسبت فوق در R_n بدست آمد. شاخص گیاهی NDVI، مقدار پوشش گیاهی در سطح زمین را مشخص می‌کند (رابطه ۴) (۴۱).

$$NDVI = \frac{P_{NIR} - P_{RED}}{P_{NIR} + P_{RED}} \quad (4)$$

در این رابطه، P_{RED} و P_{NIR} به ترتیب باز تابش طیفی باند مادون قرمز نزدیک یا باند ۵ سنجنده OLI و باند قرمز یا باند ۴ سنجنده OLI می‌باشد. دامنه به دست آمده این شاخص از -۱ تا +۱ متغیر است.

شار گرمای محسوس (H)

در پژوهش حاضر مقدار شار گرمای محسوس با رابطه ۵ برآورد شد (۴).

$$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{R_{ah}} \quad (5)$$

در این رابطه ρ چگالی هوا بر حسب kg/m^3 ، C_p گرمای ویژه هوا بر حسب $J/kg/K$ ، dT اختلاف دمای هوای نزدیک سطح بر حسب کلون و R_{ah} مقاومت آئرونامیک برای انتقال گرما بر حسب ثانیه بر متر است. حل رابطه ۵ به دلیل وجود دو مجهول dT و R_{ah} کمی پیچیده است. برای حل این رابطه و رفع مشکل دو مجهول، ابتدا دو سلول سرد و گرم بر اساس دستور العمل سبال انتخاب و مقدار شار گرمای محسوس از روند تکراری تصحیح شد (۴).

محاسبه تبخیر و تعرق لحظه‌ای

پس از آنکه مقدار شار گرمای محسوس براساس شرایط جوی تصحیح گردید مقدار لحظه‌ای شار گرمای نهان تبخیر مطابق با رابطه ۱ برای هر پیکسل محاسبه شد و سپس با استفاده از رابطه ۶ مقدار لحظه‌ای تبخیر و تعرق یا ET_{inst} محاسبه شد.

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET_{inst}}{\lambda} \quad (۶)$$

در این رابطه ET_{ins} تبخیر و تعرق لحظه‌ای بر حسب λ mm/hr، شار گرمای نهان تبخیر بر حسب J/kg و عدد ۳۶۰۰ ضریب تبدیل زمان از ثانیه به ساعت است.

تبخیر و تعرق روزانه

تبخیر و تعرق محاسبه شده بر پایه رابطه بیلان انرژی در لحظه گذر ماهواره می‌باشد. این مقدار باید تبدیل به تبخیر و تعرق روزانه شود. برای این منظور کسر تبخیری برای هر سلول تصویر با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد.

$$\Lambda = \frac{\lambda ET}{R_n - G} \Rightarrow \Lambda = \frac{R_n - G - H}{R_n - G} \quad (۷)$$

با ثابت فرض کردن کسر تبخیر (Λ) در دوره ۲۴ ساعته، مقدار تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته با رابطه ۸ محاسبه شد.

$$ET_{24} = \frac{86400 \Lambda (R_n - G_{24})}{\lambda} \quad (۸)$$

بر طبق این رابطه کسر تبخیر در طول روز ثابت فرض شد، R_n تابش خالص روزانه بر حسب W/m^2 ، λ گرمای نهان تبخیر بر حسب J/kg و G_{24} شار گرمای خاک روزانه بر حسب W/m^2 است.

برآورد تبخیر-تعرق واقعی محصول (ET_c) بر اساس دستورالعمل فائو ۵۶

روش پنمن-مانتیت فائو به عنوان یک روش استاندارد در محاسبه تبخیر و تعرق مرجع در نظر گرفته شد و به

وسیله محققان زیادی تأیید شده است (۳ و ۳۴). معادله پنمن - مانتیت به صورت رابطه ۹ است (۳).

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d U_2)} \quad (۹)$$

در این رابطه ET_o تبخیر و تعرق مرجع بر حسب mm/day، R_n تابش خالص در سطح گیاه بر حسب MJ/m²/day، G شار گرمای خاک بر حسب MJ/m²/day، T میانگین دمای هوا در ارتفاع دو متری بر حسب سانتی گراد، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری بر حسب m/s، e_s فشار بخار اشباع و e_a فشار بخار واقعی بر حسب kpa، Δ شیب منحنی فشار بخار بر حسب kpa/°C، γ ضریب ثابت سایکرومتری بر حسب kpa/°C و C_n و C_d ضرایب ثابتی که با توجه به نوع گیاه مرجع و دوره محاسباتی تعیین می‌شود.

تبخیر و تعرق استاندارد گیاه با استفاده از روش فائو ۵۶ با ضرب تبخیر و تعرق گیاه مرجع در ضریب گیاهی (رابطه ۱۰) محاسبه می‌شود (۳). در نتیجه در پژوهش حاضر با تقسیم تبخیر و تعرق واقعی به دست آمده از طریق خوارزمیک سبال به تبخیر و تعرق گیاه مرجع ضریب K_c واقعی با توجه به رابطه ۱۱ محاسبه شد.

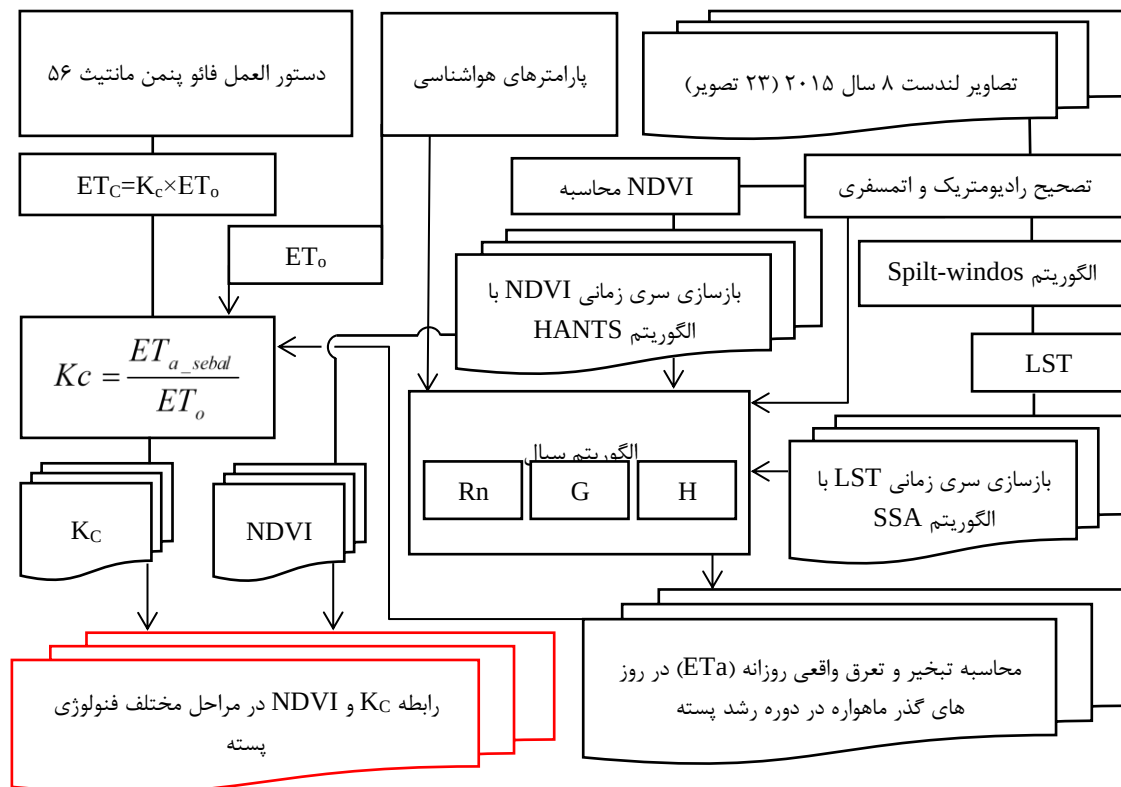
$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (۱۰)$$

$$K_c = \frac{ET_{a_sebal}}{ET_o} \quad (۱۱)$$

در مجموع با توجه به توضیحات ارائه شده، مقدار تبخیر و تعرق واقعی روزانه در دوره‌های زمانی ۱۶ روزه گذر ماهواره از تصاویر تاریخ‌های ۱۳۹۳/۱۲/۲۵ تا ۱۳۹۴/۰۸/۲۰ که مربوط به یک دوره رشد کامل پسته است، به دست آمد. سپس با توجه به دستورالعمل فائو ۵۶ با تقسیم تبخیر و تعرق واقعی سبال در روزهای گذر ماهواره به تبخیر و تعرق گیاه مرجع در همان روز نقشه ضریب گیاهی واقعی پسته (K_c) بدست آمد و در پایان روابط بین K_c و شاخص NDVI در دوره‌های زمانی ۱۶

