

بررسی روند تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق به کمک سنجش از دور در مناطق نیمه خشک

مصطفی یعقوب زاده^{۱*}، سعید برومندنسب، زهرا ایزدپناه و حسام سیدکابلی

دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.

Mostafa.yaghoobzadeh@gmail.com

استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.

boroomand@scu.ac.ir

استادیار دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.

z.izadpanah@scu.ac.ir

استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی تاپور دزفول.

hesamkaboli@yahoo.com

چکیده

نخمين دقيق تبخير و تعرق نقش مهمی در بيلان آب در مقياس منطقه ای برای برنامه ريزی و مديريت بهتر منابع آب ایفا می کند. تبخير و تعرق از طريق برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در ایستگاههای هواشناسی و با مستقیماً از اندازه گیری های مزرعه ای يدست می آید ولی تبخیر و تعرق معمولاً به تغییرات در زمان و مکان بارش، خصوصیات هیدرولیکی خاک و نوع و تراکم پوشش گیاهی واکنش سریع نشان می دهد. بنابراین تقریباً تعیین و توزیع زمانی و مکانی تبخیر و تعرق در مناطق وسیع تنها با لایسمتر و وسایل اندازه گیری دقیق ممکن نیست. به همین دلیل محققان از داده‌ها و الگوریتمهای مبتنی بر سنجش از دور برای تعیین تبخیر و تعرق واقعی استفاده می کنند. در این تحقیق روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی دشت نیشابور با الگوریتم بیلان انرژی برای زمین در طی دوره ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲ به کمک تصاویر سنجنده مودیس و داده های هواشناسی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تبخیر و تعرق تعیین شده با مدل های پنمن مانتیث و هارگریوز سامانی مقایسه و ارزیابی شد. وجود ضرایب خطا پایین بین مدل پنمن مانتیث و سیال، دقت زیاد الگوریتم سیال را در نخمين تبخیر و تعرق و پارامترهای آن نشان داد. نتایج حاصل از مقایسه تبخیر و تعرق و شاخص پوشش گیاهی NDVI نیز مشخص کرد پوشش گیاهی و تبخیر و تعرق یا داشتن ضریب تبیین $(R^2 = 0.908)$ همبستگی خوبی یا هم دارند. همچنین فرآیند تغییرات شاخص NDVI دمای سطحی زمین و تبخیر و تعرق در مزارع مورد تحقیق نشان داد که تبخیر و تعرق یا پایین رفتن دمای سطحی زمین و افزایش تراکم پوشش گیاهی، زیاد می شود.

واژه های کلیدی: الگوریتم سیال، تصاویر مودیس، دمای سطحی زمین، شاخص NDVI، پنمن مانتیث، هارگریوز-سامانی.

^۱ - آدرس نویسنده مسئول: اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

* - دریافت: بهمن ۱۳۹۳ و پذیرش: خرداد ۱۳۹۴

مقدمه

تبخیر و تعرق زمین‌های آبیاری یک ابزار مفید برای ارزیابی کفایت مقدار آب آبیاری مورد استفاده می‌باشد. همچنین تبخیر و تعرق واقعی یکی از اجزای اصلی بیلان هیدرولوژیکی است و تاثیر آن بر روی مطالعات هیدرولوژی، کشاورزی، جنگلداری و محیط زیست واضح و روشن می‌باشد. روش مرسوم محاسبه تبخیر و تعرق براساس داده‌های هواشناسی است ولی این طریق محاسبه بر اساس مشاهدات نقطه‌ای و داده‌های هواشناسی به دلیل تغییرات زمانی و مکانی آن مشکل می‌باشد. تخمین منطقی و بهتر تبخیر و تعرق در مناطق بزرگ می‌تواند به کمک تصاویر ماهواره‌ای و سنجش از دور به دست آید. این روش می‌تواند ابزار مفیدی برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی از یک پیکسل منحصر به فرد تا کل تصویر فراهم نماید.

در سالیان اخیر، الگوریتم‌های سنجش از دور متعددی برای تعیین تبخیر و تعرق گسترش یافته اند و نتایج قابل قبولی را ارائه نمودند. یکی از الگوریتم‌های سنجش از دوری مهم در محاسبه تبخیر و تعرق واقعی، الگوریتم بیلان انرژی برای زمین است که می‌تواند برای تخمین اجزا مختلف بیلان انرژی سطح زمین و همچنین تبخیر و تعرق واقعی به کار برده شود (ساری و همکاران، ۲۰۱۳). الگوریتم سبال در اکثر نقاط دنیا با اقلیم‌های مختلف، به منظور برآورد تبخیر و تعرق و سایر شارهای گرمایی در سطح مورد استفاده قرار گرفته و نتایج نسبتاً رضایتبخشی را ارائه کرده است.

استیل و همکاران (۲۰۱۴) برای کم کردن اثرات سیل رودخانه دوپس در شمال شرقی ایالت داکوتای شرقی آمریکا از الگوریتم سنجش از دور سبال و داده‌های کابری اراضی و پیمایش زمینی استفاده کردند. اختلاف ۱۷ و ۴۱ میلی‌متر تبخیر و تعرق محاسبه شده پنبه و گندم با سبال و داده‌های اندازه گیری شده در طول فصل کشت نشان می‌دهد که می‌توان برای کاهش اثرات سیل و مدیریت منابع آب نیز از الگوریتم سبال استفاده

نمود. پایاداوید و همکاران (۲۰۱۳) الگوریتم CYSEBAL را براساس الگوریتم سبال، داده‌های هواشناسی و خاک محلی برای دهکده ماندریا از بخش پافوس قبرس محاسبه نمودند و این الگوریتم را با الگوریتم سبال که براساس معادلات تجربی تعیین شده بود و همچنین روش پنمن ماتیت به عنوان مرجع مقایسه نمودند. آنها از تصاویر لندست ۵ TM و لندست ۷ ETM+ برای مشخص کردن پارامترهای مدل سبال استفاده نمودند.

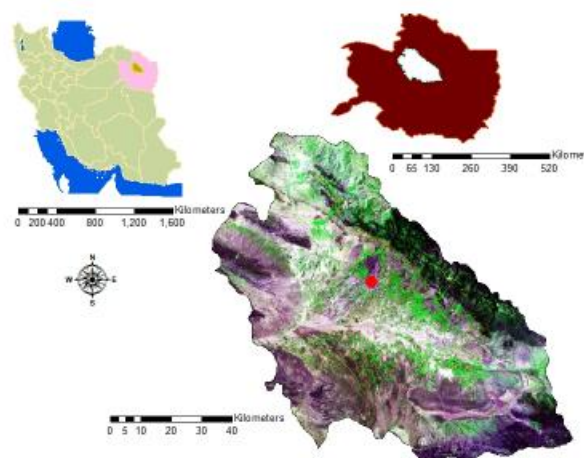
نتایج آنالیز t آنها نشان داد که تفاوت بین SEBAL و CYSEBAL معنی‌دار و تفاوت بین CYSEBAL و روش پنمن معنی‌دار نیست. همچنین کریمی و همکاران (۱۳۹۱) دقت تبخیر و تعرق روزانه حاصل از الگوریتم سبال و تصاویر ماهواره Landsat 5 TM را در مقابل اندازه گیری های لایسیمتری در مزرعه ذرت واقع در دشت ماهیدشت-سنجانی استان کرمانشاه ارزیابی و تبخیر و تعرق را در سطح دشت مورد مطالعه برآورد کردند.

حداکثر درصد خطا بین تبخیر و تعرق محاسبه شده برای محصول ذرت با الگوریتم سبال و مقادیر اندازه گیری شده در لایسیمتر کمتر از ۱۰ درصد تعیین گردید. در تحقیقی دیگر در ایران، اکبری و همکاران (۱۳۹۰) به کمک سنجش از دور، تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی را در شرایط اقلیمی مختلف برآورد کردند و نتیجه گرفتند که میزان تبخیر و تعرق در سال کم بارش به بیشترین میزان رسیده است. با مقایسه نتایج تبخیر و تعرق به دست آمده از روش سنجش از دور با دو روش برآورد تبخیر-تعرق (هارگریوز و پنمن ماتیت) در هر سال مشاهده شد که نتایج به دست آمده از روش سنجش از دور با ریشه میانگین مربعات خطاها ۰/۶۷ و میانگین خطای مطلق ۰/۴، مطابقت خوبی با برآوردهای حاصل از روش‌های محاسباتی دارد که نشان دهنده امکان استفاده از تکنیک سنجش از دور برای تخمین تبخیر و تعرق مکانی در سطوح مختلف مزرعه و شبکه‌های آبیاری می‌باشد.

مواد و روشها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی در این تحقیق دشت نیشابور می‌باشد. این دشت با وسعت ۷۲۹۳ کیلومتر مربع، جزئی از حوضه آبریز کویر مرکزی بوده که ۴۱۰۰ کیلومتر مربع آن را دشت (۵۶ درصد) و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. از نظر موقعیت جغرافیایی حوضه مذکور در حدفاصل ۱۳' ۵۸° تا ۳۰' ۵۹° طول شرقی و ۴۰' ۳۵° تا ۳۹' ۳۶° عرض شمالی قرار دارد شکل (۱).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در سطح استان و کشور

روش تحقیق

در این تحقیق از تصاویر سنجنده مودیس ماهواره ترا برای سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲ استفاده شده است. ۱۴ تصویر ماهواره‌ای که مربوط به روز ژوئیه ۱۹۰ (۹ ژوئیه میلادی یا ۱۸ تیر شمسی) می‌باشد برای تعیین تبخیر و تعرق واقعی با الگوریتم سبال در نظر گرفته شده است. این تصاویر قدرت تفکیک یک کیلومتر دارند و بنابراین هریکسل از این تصاویر مساحتی در حدود ۱۰۰ هکتار زمین را شامل می‌شود. برای ارزیابی مدل سبال، تبخیر و تعرق به کمک روش های پنمن مانیت و هارگریوز سامانی و با در نظر گرفتن ضریب رشد گیاهی محاسبه شده و با تبخیر و تعرقی که از الگوریتم سبال بدست آمده، مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند. همچنین نرم افزارهای

در این مطالعه سعی شد به ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی و نیازآبی گیاهان بر اساس مدل سنجنش از دور SEBAL در دشت نیشابور پرداخته شود. برای ارزیابی و محاسبه پارامترهای بیلان انرژی از تصاویر سنجنده مودیس ماهواره ترا استفاده شد. همچنین در این تحقیق، رابطه تبخیر و تعرق با شاخص پوشش گیاهی NDVI و دمای سطحی زمین در موقعیت‌های مکانی و زمانی مختلف دشت مشخص و با هم مقایسه گردید.

این حوضه از جهات شمال، جنوب، غرب و شرق بترتیب به ارتفاعات بینالود، تپه ماهورهای نیزه بند، سیاه کوه و کوه نمک (حوضه آبریز دشت رخ)، حوضه آبریز دشت سبزواری و بلندی‌های لیلا جوق و یال پلنگ محدود شده است. حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه بترتیب با ۳۳۰۵ و ۱۰۶۵ متر در قله بینالود و خروجی رودخانه کال شور از حوضه واقع شده است. آب و هوای منطقه نیمه خشک و خشک، متوسط درجه حرارت آن ۱۲ درجه سانتیگراد و میزان بارندگی آن بطور متوسط برای کل دشت ۲۹۲ میلی متر گزارش شده است. میزان تبخیر بعلت بالا بودن درجه حرارت هوا زیاد بوده و متوسط آن برای کل حوضه ۲۳۳۵ میلی متر در سال است (خاشمی سیوکی و شجاعی سیوکی، ۱۳۹۰).

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} \times \left[0.0032 \times \alpha + 0.0062 \times \alpha^2 \right] \times \left[1 - 0.978 \times NDTV^4 \right] \quad (3)$$

که در آن:

T_s : دمای سطحی بر حسب درجه سانتیگراد و α : آلیدوی سطحی می‌باشد. NDVI شاخصی است که به میزان و وضعیت پوشش گیاهی حساسیت دارد و این شاخص نشانه توان و تراکم پوشش گیاهی سطح می‌باشد. کوچکی و بزرگی آن وابسته به فعالیت فتوسنتز در گیاه مستقر بر سطح زمین است. به شکل کلی مقادیر بزرگتر این شاخص نشانه شادابی و تراکم بیشتر پوشش گیاهی خواهد بود. دامنه آن به شکل نرمال در محدوده -۱ تا +۱ در نظر گرفته می‌شود. شاخص مزبور از رابطه زیر قابل بررسی و تخمین خواهد بود:

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

که در آن:

NIR: معرف باند فرورسرخ نزدیک و RED: باند قرمز می‌باشد. در سبال بهتر است از بازتابندگی این دو باند استفاده شود. تصاویر سنجنده مودیس دارای ۳۶ باند مجزا از هم می‌باشد که باند دو، طول موجی معادل فرورسرخ نزدیک (NIR) و باند یک طول موج باند قرمز (RED) را مشخص می‌کند.