مرحله اصلی فنولوژی و دوره‌های ۱۵ روزه فنولوژی پسته به همراه تاریخ وقوع آنها را با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته (۱۱ و ۲۲) نشان داده می‌شود (جدول ۲).

روزه گذر ماهواره و همچنین چهار مرحله اصلی فنولوژی به دست آمد. مراحل انجام پژوهش حاضر به طور خلاصه در روندنا نشان داده شده است (شکل ۲). در ادامه چهار



شکل ۲. روند نمای کلی از مراحل پژوهش

جدول ۲. دوره وقوع چهار مرحله اصلی فنولوژی پسته به همراه دوره‌های ۱۵ روزه فنولوژی

دوره وقوع	مرحله فنولوژی	مراحل اصلی فنولوژی
۱۵ تا ۳۱ فروردین	گلدهی و گرده افشانی	۱
۱ تا ۱۵ اردیبهشت	ظهور برگ	۲
۱۶ تا ۳۱ اردیبهشت	حجیم شدن میوه شفت	۳
۱ تا ۱۵ خرداد	استخوانی شدن درون بر ۱	۴
۱۶ تا ۳۱ خرداد	استخوانی شدن درون بر ۲	۵
۱ تا ۱۵ تیر	استخوانی شدن درون بر ۳	۶
۱۶ تا ۳۱ تیر	پر شدن دانه ۱	۷
۱ تا ۱۵ مرداد	پر شدن دانه ۲	۸
۱۶ تا ۳۱ مرداد	پر شدن دانه و شکاف درون بر	۹
۱ تا ۱۵ شهریور	شکاف درون بر	۱۰
۱۶ تا ۳۱ شهریور	شکاف درون بر و اپیکارپ	۱۱
۱ تا ۱۵ مهر	برداشت	۱۲
۱۶ تا ۳۰ مهر	پس از برداشت ۱	۱۳
۱ تا ۱۵ آبان	پس از برداشت ۲	۱۴

تعیین روابط K_C -NDVI و ارزیابی آن

مربوط همان دوره فنولوژی در نظر گرفته شد و نقشه‌های K_C به‌دست آمد و سپس با ضرب این نقشه‌ها در مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع در همان تاریخ، مقدار تبخیر و تعرق بر اساس روابط K_C -NDVI به‌دست آمد. در مرحله آخر نقشه RMSE با توجه به رابطه (۱۳) بین تبخیر و تعرق به‌دست آمده از طریق خوارزمیک سبال با تبخیر و تعرق به‌دست آمده از طریق روابط K_C -NDVI به‌دست آمد.

■ نتایج و بحث

مقدار تبخیر و تعرق واقعی در ۱۶ تاریخ مختلف در یک دوره رشد پسته در سال ۲۰۱۵ محاسبه شد. در ادامه تنها به عنوان نمونه در تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴ پارامترهای ورودی خوارزمیک سبال تشریح شد و در سایر تاریخ‌ها تنها روابط K_C -NDVI نشان داده می‌شود. تابش خالص خورشیدی و شار گرمای خاک برای تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴ محاسبه شد (شکل ۳). مناطق دارای پوشش گیاهی بالای پسته دارای شار تابش خالص خورشیدی بالاتر نسبت به مناطق بدون پوشش گیاهی می‌باشند (شکل ۳ راست). شار گرمای خاک مقدار انتقال گرما در داخل خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت ملکولی است. حداقل و حداکثر مقدار شار گرمای خاک برای تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴، ۸۴ و ۱۰۳/۵ وات بر متر مربع محاسبه شد (شکل ۳ چپ).

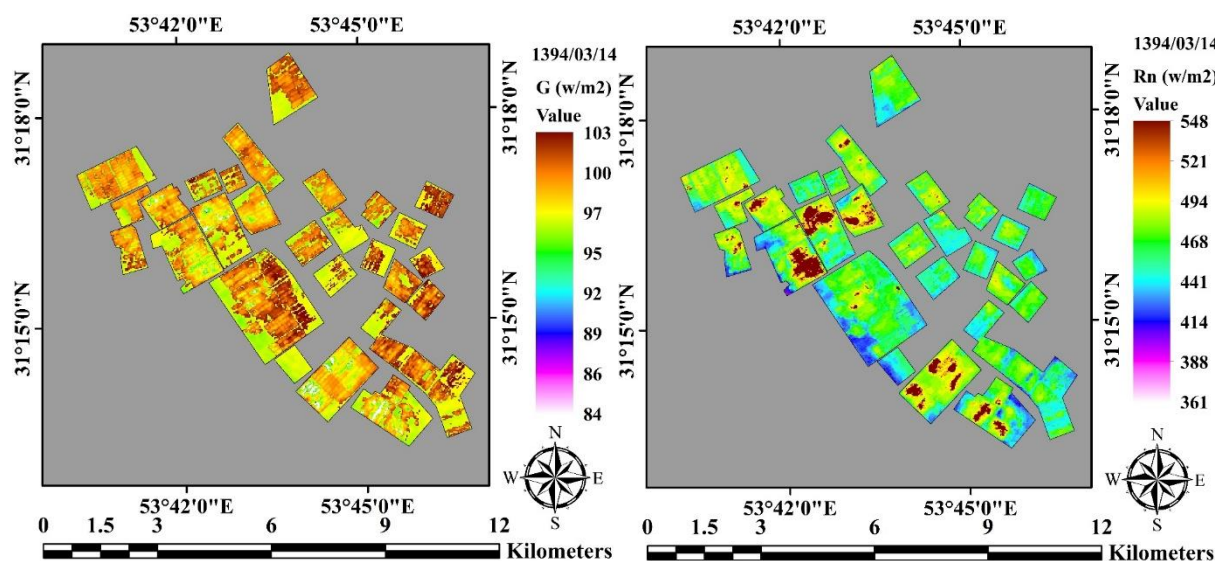
نوع رابطه و مقدار همبستگی بین ضریب گیاهی K_C و شاخص NDVI و خطای رابطه به ترتیب با استفاده از رگرسیون خطی ساده، ضریب تبیین (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات^۱ (RMSE) مورد بررسی قرار گرفت (به ترتیب رابطه ۱۲ و ۱۳).