یکی دیگر از اجزای معادله بیلان انرژی شارگرمای محسوس (H) است. روابط آیرودینامیکی موجود بیانگر ارتباط شارگرمای محسوس (H) با اختلاف دمای بین سطح زمین و هوای مجاور چسبیده به سطح است که بصورت زیر قابل تخمین است:

$$H = \frac{\rho_{air} \times C_{air} \times dT}{r_{ah}} \quad (5)$$

که در آن:

ρ_{air} : چگالی هوا (کیلوگرم بر مترمکعب)، C_{air} : گرمای ویژه هوا (ژول بر کیلوگرم بر کلوین)، dT : اختلاف دمای بین دو ارتفاع Z_1 و Z_2 (کلوین) و r_{ah} : مقاومت

ERDAS 9.1، ENVI 5 و ARC GIS 10.2 برای پردازش تصاویر ماهواره ای و تهیه نقشه‌های خروجی بکار برده شده‌اند.

الگوریتم بیلان انرژی برای زمین (سبال) یکی از الگوریتم‌های سنجش از دور است که تبخیر و تعرق گیاه را براساس تعادل لحظه‌ای انرژی در سطح هر پیکسل از تصویر ماهواره‌ای محاسبه می‌نماید (باستیانسن و همکاران (۱۹۹۸)، باستیانسن (۲۰۰۰) و باستیانسن و همکاران (۲۰۰۵)). بنابراین روش‌ها و الگوریتم‌هایی مانند سبال نیازمند حل معادله بیلان انرژی هستند که در آن تبخیر و تعرق واقعی (λET) بعنوان جزء باقیمانده اختلافات بین تشعشع خالص ورودی به سطح زمین (R_n) و شار گرمای محسوس خارج شده از سطح (H) و نیز شار گرمای ورودی به زمین (G) قابل محاسبه می‌باشد:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (1)$$

که در آن:

مقدار R_n تفاضل بین شارهای تشعشعی ورودی (↓) و خروجی (↑) است که بصورت طول موجهای بلند (L) و کوتاه (S) به محدوده مجاور سطح زمین وارد و خارج شده و تابعی از مقدار آلیدوی سطحی (α) و ضریب گسیلندگی سطحی (ϵ_0) است و بر اساس معادله زیر به دست می‌آید:

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{l\downarrow} \quad (2)$$

که در آن:

α: آلیدوی سطحی، $R_{s\downarrow}$: تابش موج کوتاه ورودی (۰/۳ تا ۳ میکرومتر) بر حسب وات بر متر مربع، $R_{l\downarrow}$: تابش موج بلند ورودی (۳ تا ۱۰۰ میکرومتر) بر حسب وات بر متر مربع، $R_{l\uparrow}$: تابش موج بلند خروجی بر حسب وات بر متر مربع، ϵ_0 : گسیلندگی سطحی عریض باند می‌باشد. بنابراین تابش خالص عبارت از اختلاف بین جریان تابش ورودی و خروجی بوده و معیاری از مقدار انرژی موجود در سطح زمین به شمار می‌رود. مقدار G یا همان شار حرارتی خاک از رابطه تجربی باستیانسن بر اساس معادله زیر به دست می‌آید:

$$ET_{TrF} = \frac{ET_{inst}}{ET_{r-inst}} \quad (۷)$$

$$ET_{act-24} = ET_{r-24} ET_{TrF} \quad (۸)$$

که در آن:

ET_{r-24} تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس ساعتی، ET_{TrF} تبخیر و تعرق در مقیاس روزانه، ET_{TrF} نسبت تبخیر و تعرق واقعی ساعتی به تبخیر و تعرق مرجع ساعتی که محققان نشان دادند که ET_{TrF} شبیه به ضریب رشد گیاهی (K_c) بوده و مقدار آن در طول روز یا دوره زمانی مورد نظر ثابت می باشد (آلن و همکاران، ۲۰۰۲). در این تحقیق، جهت برآورد تبخیر-تعرق روزانه از تبخیر-تعرق لحظه‌ای، از مفهوم تبخیر-تعرق گیاه مرجع استفاده شده است.

به این منظور، تبخیر-تعرق گیاه مرجع در مقیاس ساعتی در لحظه گذر ماهواره (ET_{r-inst}) و همچنین میزان آن در مقیاس روزانه (ET_{r-24}) برای ایستگاه هواشناسی معرف منطقه محاسبه می‌گردد. سپس نسبت تبخیر-تعرق لحظه‌ای محاسبه شده از مدل سبال به تبخیر-تعرق گیاه مرجع در مقیاس ساعتی در لحظه گذر ماهواره تعیین و حاصلضرب این نسبت در تبخیر-تعرق روزانه گیاه مرجع، میزان تبخیر-تعرق واقعی روزانه (ET_{act-24}) می‌باشد. مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع در مقیاس ساعتی در لحظه گذر ماهواره (ET_{r-inst}) و همچنین میزان آن در مقیاس روزانه (ET_{r-24}) به کمک داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک نیشابور و نرم افزار Ref-ET بوسیله دو روش پنمن مانیتیت و هارگریوز سامانی محاسبه شده است.

روش پنمن مانیتیت به عنوان روش استاندارد برای محاسبه تبخیر تعرق مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی بیان می‌شود. همچنین روش پنمن مانیتیت، تنها روش برآورد است که برای اکثر کشورهای با اقلیم خشک

آیرودینامیکی برای انتقال گرما (ثانیه بر متر) می‌باشد. شار گرمای محسوس (H) توسط یک سری روابط رفت و برگشتی و تا زمان ثابت شدن یک عامل به نام طول مونس-ابوخوف (L) تعیین می‌گردد.

در روش سبال برای برآورد شار گرمای محسوس، ابتدا باید دو پیکسل سرد و گرم که به پیکسل-های آستانه معروفند تعیین شود. یکی از این پیکسل‌ها که پیکسل سرد است مربوط به منطقه‌ای می‌شود که به طور کامل پوشیده از پوشش گیاهی آبیاری شده با دمای سطح زمین پایین باشد که این پیکسل دارای تبخیر و تعرق معادل تبخیر و تعرق مرجع می‌باشد. پیکسل دوم که پیکسل گرم نامیده می‌شود نقطه مقابل پیکسل سرد می‌باشد و زمین‌های بدون پوشش گیاهی با دمای سطح زمین زیاد را شامل می‌شود. در این تحقیق برای تعیین پیکسل سرد از Ts و $NDVI$ استفاده شده است به طریقی که در پیکسل سرد، $NDVI$ حداکثر و Ts حداقل و در پیکسل گرم شاخص $NDVI$ حداقل و Ts حداکثر می‌باشد.

در سبال برای بدست آوردن اختلاف دمای هوای نزدیک سطح (dT) در هر پیکسل، ابتدا باید این پارامتر را برای پیکسل‌های سرد و گرم بدست آورده و با ایجاد رابطه خطی بین این دو پیکسل می‌توان مقدار dT را برای سایر پیکسل‌ها بدست آورد. پس از آن مقدار شار گرمای محسوس بر اساس شرایط جوی و فرآیند تکراری تصحیح می‌گردد. مقدار لحظه‌ای تبخیر و تعرق برای زمان گذر ماهواره به کمک شار گرمای محسوس، شار گرمای نهان، میزان تلفات گرما از سطح به علت تبخیر-تعرق برای هر پیکسل با توجه به رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (۹)$$

که در آن:

ET_{inst} : تبخیر-تعرق لحظه‌ای (mm/hr) و λ : گرمای نهان بخار آب می‌باشد.

$$RD = \left| \frac{x_i - x_m}{x_m} \right| \quad (13)$$

$$AD = x_i - x_m \quad (14)$$

که در آن:

X_m و X_i مقادیر بدست آمده از مدل سبال و روش‌های پنمن مانیت و هارگریوز-سامانی و n تعداد کل داده‌ها است. هرچه مقادیر شاخص‌های آماری به صفر نزدیکتر باشند، به این معناست که مقادیر بدست آمده از سبال از میزان خطای کمتری برخوردارند.

نتایج

در این تحقیق، تبخیر و تعرق واقعی به کمک مدل سبال برای یک دوره زمانی بین سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲ و روز ژوئیه ۱۹۰ (۱۸ تیرماه) براساس یک سری فرمول‌ها و محاسبات تعیین شده است. با این عمل علاوه بر مشخص شدن توزیع مکانی تبخیر و تعرق در سال‌های مختلف، از روند تغییرات تبخیر و تعرق در طی یک سری سال‌های متوالی اطلاع حاصل شد. برخی از اطلاعات و اجزا مدل سبال برای تصاویر مورد نظر در جدول (۱) نشان داده شده است. این اعداد مربوط به پیکسل ایستگاه سینوپتیک نیشابور می‌باشد که از نقشه توزیع مکانی مربوط به هر پارامتر استخراج شده است. با انتخاب ۱۴ تصویر از ۱۴ سال مختلف می‌توان از روند تغییرات تبخیر و تعرق و پوشش گیاهی در طی این سالها نیز مطلع شد. همچنین در این تحقیق، رابطه بین تبخیر و تعرق با پوشش گیاهی و دما مورد بررسی قرار گرفت. پنمن مانیت و هارگریوز-سامانی از جمله روش‌های محاسباتی هستند که در این تحقیق برای ارزیابی الگوریتم سبال مورد استفاده قرار گرفتند و صحت نتایج این روش‌ها در مناطق مجاور دارای لایسمتر به اثبات رسیده است (موسوی بایگی و همکاران، ۱۳۸۸). مدل سبال توزیع مکانی تبخیر و تعرق را در سطح مناطق بزرگ مانند دشت و حوضه آبریز برآورد می‌کند. این در حالی است که روشهای

و نیمه خشک از جمله ایران پیشنهاد شده است و معادله آن بصورت زیر می‌باشد (علیزاده، ۱۳۸۵).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \times u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (9)$$

که در آن:

T : میانگین دمای روزانه هوا برحسب درجه سانتی‌گراد،
 e_s : فشار بخار اشباع برحسب کیلوژول،
 e_a : فشار بخار واقعی برحسب کیلوژول،
 $e_s - e_a$: کمبود فشار بخار اشباع،
 Δ : شیب منحنی فشار بخار برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد و γ : ضریب ثابت سایکرومتری برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

روش هارگریوز-سامانی نیز یکی دیگر از روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق مرجع می‌باشد که در سال ۱۹۸۵ میلادی توسط هارگریوز-سامانی ارائه شد (علیزاده، ۱۳۸۵).

$$ET_o = 0.0023(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} \times Ra \quad (10)$$

که در آن:

ET_o : تبخیر و تعرق گیاه مرجع بر حسب میلی‌متر در روز،
 T_{max} ، T_{min} و T_{mean} : حداکثر، حداقل و میانگین دمای روزانه و R_a : حداکثر ممکن تابش خورشیدی به سطح زمین با توجه به عرض جغرافیایی می‌باشد.

به منظور ارزیابی مدل سبال در برآورد میزان تبخیر و تعرق از شاخص‌های آماری مجذور میانگین خطا^۱، میانگین خطای مطلق^۲، تفاضل نسبی (RD) و قدرمطلق تفاضل مطلق (AD) استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n}} \quad (11)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_m|}{n} \quad (12)$$

1 Root Mean Square Error (RMSE)
 2 Mean Absolute Error (MAE)

مزارع مورد تحقیق برداشت می شود و در بعضی مزارع مثل فیض آباد برداشت جو در چند روز قبل انجام شده است و روز ۱۸ تیر، آیش یا مرتع کم تراکم دارند. کشت غالب در مزارع دیگر را نیز محصولاتی مانند چغندر قند، پنبه، گوجه فرنگی و ذرت شامل می شود که به دلیل اینکه در اوایل رشد هستند ضریب رشد گیاهی پایین برای آنها اختصاص یافته است.

محاسباتی بصورت نقطه ای تبخیر و تعرق مرجع را محاسبه می نمایند. به همین دلیل، در این مطالعه از پنج مزرعه مهم دارای موقعیت مکانی مشخص که از توزیع مکانی مناسب در سطح دشت نیز برخوردار بودند استفاده شد که در این مزارع محصولات متنوعی کشت شد. تاریخ تصاویر مورد استفاده (روز ۱۹ ژوئیه) مربوط به روز ۱۸ تیرماه از هر سال می باشد و در این تاریخ، گندم و جو

جدول ۱ اجزا و پارامترهای مدل سیال در طی فرآیند تعیین تبخیر و تعرق در ایستگاه سینوپتیک نیشابور