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{err}}{SS_{tot}} \quad (12)$$

در این رابطه SS_{err} مجموع مربعات خطا و SS_{tot} مجموع کل مربعات است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (13)$$

در انتها به‌منظور ارزیابی روابط K_C -NDVI در طول چهار مرحله اصلی فنولوژی پسته، ۱۰ تصویر در سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ در تاریخ‌های مختلف به‌طور تصادفی انتخاب شد. سپس با استفاده از خوارزمیک سبال مقدار تبخیر و تعرق واقعی روزانه در تاریخ‌های تصاویر به‌دست آمد. همچنین مقدار تبخیر و تعرق پسته با استفاده از روابط K_C -NDVI و دستورالعمل فائو ۵۶ محاسبه شد. به‌طوری‌که در ابتدا شاخص NDVI در هر کدام از ۱۰ تاریخ محاسبه شد و سپس با توجه به تاریخ هر تصویر، رابطه K_C -NDVI



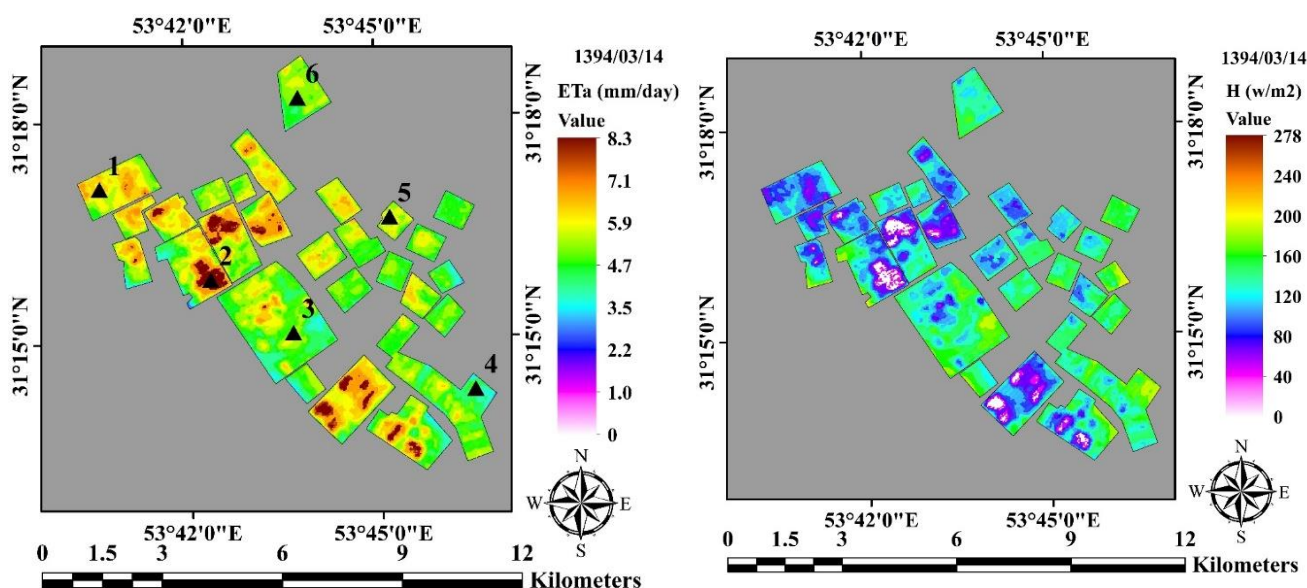
شکل ۳. یک نمونه تصویر تابش خالص خورشیدی (راست) و شار گرمای خاک (چپ) در تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴

¹ Root Mean Square Error

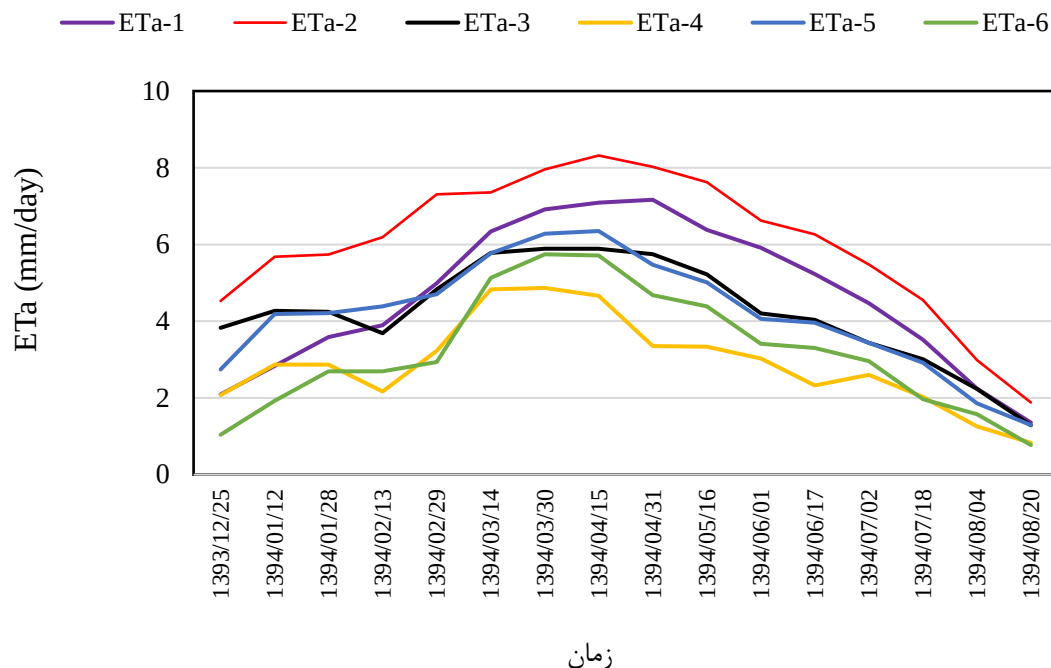
مناسبی می‌باشد (۲۱، ۳۰، ۳۱، ۴۸ و ۴۹). صحت‌سنجی برآورد تبخیر و تعرق از طریق مدل سبال با نتایج لایسیمتر زهکش‌دار کشت شده با یونجه در محدوده دشت شهرکرد نشان داد مقادیر شاخص RMSE و MAE نسبت به اندازه‌گیری‌های لایسیمتری به ترتیب برابر با ۱/۷ و ۱/۲ میلی‌متر در روز می‌باشد (۳۳). در مقایسه خوارزمیک سبال با مدل SWAP، ضرایب همبستگی ۰/۶۷ تا ۰/۹۱ بین خوارزمیک سبال با مدل SWAP نشان داد که خوارزمیک سبال قابلیت بیشتری در تخمین تبخیر و تعرق دارد (۴۸). ارزیابی برآورد تبخیر و تعرق گیاه گندم با استفاده از خوارزمیک سبال با داده‌های لایسیمتر نشان داد میانگین تفاضل مطلق بین نتایج یاد شده ۰/۷ میلی‌متر در روز و ضریب همبستگی ۰/۸۳ می‌باشد (۴۹). پژوهش‌های انجام شده در منطقه مورد مطالعه نیز بیشینه مقدار تبخیر و تعرق روزانه را با توجه به مقدار پوشش منطقه بین ۷ تا ۱۰ میلی‌متر تخمین زدند (۳۷ و ۳۸). این نتایج نیز تأیید کننده مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شده می‌باشد.

کمترین مقدار شار گرمای محسوس را پیکسل‌های سرد دارند که شامل زمین‌های کشاورزی با پوشش کامل و آبیاری شده است (شکل ۴ راست). این بدلیل مصرف انرژی خورشید در فرآیند فتوسنتز و تبخیر و تعرق است. در پیکسل‌های خاک خشک و عاری از پوشش گیاهی اختلاف بین دمای سطحی زمین با دمای هوای بالاتر از سطح زمین موجب می‌شود که شار محسوس بیشتری داشته باشند. بیشینه تبخیر و تعرق واقعی روزانه در تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴، ۸/۳ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۴ چپ). با توجه به تغییرات مقدار تبخیر و تعرق واقعی در شش نقطه (شکل ۴ چپ) در تاریخ‌های مختلف، بیشینه مقدار تبخیر و تعرق در تاریخ ۱۳۹۴/۰۴/۱۵ و کمینه آن در پایان فصل رشد با مقدار کمتر ۲ میلی‌متر در روز مشاهده می‌شود (شکل ۵).