G (w/m ²)	H (w/m ²)	Rn (w/m ²)	Ts (°K)	NDVI	ET24 (mm/day)	متوسط دما (°C)	رطوبت نسبی متوسط (%)	بارندگی سالانه (mm)	سال
۲۰۵/۶	۱۱۹	۶۹۴/۱	۳۲۸/۴	-۰/۹۱	۶/۵۱	۲۶/۷	۲۱	۱۵۷/۶	۱۳۷۹
۱۹۶/۲	۱۲۶/۲	۶۹۹/۲	۳۲۷/۳	-۰/۸۵	۷/۰۱	۲۸	۲۰	۱۷۷/۹	۱۳۸۰
۱۷۹/۷	۶۱/۳۱	۷۱۸/۱	۳۲۰/۵	-۰/۱۱۶	۸/۶۲	۲۳/۸	۳۱	۱۹۰/۷	۱۳۸۱
۱۸۲/۱	۱۰۷/۷	۷۵۱/۵	۳۲۰/۳	-۰/۱۲۸	۸/۳۵	۲۷/۶	۳۶	۲۴۱	۱۳۸۲
۱۸۶/۲	۸۱/۴	۷۲۵/۶	۳۲۳/۷	-۰/۱۰۲	۸/۳۱	۲۳/۸	۳۹	۳۰۱/۹	۱۳۸۳
۱۸۴/۱	۹۵/۵	۷۵۲/۵	۳۲۱/۳	-۰/۱۲۴	۸/۵۶	۲۸/۹	۳۶	۲۴۰	۱۳۸۴
۱۹۹/۷	۱۱۲/۷	۷۰۵/۴	۳۲۷/۱	-۰/۱۱۵	۷/۱۵	۲۸/۹	۲۴	۲۰۶/۴	۱۳۸۵
۱۷۳/۶	۱۰۰	۶۸۰/۹	۳۱۹/۱	-۰/۱۵۷	۷/۳۵	۲۶/۳	۳۱	۲۸۶/۶	۱۳۸۶
۱۴۳/۴	۱۲۹/۸	۷۰۷/۲	۳۱۰/۹	-۰/۱۰۰	۷/۴۸	۲۸	۳۵	۱۳۱/۴	۱۳۸۷
۱۶۰	۱۴۵/۲	۷۲۹/۲	۳۱۵/۶	-۰/۱۳۲	۷/۵۴	۲۶/۱	۳۴	۳۳۵/۷	۱۳۸۸
۲۰۲/۶	۱۱۸/۳	۷۴۶/۴	۳۲۷/۷	-۰/۱۲۲	۷/۷۵	۲۹	۲۷	۲۱۳/۳	۱۳۸۹
۱۹۸/۶	۱۱۲/۹	۷۵۴/۵	۳۲۵/۶	-۰/۱۲۳	۸/۲۵	۲۹/۳	۲۴	۳۰۷/۹	۱۳۹۰
۱۸۴/۶	۹۴/۴۵	۷۶۳/۲	۳۲۱/۱	-۰/۱۵۹	۸/۷۶	۲۶/۶	۲۸	۲۲۶/۹	۱۳۹۱
۱۷۴/۴	۱۰۱/۴	۷۴۰/۴	۳۱۷/۴	-۰/۱۶۷	۸/۳۸	۲۵/۳	۳۴	۲۳۵/۵	۱۳۹۲

جدول ۲- مقایسه بین تبخیر و تعرق واقعی حاصل از مدل سیال با تبخیر و تعرق مرجع پنمن مانیت (Pm) و هارگریوز-سامانی (Hg)

مزارع	کشت غالب	تاریخ شروع کشت غالب	ضریب Kc	تفاضل مطلق		MAE		RMSE	
				Hg	Pm	Hg	Pm	Hg	Pm
سلیمانی	پنبه	بیست و پنجم فروردین	-۰/۶	۳/۸۲	-۰/۴۵	-۰/۸۸	-۰/۸۷	۳/۸۹	۱/۵۳
متمدیه	چغندر قند	دهم اردیبهشت	-۰/۵	۳/۴۳	-۰/۶۲	-۰/۹۶	-۰/۱۳	۳/۵۹	۱/۶۷
فیض آباد	آیش	-	-۰/۵	۳/۵۵	-۰/۷۴	-۰/۹۹	-۰/۱۴۸	۳/۷۱	۱/۷۰
فلرוב	ذرت	هشتم تیرماه	-۰/۶	۳/۲۳	-۰/۱۴	-۰/۷۵	-۰/۱۱	۳/۴	۱/۶۸
حاجی آباد	گوجه فرنگی	دوازدهم فروردین	-۰/۶	۳/۹۴	-۰/۵۷	-۰/۹۱	-۰/۱۰۵	۴/۰۵	۱/۷۲

جدول ۳- ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی حاصل از سبال و تبخیر و تعرق مرجع (ETp) مدل پنمن مانیتب در مزارع

سال	ETp	سلیمائی		معمدبه		فیض آباد		فاروب		حاجی آباد	
		RD++	AD+	RD++	AD+	RD++	AD+	RD++	AD+	RD++	AD+
۱۳۷۹	۱۳/۴	-۰/۹	-۰/۱۱	۱/۵۶	-۰/۲۳	۱/۵	-۰/۲۲	۲/۰۲	-۰/۲۵	۱/۲۶	-۰/۱۶
۱۳۸۰	۱۴/۳	-۰/۰۷	-۰/۰۱	۱/۰۸	-۰/۱۵	-۰/۰۶	-۰/۰۱	۲/۲۵	-۰/۲۶	-۰/۸۴	-۰/۱
۱۳۸۱	۹/۱	۲/۹۴	-۰/۵۴	۲/۷۹	-۰/۶۱	۳/۱۹	-۰/۷	۲/۳۹	-۰/۴۴	۳/۳۷	-۰/۶۲
۱۳۸۲	۱۱/۸	۱/۸	-۰/۲۵	۲/۰۵	-۰/۳۵	۲/۳۴	-۰/۴	۱/۲۵	-۰/۱۸	۲/۱۲	-۰/۳
۱۳۸۳	۱۰/۹	۲/۳۵	-۰/۳۶	۲/۴۸	-۰/۴۵	۱/۹۶	-۰/۳۶	۱/۰۸	-۰/۱۶	۲/۱۹	-۰/۳۳
۱۳۸۴	۱۱/۴	۲/۳۶	-۰/۳۴	۲/۳۹	-۰/۴۲	۲/۱۳	-۰/۳۷	۱/۱۲	-۰/۱۶	۲/۲۹	-۰/۳۳
۱۳۸۵	۱۶	۱/۹۵	-۰/۲	۲/۰۴	-۰/۲۶	۲/۰۵	-۰/۲۶	۳/۴۱	-۰/۳۶	۲/۴۸	-۰/۲۶
۱۳۸۶	۱۳/۶	-۰/۶۸	-۰/۰۸	-۰/۲۱	-۰/۰۳	-۰/۰۵	-۰/۰۱	-۰/۳۹	-۰/۰۵	-۰/۲۲	-۰/۰۳
۱۳۸۷	۱۴/۵	-۰/۳۹	-۰/۰۴	۲/۱۶	-۰/۱۶	۱/۷۱	-۰/۲۴	-۰/۱۲	-۰/۰۱	-۰/۴۶	-۰/۰۵
۱۳۸۸	۱۴	-۰/۱۳	-۰/۰۲	-۰/۲	-۰/۰۳	-۰/۳۲	-۰/۰۵	-۰/۶۱	-۰/۰۷	-۰/۳۵	-۰/۰۴
۱۳۸۹	۱۵	۱/۱۵	-۰/۱۳	-۰/۹۲	-۰/۱۲	۱/۲۳	-۰/۱۶	۱/۸۸	-۰/۲۱	-۰/۹۱	-۰/۱
۱۳۹۰	۱۴/۲	-۰/۵۳	-۰/۰۶	-۰/۳۱	-۰/۰۴	-۰/۲۷	-۰/۰۴	-۰/۴۹	-۰/۰۶	-۰/۵۲	-۰/۰۶
۱۳۹۱	۱۱/۹	۱/۲۸	-۰/۱۸	۱/۶۲	-۰/۲۷	۱/۷۱	-۰/۲۹	۱/۷۳	-۰/۲۴	۱/۹۳	-۰/۲۷
۱۳۹۲	۱۱/۲	۱/۱۹	-۰/۱۸	۱/۵۱	-۰/۲۷	۱/۶۴	-۰/۲۹	۱/۴۱	-۰/۲۱	۱/۳۹	-۰/۲۱