هر چند در پژوهش حاضر داده معتبر مقدار تبخیر و تعرق برای اعتبار سنجی نتایج خوارزمیک سبال در دسترس نبود؛ با این حال در ایران پژوهش‌های مختلفی به ارزیابی دقت خوارزمیک سبال پرداخته‌اند؛ به‌طور کلی نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد این خوارزمیک دارای دقت



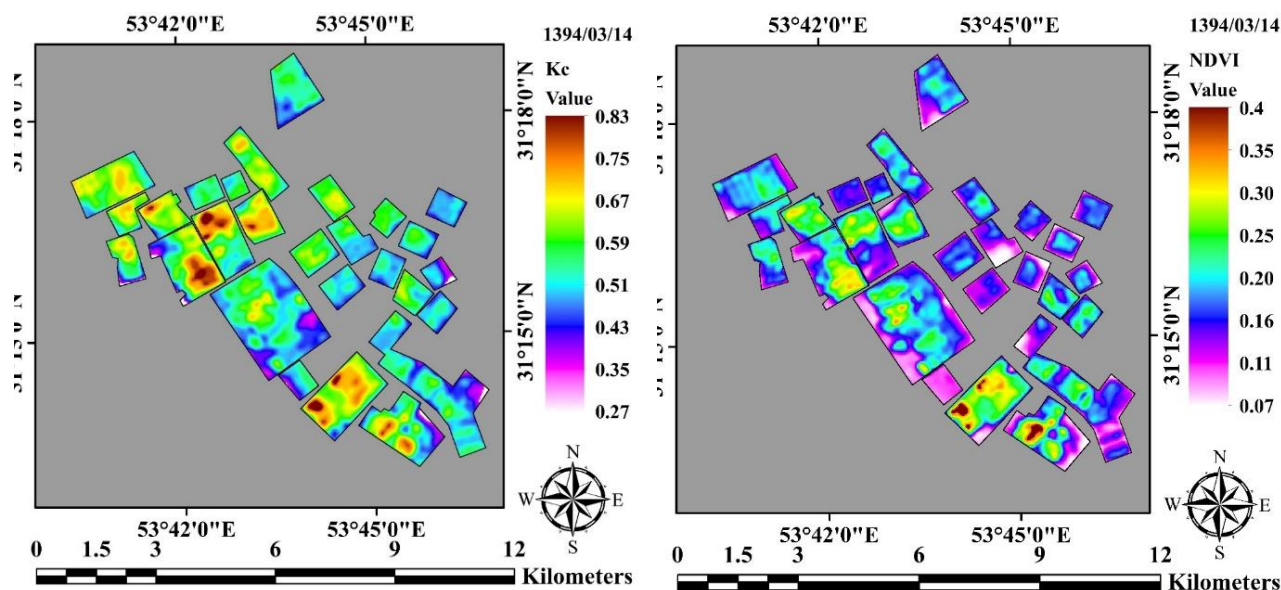
شکل ۴. یک نمونه تصویر شار گرمای محسوس (راست) و تبخیر و تعرق واقعی (چپ) در تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴



شکل ۵. تغییرات مقدار تبخیر و تعرق واقعی شش نقطه در ۱۶ تاریخ مختلف

تصویر شاخص NDVI و ضریب گیاهی پسته در تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴ نشان داده شده است (شکل ۶). بر اساس نتایج، مناطق با پوشش گیاهی بیشتر دارای ضریب K_c بیشتری نیز هستند (شکل ۶). کمینه و بیشینه ضریب گیاهی پسته در تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴ به ترتیب ۰/۳ و ۰/۸۵ بدست آمد.

با توجه به محاسبه مقدار تبخیر و تعرق واقعی در ۱۶ تاریخ مختلف در یک دوره رشد کامل پسته، ۱۶ تصویر K_c به دست آمد (رابطه ۱۱) و روابط شاخص NDVI و K_c در ۱۶ تاریخ مختلف به صورت مکانی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به حجم کار و تعدد تصاویر به عنوان یک نمونه

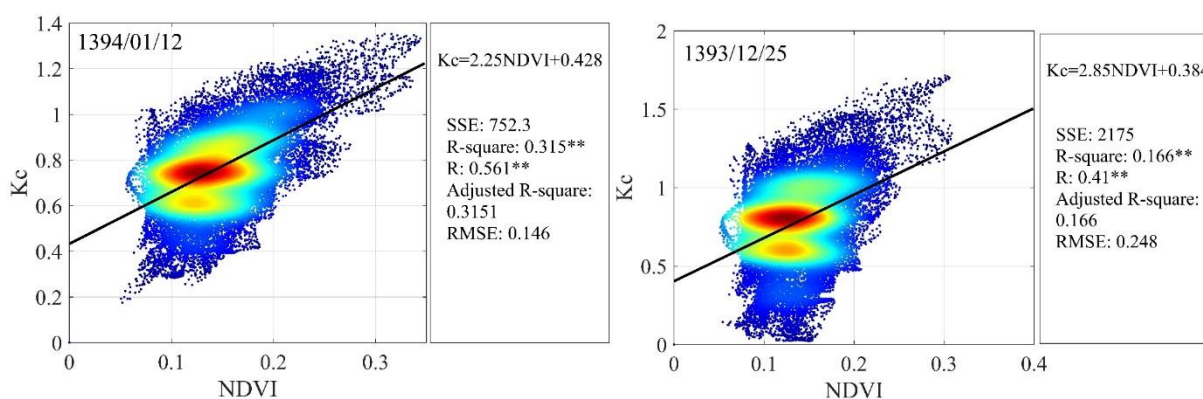


شکل ۶. یک نمونه تصویر شاخص NDVI (راست) و ضریب گیاهی پسته (چپ) در تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴