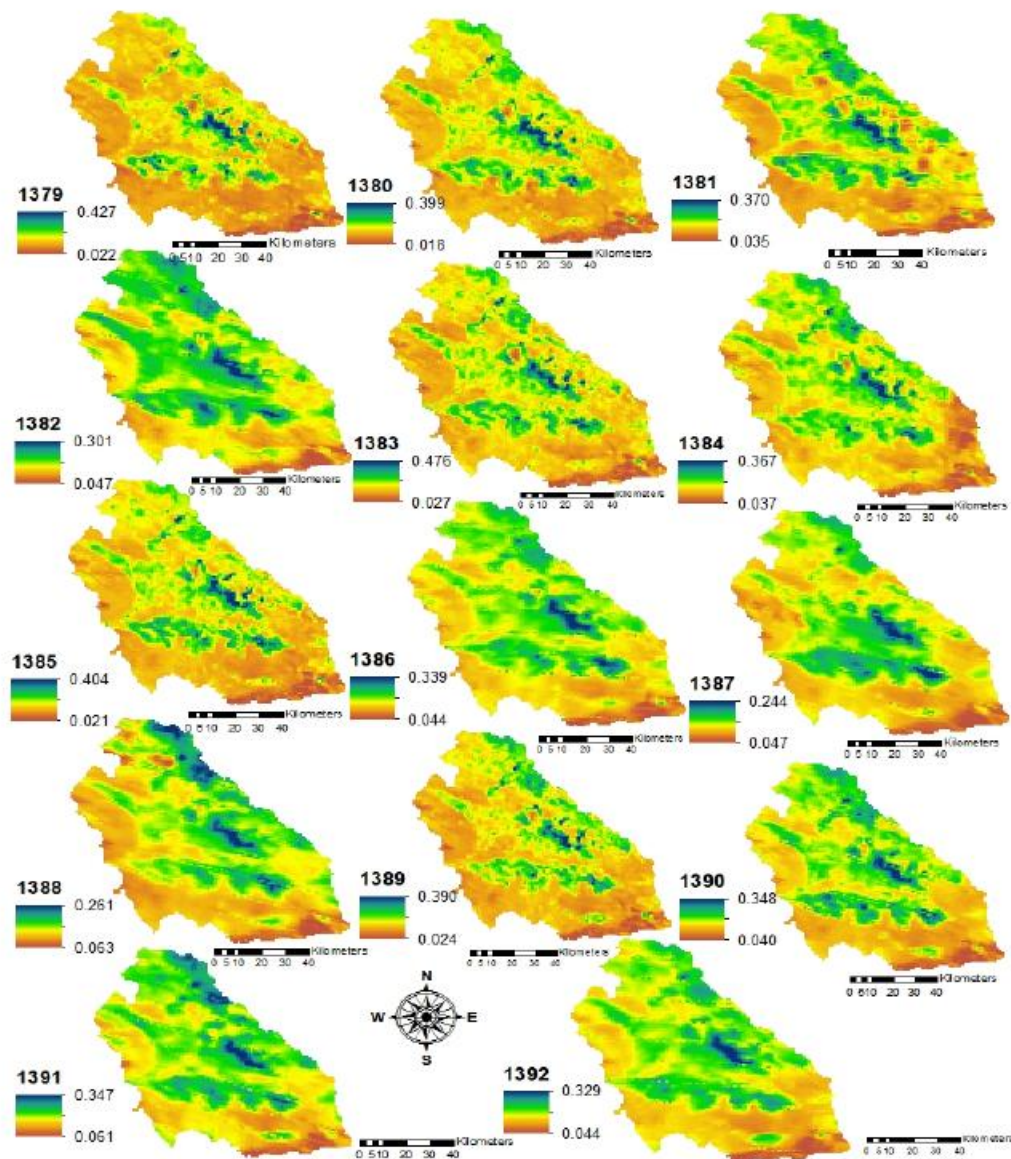
است. شکل‌های (۲) و (۳) توزیع مکانی شاخص NDVI و تبخیر و تعرق واقعی برای روز ژوئیس ۱۹۰ (۱۸ تیرماه) در طی چهارده سال متوالی را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است سال‌های ۱۳۸۲، ۱۳۸۶، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ دارای پوشش گیاهی متراکم‌تر نسبت به سایر سال‌ها و سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۵ از تراکم پوشش گیاهی کمتری برخوردار هستند. اگر نگاهی به شکل (۳) نیز انداخته شود متوجه خواهید شد سال‌های ۱۳۸۲، ۱۳۸۶، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ که از پوشش گیاهی متراکم‌تر برخوردارند از تبخیر و تعرق بیشتر و سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۵ دارای پوشش گیاهی کم‌تر، از تبخیر و تعرق کمتر از سایر سال‌ها برخوردارند. البته در این میان، سال‌هایی نیز وجود دارد که تراکم پوشش گیاهی که با شاخص NDVI نشان داده می‌شود در آن از کیفیت خوبی برخوردار است ولی تبخیر و تعرق در آن شاید زیاد نباشد که علت اسم بردن از دما، رطوبت نسبی و میزان بارندگی در جدول (۱) ارتباط و تاثیر این عوامل بر تبخیر و تعرق می‌باشد. همچنین این عامل را باید در نظر گرفت که هر یکسکسل سنجنده مودیس مساحتی در حدود ۱۰۰ هکتار زمین را شامل می‌شود که مزارعی که در کل ۱۰۰ هکتار

جدول (۲) نتایج مدل سبال با روش‌های معروف پنمن مانیتب و هارگریوز سامانی را با کمک ضرایب تفاضل مطلق، خطای MAE و RMSE نشان می‌دهد. این مقایسات بر اساس میانگین چهارده سال انجام شده است و اگر متوسط ضرایب خطا گرفته شود، تفاضل مطلق، MAE و RMSE بین پنج مزرعه در ۱۴ سال در مقایسه با روش پنمن مانیتب به ترتیب برابر ۰/۵۰۴، ۰/۲۵۳ و ۱/۶۶ و در مقایسه با روش هارگریوز سامانی به ترتیب ۰/۳۰۹، ۰/۹۰ و ۳/۷۳ حاصل خواهد شد. مقادیر تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل مزارع به همراه تفاضل مطلق و نسبی هر یک از سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲ در جدول (۳) نشان می‌دهد در چه سال‌هایی برآورد دقیق‌تر بوده (۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰) و در چه سال‌هایی به دلایل مختلف خطای بیشتری اتفاق افتاده است. همچنین جدول (۳) نشان می‌دهد در مزارع فاروب و حاجی‌آباد نتایج مدل‌های سبال و پنمن مانیتب تطابق بیشتری با هم دارند.