روابط K_c -NDVI در تاریخ‌های گذر ماهواره

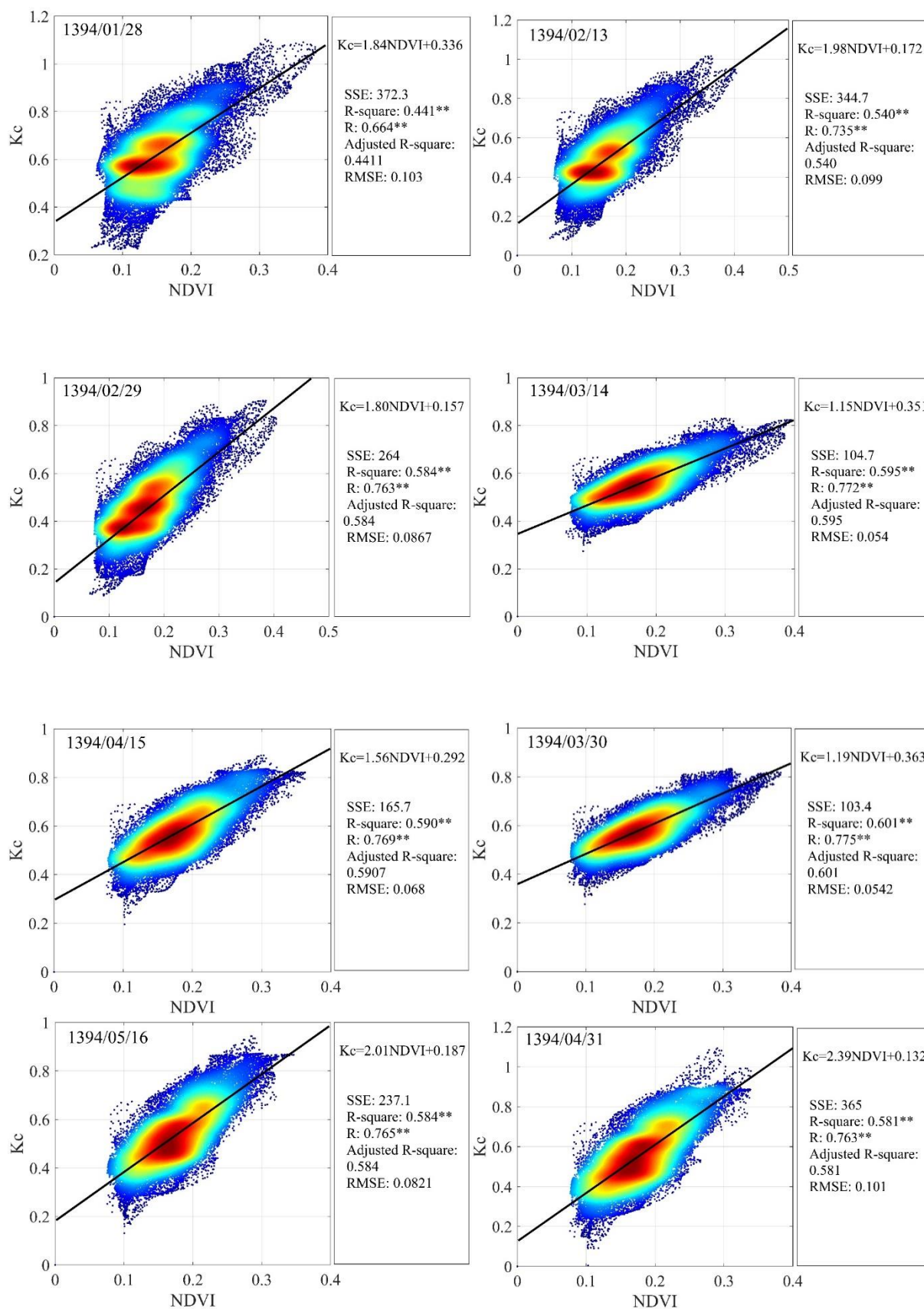
روابط بین ضریب گیاهی واقعی پسته و شاخص NDVI در ۱۶ تاریخ مختلف برای یک دوره کامل رشد پسته در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس نتایج چند نکته مهم قابل شناسایی است. اولین نکته این است که در تمام تاریخ‌های مورد بررسی بین شاخص NDVI و ضریب گیاهی همبستگی معنی‌دار ($P < 0.01$) وجود دارد. در دیگر پژوهش‌ها در این زمینه نیز بین ضریب گیاهی گیاهان مختلف و شاخص‌های پوشش گیاهی همبستگی معنی‌داری گزارش شده است (۱۴، ۱۶، ۲۹، ۳۵ و ۴۰). نکته دوم این است که در ابتدا و انتهای دوره رشد کمترین مقدار همبستگی بین ضریب گیاهی پسته و شاخص NDVI به‌دست آمد (۱۳۹۳/۱۲/۲۵ و ۱۳۹۴/۰۸/۲۰) و در اواسط فصل رشد که مصادف با اوج گرما و تبخیر و تعرق است (۱۳۹۴/۰۳/۳۰)، بیشترین مقدار همبستگی مشاهده شد. این تغییرات بدین دلیل است که در اوایل و اواخر دوره رشد پسته، تبخیر و تعرق بیشتر از سطح خاک است و در این زمان‌ها، برگ‌ها هنوز توسعه نیافته‌اند یا اینکه در اواخر دوره رشد در حال خزان می‌باشند. بنابراین تبخیر و تعرق بیشتر تابع تبخیر از سطح خاک است. برعکس در اواسط فصل رشد با اوج گرفتن دمای هوا و همچنین توسعه بیشترین مقدار

سبزیگی و برگ‌ها بیشترین مقدار همبستگی بین شاخص NDVI و K_c به‌دست خواهد آمد. زیرا در اواسط فصل رشد تبخیر و تعرق بیشتر تابع مقدار پوشش گیاهی می‌باشد. سومین نکته نشان دهنده این است که روابط بین شاخص گیاهی NDVI و K_c در تاریخ‌ها و دوره‌های مختلف فنولوژی پسته متغیر است (شکل ۷). یکی دیگر از موارد قابل توجه این است که در اکثر دوره ۱۶ روزه، ضریب گیاهی پسته در منطقه مورد مطالعه در محدوده مقدار ۰/۳ تا ۰/۹ قرار گرفته است. در منابع تعیین نیاز آبی گیاهان، مقدار ضریب گیاهی پسته ۰/۴ تا ۰/۶ در نظر گرفته شده است (۱۱). این درحالی است که ضریب گیاهی پسته در دوره میانی رشد بر اساس دستور العمل فائو ۵۶ به ۱/۱۹ نیز می‌رسد (۳). با این حال نتایج این پژوهش نشان می‌دهد ضریب گیاهی پسته تقریباً ما بین دو حد ۰/۳ تا ۰/۹ قرار می‌گیرد که نسبت به ضرایب معرفی شده قابل قبول‌تر است. در تعیین ضریب گیاهی ذرت با استفاده از داده‌های سنجش از دور و خوارزمیک سبال نیز نشان داده شد این ضریب برای دوره میانی ۱/۲۴ به‌دست آمده است که ۸، ۲۸ و ۳ درصد به ترتیب با مقدار پیشنهادی کتاب مرجع، سند ملی و فائو ۵۶ اختلاف داشته است (۲۸).



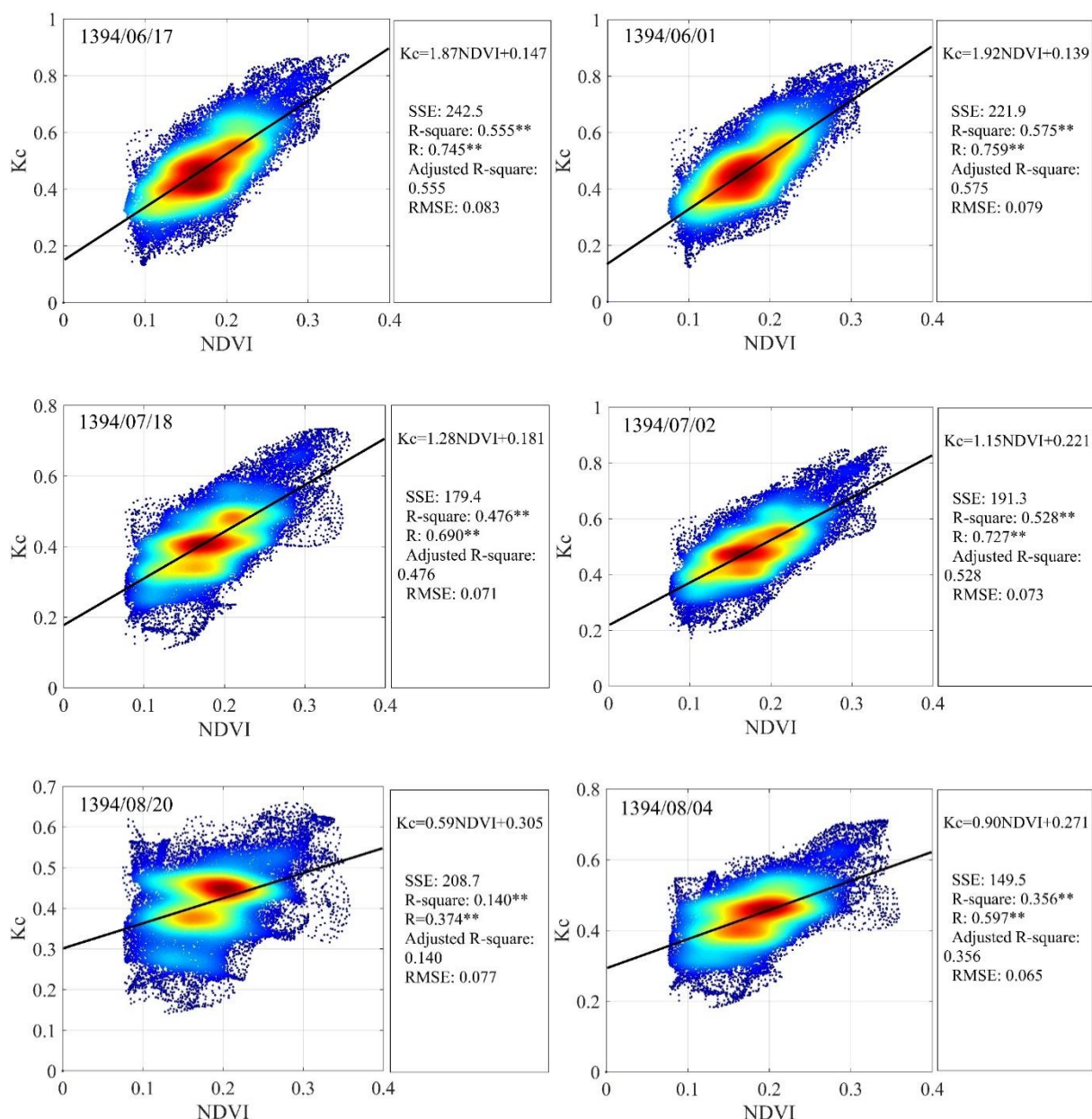
** = معنی‌دار در سطح یک درصد

شکل ۷. روابط K_c و شاخص NDVI در دوره‌های ۱۶ روزه گذر ماهواره لندست ۸ یا دوره‌های ۱۵ روزه فنولوژی پسته. با حرکت از رنگ‌های سرد به گرم، تراکم داده‌ها در آن نقاط افزایش می‌یابد.



** = معنی دار در سطح یک درصد

ادامه شکل ۷. روابط Kc و شاخص NDVI در دوره‌های ۱۶ روزه گذر ماهواره لندست ۸ یا دوره‌های ۱۵ روزه فنولوژی پسته. با حرکت از رنگ‌های سرد به گرم، تراکم داده‌ها در آن نقاط افزایش می‌یابد.



** = معنی دار در سطح یک درصد

ادامه شکل ۷. روابط K_c و شاخص NDVI در دوره‌های ۱۶ روزه گذر ماهواره لندست ۸ یا دوره‌های ۱۵ روزه فنولوژی پسته. با حرکت از رنگ‌های سرد به گرم، تراکم داده‌ها در آن نقاط افزایش می‌یابد.

روابط K_c -NDVI در ۴ مرحله اصلی فنولوژی پسته

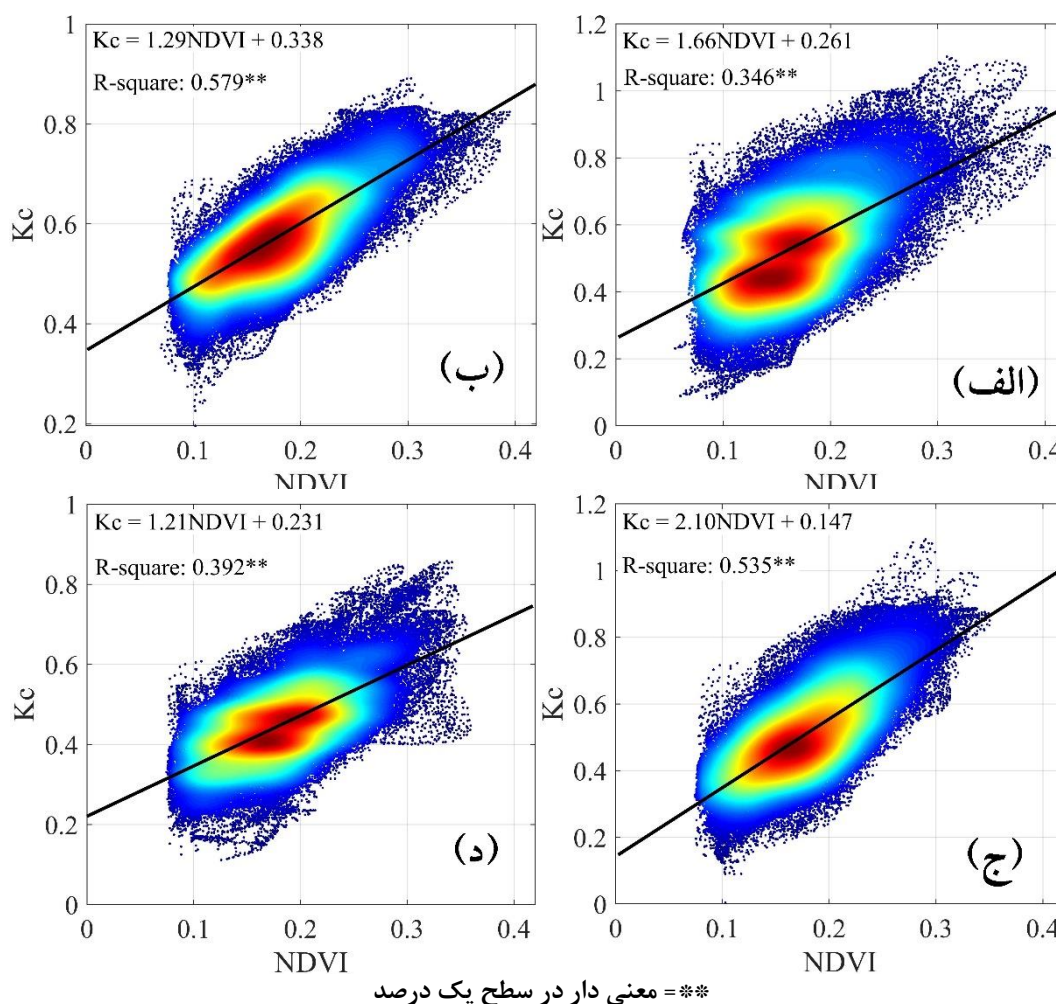
چهار مرحله اصلی فنولوژی پسته در جدول ۲ نمایش داده شد. بنابراین با در نظر گرفتن تجمعی نقاط در این چهار مرحله اصلی فنولوژی پسته، می‌توان روابط بین K_c و NDVI را برای این مراحل بدست آورد. روابط K_c و NDVI در هر کدام از بازه‌های زمانی چهار مرحله اصلی فنولوژی پسته در ادامه نشان داده می‌شود (شکل ۸). اولین مرحله

رشد یا مرحله شروع رشد از تاریخ ۱۳۹۴/۰۱/۱۵ تا ۱۳۹۴/۰۲/۳۱ را شامل می‌شود؛ در این بازه زمانی رابطه $K_c = 1.66 NDVI + 0.261$ مناسب است (شکل ۸ الف). دومین مرحله رشد یا مرحله توسعه رشد از تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۰۱ تا ۱۳۹۴/۰۴/۱۵ را شامل می‌شود؛ در این بازه زمانی رابطه $K_c = 1.29 NDVI + 0.338$ مناسب شناخته شد (شکل ۸ ب). سومین مرحله رشد یا مرحله

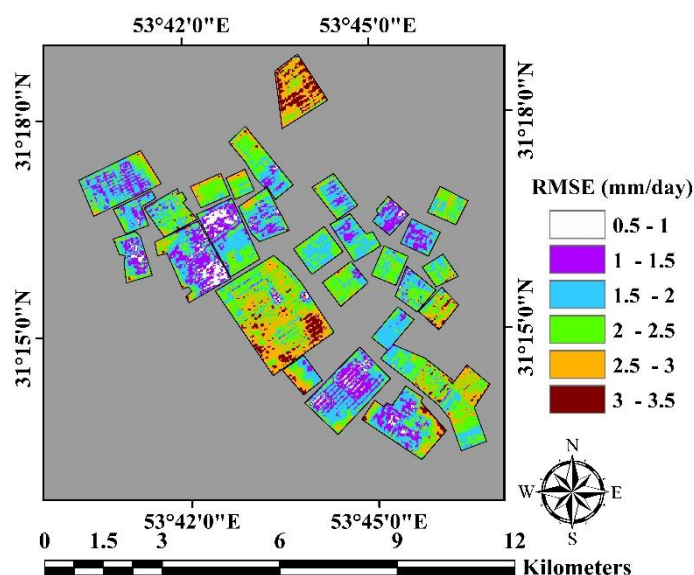
شکل ۹ بیشینه خطای RMSE در منطقه مورد مطالعه ۳/۵ میلی‌متر در روز می‌باشد. در بیشتر منطقه خطای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق با روابط K_C -NDVI مربوط به چهار مرحله اصلی فنولوژی کمتر از ۳ میلی‌متر در روز می‌باشد؛ که این نتایج بسیار امیدوار کننده است. از طرفی باید توجه داشت در مناطقی که شاخص خطای RMSE بین تبخیر و تعرق واقعی با تبخیر و تعرق حاصل از رابطه K_C -NDVI زیاد است، شرایط تنش خشکی برقرار است. به عبارت دیگر، یکی از کاربردهای رابطه‌های K_C -NDVI تهیه نقشه تنش خشکی است؛ به‌ویژه هنگامی که روابط K_C -NDVI در بازه‌های زمانی چند ساله استخراج شود و با تبخیر و تعرق واقعی مقایسه شود.

میان‌ی رشد از تاریخ ۱۳۹۴/۰۴/۱۶ تا ۱۳۹۴/۰۶/۱۵ را شامل می‌شود؛ در این بازه زمانی رابطه $K_C=2.10$ NDVI+0.147 مناسب است (شکل ۸ ج). چهارمین مرحله رشد یا مرحله برداشت و افول رشد از تاریخ ۱۳۹۴/۰۶/۱۶ تا ۱۳۹۴/۰۸/۱۵ را شامل می‌شود؛ در این بازه زمانی رابطه $K_C=1.21$ NDVI+0.231 به‌دست آمد (شکل ۸ د).

ارزیابی روابط K_C -NDVI در ۴ مرحله اصلی فنولوژی پسته نقشه خطای RMSE بین تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده از طریق خوارزمیک سبال با تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با روش K_C -NDVI فائو ۵۶ در ۱۰ تصویر در تاریخ‌های مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به



شکل ۸. روابط K_C و شاخص NDVI در چهار مرحله اصلی فنولوژی پسته. با حرکت از رنگ‌های سرد به گرم، تراکم داده‌ها در آن نقاط افزایش می‌یابد.



شکل ۹. خطای RMSE بین تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده از طریق خوارزمیک سبال با تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با روش KC-NDVI فائو ۵۶ در ۱۰ تصویر در تاریخ‌های مختلف

آبی پسته دارد. بر اساس نتایج در طول دوره‌های مختلف فنولوژی بین ضریب گیاهی K_C و شاخص NDVI همبستگی معنی‌داری وجود دارد. همچنین مقدار ضریب تبیین بین K_C و شاخص NDVI در بیشتر دوره‌های ۱۵ روزه و چهار مرحله اصلی فنولوژی پسته بیش از ۰/۷ می‌باشد. این مقدار ضریب تبیین نشان دهنده این است که ۷۰ درصد تغییرات K_C با شاخص NDVI قابل توجیه است و این روابط از دقت قابل قبولی در تخمین مقدار تبخیر و تعرق برخوردار هستند. در نتیجه می‌توان با استفاده از شاخص NDVI در دوره‌های مختلف رشد، نقشه K_C را برای یک سطح ناهمگن تهیه نمود و با ضرب مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع در بازه مورد نظر، مقدار تبخیر و تعرق محصول را به‌دست آورد. با این حال باید توجه داشت با استفاده از این روابط تنها برای دوره‌های زمانی بلندمدت مانند ماهانه یا فصلی می‌توان تبخیر و تعرق را تخمین زد و در دوره‌های زمانی کوتاه مدت مانند روزانه یا هفتگی استفاده از روابط K_C و NDVI نمی‌تواند به طور دقیق تبخیر و تعرق را برآورد کرد. زیرا در دوره‌های زمانی کوتاه مدت مقدار تبخیر و تعرق در گیاه با شرایط تنش آبی یا بدون تنش آبی با رابطه K_C -NDVI یکسان خواهد بود. از طرفی روابط ذکر شده در پژوهش حاضر تنها برای منطقه مورد مطالعه قابل استفاده است و ممکن است این روابط در دیگر مناطق با شرایط اقلیمی و مزرعه‌ای متفاوت، از دقت قابل قبولی برخوردار نباشد.

پژوهش‌های اندکی به بررسی رابطه ضریب گیاهی و شاخص NDVI پسته پرداخته‌اند. با این حال در این زمینه روابط K_C و NDVI برای گیاهان مختلف زارعی تعیین شده است که این روابط به نتایج پژوهش حاضر نزدیک است. در مطالعه‌ای رابطه K_C و NDVI برای ذرت و یونجه به ترتیب به صورت $K_C = 2.11NDVI - 0.49$ و $K_C = 1.62NDVI - 0.14$ به‌دست آمد (۴۰).

در پژوهشی دیگر رابطه K_C و NDVI برای محصولات مختلف کشاورزی به صورت $K_C = 1.457NDVI - 0.17$ به‌دست آمد (۲۹). در مطالعه‌ای رابطه K_C و NDVI برای مدیریت آبیاری گندم با استفاده از سنجش دور و GIS به صورت $K_C = 2.7NDVI + 0.42$ تخمین زده شد (۲۳). یک رابطه عمومی و کلی در این زمینه نیز وجود دارد. بدین صورت که NDVI با مقدار ۰/۸ دارای حداکثر ضریب گیاهی K_C و خاک بدون پوشش دارای حداقل K_C فرض کرده است. در نتیجه معادله آن به صورت $K_C = 1.25NDVI + 0.2$ می‌باشد (۱۲، ۲۴، ۴۱ و ۵۱). رابطه K_C و NDVI تعیین شده برای مرحله توسعه و افول رشد به این رابطه بسیار نزدیک می‌باشد.

■ نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج نشان داد تلفیق سنجش از دور و دستور العمل فائو ۵۶ قابلیت خوبی برای تخمین تبخیر و تعرق و نیاز

■ References

- Allen, R. G., & Pereira, L. S. (2009). Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Science*, 28(1), 17-34.
- Allen, R. G., Tasumi, M., and Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. *Irrigation and drainage engineering*, 133(4), 380-394.
- Allen, R.G., L.S., Pereira, D. Raes, & M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy: 300 pp.
- Allen, R.G., R. Waters, M. Tasumi, R. Trezza & W. Bastiaanssen. (2002). SEBAL, Surface energy balance algorithms for land, Idaho Implementation. Advanced Training and User's Manual, version 1.0.
- 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), 739-764.
- 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. *Irrigation and drainage engineering*, 131(1), 85-93.
- Bastiaanssen, W. G., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998) a. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Hydrology*, 212, 198-212.
- Bastiaanssen, W. G., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F., Roerink, G. J., & Van der Wal, T. (1998) b. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation. *Hydrology*, 212, 213-229.
- Bastiaanssen, W.G.M. (2000). SEBAL based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Hydrology*, 229, 87-100.
- 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), 2001.
- Dastoorani, M., Poormohammadi, S. & Rahimian, MH. (2012). Estimation of Actual Evapotranspiration in Ardakan Pistachio Orchards Using Remote Sensing. *Water research in agriculture*, 26(1), 1-13. (in Farsi)
- 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), 7-16.
- Duchemin, B., Hadria, R., Erraki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., & Khabba, S. (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, 79(1), 1-27.
- 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), 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 ET_c and crop coefficient K_c 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), 83-89.

17. Gao Y., Long D., and 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. *Remote Sensing*, 29(11), 3295-3315.
18. Gaur, N., Mohanty, B. P., & Kefauver, S. C. (2017). Effect of observation scale on remote sensing based estimates of evapotranspiration in a semi-arid row cropped orchard environment. *Precision agriculture*, 18(5), 762-778.
19. Ghafarian Malamiri, H. R. & Zare Khormizie, H. (2017). Reconstruction of cloud-free time series satellite observations of land surface temperature (LST) using harmonic analysis of time series algorithm (HANTS). *RS and GIS for Natural Resources*, 8(3), 37-55. (in Farsi)
20. Ghafarian Malamiri, H. R., 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), 334.
21. Ghamarnia, H. & Rezvani, S. V. (2014). Calculation and Zoning of Evapotranspiration using SEBAL method In the West of Iran (Miandarband Plain). *Water and Soil*, 28(1), 72-81. (in Farsi)
22. Goldhamer, D.A. & R. Beede. 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
23. Gontia, N. K., & Tiwari, K. N. (2010). Estimation of crop coefficient and evapotranspiration of wheat (*Triticum aestivum*) in an irrigation command using remote sensing and GIS. *Water resources management*, 24(7), 1399-1414.
24. 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), 1-9.
25. Irons, J. R., Dwyer, J. L., & Barsi, J. A. (2012). The next Landsat satellite: The Landsat data continuity mission. *Remote Sensing of Environment*, 122, 11-21.
26. Jaber, H. S., Mansor, S., Pradhan, B., & Ahmad, N. (2016). Evaluation of SEBAL model for Evapotranspiration mapping in Iraq using remote sensing and GIS. *Applied engineering research*, 11, 3950-3955.
27. 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), 1465-1477.
28. Kamali, M., Faridhoseini, A., Ansari, H. & Gholami Sefidkouhi, M. (2018). Determination of maize water requirement and crop coefficient using remote sensing data and SEBAL algorithm. *Irrigation & Drainage*, 12(1), 25-39. (in Farsi)
29. Kamble, B., Kilic, A., & Hubbard, K. (2013). Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote Sensing*, 5(4), 1588-1602.
30. Karbasi, M., Moghadam, M., Nikbakht, J., kaviani, A. (2016). Estimation of crop actual evapotranspiration using SEBAL algorithm (Case study: Khoramdareh region at Zanjan province). *Ecohydrology*, 3(3), 427-437. (in Farsi)
31. Menenti, M., & Choudhury, B. J. (1993). Parameterization of land surface evapotranspiration using a location dependent potential evapotranspiration and surface temperature range. *Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales*, 212, 561-568.

32. Mirzaee, F., Keshavarz, M., & Vazifedoust, M. (2018). Development of a new algorithm (SM-SEBAL) to evaluate Evapotranspiration based on remote sensing data. *Management system*, 11(38), 107-128. (in Farsi)
33. Morshedi, A., Tabatabaei, S.H. & Naderi, M. (2016). Verification SEBAL and Hargreaves –Samani Models to Estimate Evapotranspiration by Lysimeter Data. *Journal of Water and Soil*, 30(2), 367-376. (in Farsi)
34. Noory, H., Badiheshin, A., & Mohammadi Mohammad Abadi, A. (2016). Evaluation of reference evapotranspiration calculation methods and determination of Pistachio evapotranspiration in Rafsanjan. *Agricultural Meteorology*, 4(2), 77-81. (in Farsi)
35. 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), 1683-1688.
36. Pordel, F., Ebrahimi, Ataollah. & Azizi, Z. (2019). The effect of atmospheric correction methods on the relationship between vegetation indices and canopy cover (Case study: Marjan rangelands of Borujen). *Geospatial Information Technology*, 7(2), 133-153.
37. 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), 777-787.
38. Rahimzadegan, M., & Janani, A. (2019). Estimating evapotranspiration of pistachio crop based on SEBAL algorithm using Landsat 8 satellite imagery. *Agricultural Water Management*, 217, 383-390.
39. 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, *Indian Agricultural water management*, 187, 200-209.
40. 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.
41. 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*, 167-192.
42. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 I, pp. 309-317.
43. Sharafati, A., Arzani, K. and Ramezani Moghaddam, M. R. (2013). Assessment of Flowering and Bearing of Twelve Pistachio (*Pistacia vera* L.) Cultivars Under Khorasan Environmental Conditions. *Seed and Plant Improvement Journal*, 29(2), 243-256. (in Farsi)
44. Singh, R. K., and Irmak, A. (2009). Estimation of crop coefficients using satellite remote sensing. *Irrigation and drainage engineering*, 135(5), 597-608.
45. Su, z., 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6(1): 85-100.
46. Wagle, P., Bhattarai, N., Gowda, P. and 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, 192-203.
47. Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A., & Zhao, S. (2015). An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. *Remote Sensing*, 7(4), 4268-4289.

48. Yaghobzade, M., Izapanah, Z., Broomand nasab, S., & Seyed kaboli, H. (2016). The Comparison of SEBAL Algorithm with SWAP Model and Computational Method to Determine Evapotranspiration. *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(3), 39-49. (in Farsi)
49. Zamansani, E., koorani, A., Sadeghi-e-lari, A., & Sadidi, J. (2018). Evaluation of evapotranspiration of wheat using SEBAL algorithm (Case study: Agricultural Research Station of Haji Abad). *Physical Geography Research Quarterly*, 49(4), 667-681. (in Farsi)
50. Zare khormizi, H., Hosseini, S.Z., Mokhtari, M.H. & Ghafarian Malamiri, H. R. (2017). Reconstruction of MODIS NDVI Time Series using Harmonic Analysis of Time Series algorithm (HANTS). *Spatial Planning*, 21(3), 221-255. (in Farsi)
51. 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), 15-25.
52. Zhang, K., Kimball, J. S., & Running, S. W. (2016). A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(6), 834-853.

Estimation of Crop Coefficient and Pistachio Plant's (*Pistacia vera* L.) K_C -NDVI Relationship Using Remote Sensing (Case study: Pistachio orchards of Abarkuh desert margin, Yazd province)

H. Zare Khormizi^{1*}, H.R. Ghafarian Malamiri²

1. Ph.D. Student of Range Management, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
 2. Assistant Professor, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran.
- * Corresponding Author: hadi.zarekh@ut.ac.ir

Received date: 26/03/2020

Accepted date: 01/06/2020

Abstract

One of the most important issues in water resources management in agriculture is determining the plant water requirement by estimating the actual evapotranspiration of the crop. One of the empirical methods for determining the plants and crops evapotranspiration is the method mentioned in FAO 56's report. One of the main problems of this method is the K_C coefficient estimation, especially when the percentage of crop cover, irrigation methods, and other factors in the region varies. The aim of the present study was to estimate the K_C and pistachio plant's (*Pistacia vera* L.) K_C -NDVI relationship in different stages of pistachio phenology in Pistachio orchards of Abarkuh desert margin in Yazd province. The K_C -NDVI relationship has the main role in plant water management requirements. First, the actual daily evapotranspiration rate over the 16 different periods corresponding to a full pistachio's growth period is calculated. Then, by dividing the actual plant evapotranspiration to evapotranspiration of reference plant on the same day, the K_C maps were created. Finally, the relationship between K_C and the NDVI index was obtained. Based on the results, there was a significant correlation between the pistachio plant coefficient and the NDVI index at a 99% level (P -value < 0.01). At the beginning and end of the pistachio growth period, the lowest correlation was found between the pistachio plant coefficient and the NDVI index. The highest correlation was observed in the mid-growing season, which is coincident with the peak of heat and evapotranspiration. In general, the pistachio vegetation coefficient is between 0.3 and 0.9 concerning NDVI index in the study area. Relationship between K_C and NDVI at the 1) beginning of growth season, 2) development stage, 3) mid-growth stage, and finally 4) harvest season were $K_{C-1} = 1.66 \text{ NDVI} + 0.261$, $K_{C-2} = 1.29 \text{ NDVI} + 0.338$, $K_{C-3} = 2.10 \text{ NDVI} + 0.147$, $K_{C-4} = 1.21 \text{ NDVI} + 0.231$, respectively.

Keywords: SEBAL algorithm; Crop Coefficient; Evapotranspiration; Water requirement; Yazd