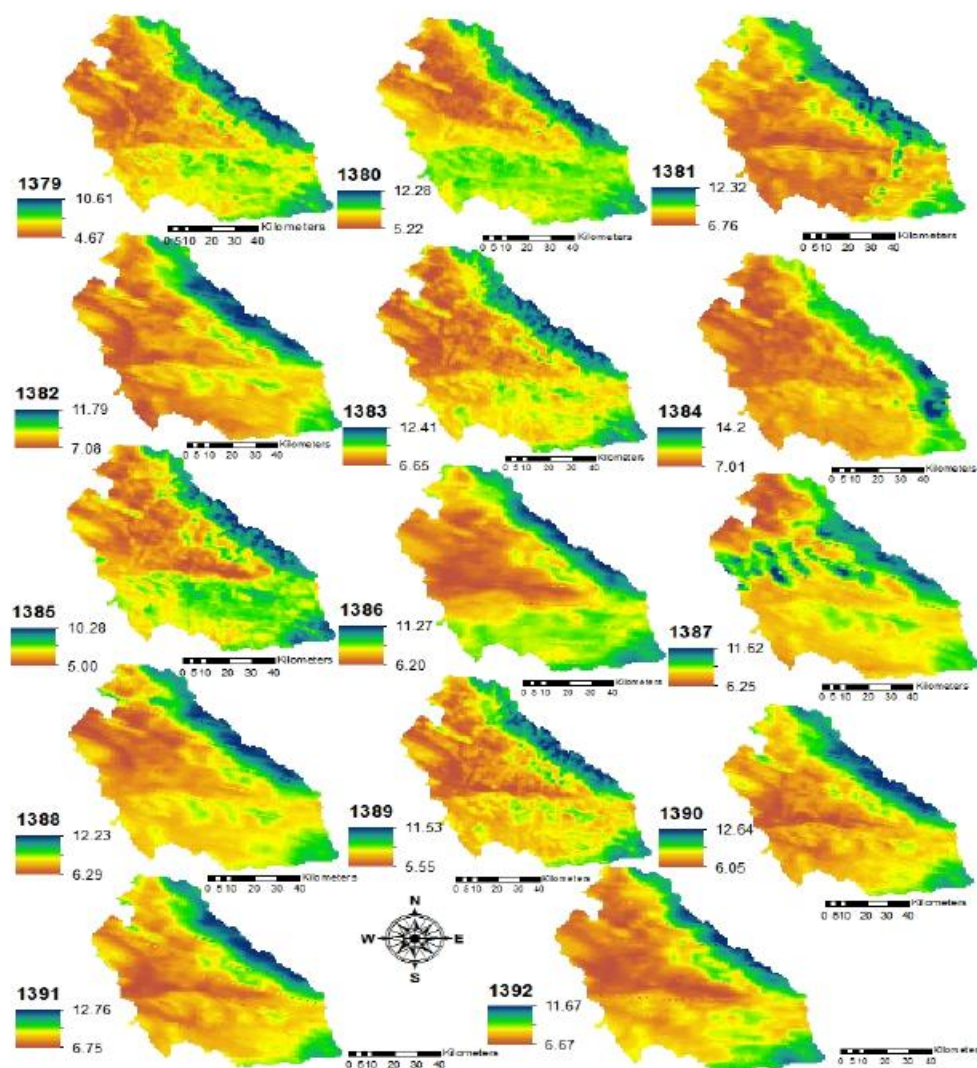
همچنین در این تحقیق به منظور بررسی ارتباط بین پارامترهای تشکیل دهنده مدل سبال و اثر این پارامترها بر تبخیر و تعرق واقعی از دو پارامتر شاخص NDVI و دمای سطحی زمین Ts استفاده شده

بیشتری دارند و این امر در نقشه ها با رنگ تیره به وضوح قابل مشاهده است.

کشت هماهنگی داشته باشند در مناطق نیمه خشک کمتر یافت می شوند. شکل (۳) همچنین مشخص می کند مناطق کوهستانی که دمای سطح زمین پایین دارند تبخیر و تعرق



شکل ۲- شاخص پوشش گیاهی NDVI برای روز ژوئیه سی و نهم در دشت نیشابور در طی سالهای ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲



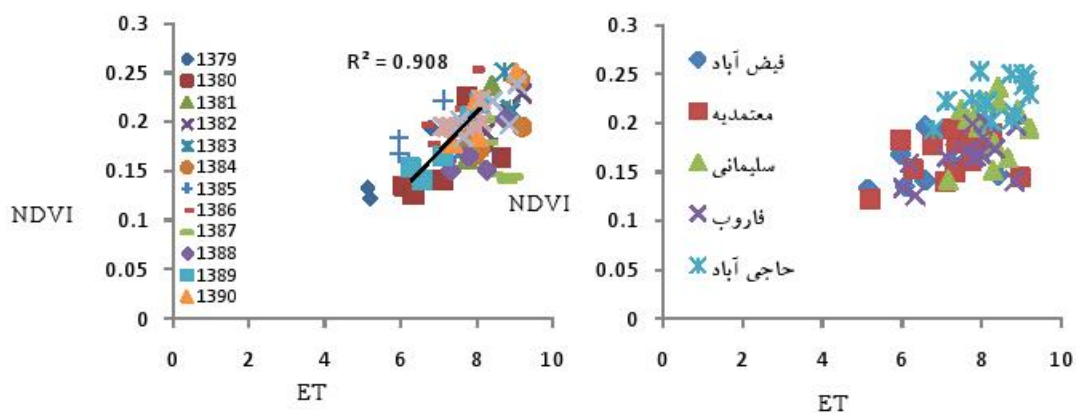
شکل ۳- تبخیر و تعرق واقعی برای روز ژولایوسی ۱۹۰ (۱۸ تیرماه) در دشت نیشابور در طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲

افزایشی داشته ولی دمای سطح زمین T_s در آن کاهش یافته است و برعکس در مواردی که تبخیر و تعرق و NDVI کاهش یافته‌اند مانند سال ۱۳۷۹ دمای سطح زمین افزایش یافته است. ثنایی نژاد و همکاران در سال ۱۳۹۰ در منطقه مشهد به همین نتیجه رسیده بودند. البته باید در اینجا اشاره کرد منظور از افزایش یا کاهش در سال ۱۳۷۹ یا ۱۳۸۶ یا هر سال دیگر، کل سال مورد نظر نیست بلکه در روز ۱۹ ژولایوسی (۱۸ تیرماه) آن سال می‌باشد. البته این را نباید نادیده گرفت که بیشتر مزارع انتخابی دارای کشت غالب گندم و جو هستند که به دلیل برداشت در چند روز قبل از روز ۱۹ (۱۸ تیرماه) سبب شده است از مقدار

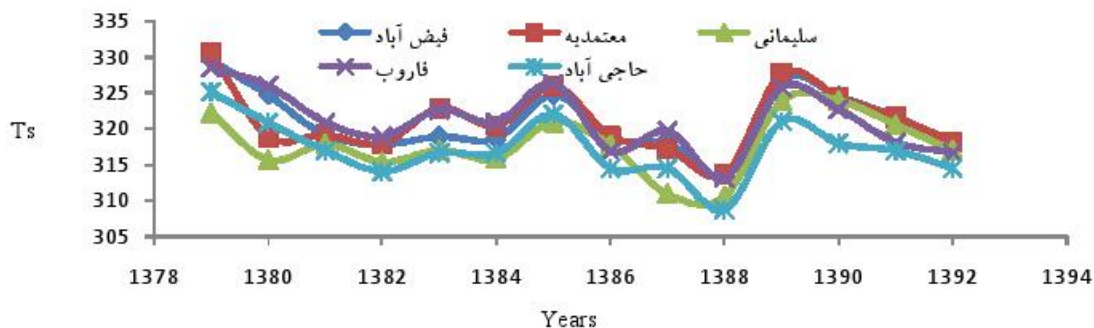
ارتباط تبخیر و تعرق و شاخص NDVI با همبستگی خوب (ضریب تبیین $R^2=0.908$) در شکل (۴) می‌تواند صحت مطالب ارائه شده را نشان دهد. این شکل همبستگی شاخص NDVI و تبخیر و تعرق واقعی را در طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲ در سطح مزارع انتخابی نشان می‌دهند. شکل‌های (۵) و (۶) و (۷) رابطه بین دمای سطح زمین، شاخص NDVI و تبخیر و تعرق را در طی همان چهارده سال بین ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲ در سطح مزارع انتخابی نشان می‌دهد و با توجه به این اشکال می‌توان متوجه شد تقریباً در سال‌هایی که تبخیر و تعرق در آن افزایش یافته مانند سال ۱۳۸۶، شاخص NDVI نیز در آن روند

که تراکم پایین گیاه در اوایل کشت، سبب بالارفتن مقادیر NDVI و ET در این مزارع نشده است.

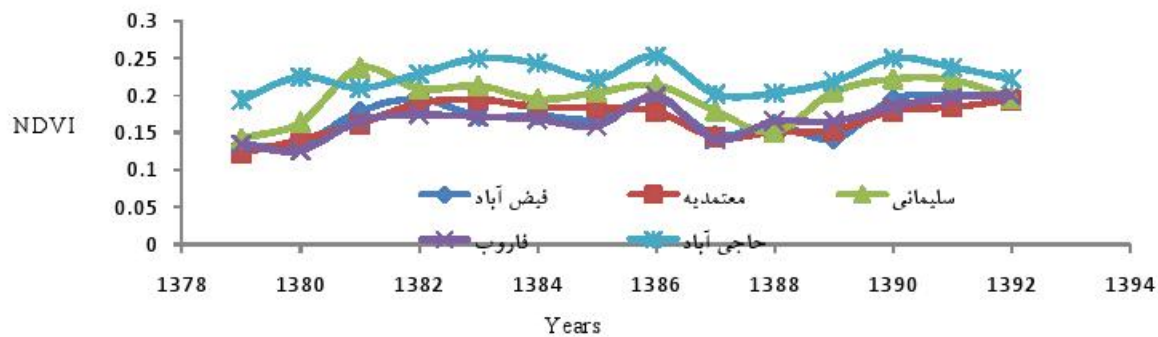
NDVI و ET به مقدار قابل توجهی کاسته شود. بعضی مزارع نیز وجود دارند که تازه شروع به کشت دوم کردند



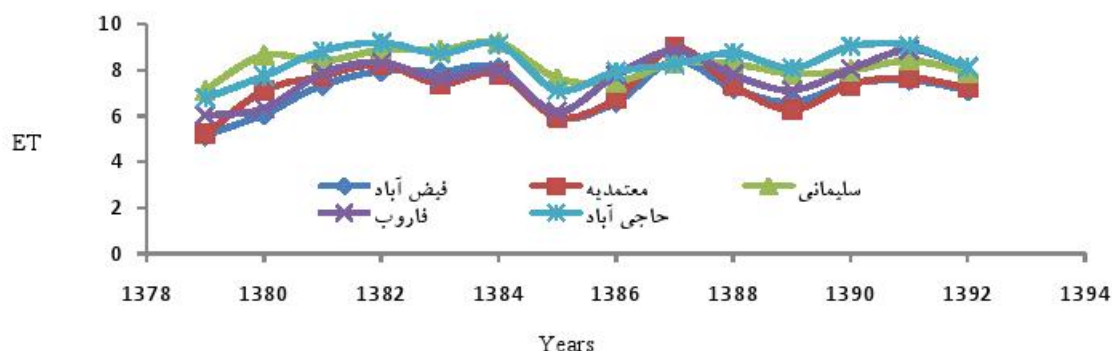
شکل ۴ همبستگی بین تبخیر و تعرق و NDVI برای سال های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲ در سطح مزارع انتخابی



شکل ۵ تغییرات دمای سطح زمین (Ts) برای روز ۱۹۰ ژوئیه سال های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲ در مزارع انتخابی



شکل ۶ تغییرات شاخص پوشش گیاهی (NDVI) برای روز ۱۹۰ ژوئیه سال های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲ در مزارع



شکل ۷ تغییرات تبخیر و تعرق (ET) برای روز ۱۹۰ ژوئیه‌ی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲ در مزارع انتخابی

بحث و نتیجه گیری

سبال یکی از الگوریتم‌های سنجش از دور متداول برای تعیین نقشه توزیع مکانی تبخیر و تعرق و تعیین نیاز آبی گیاهان می باشد که در این تحقیق با کمک ۱۴ تصویر سنجنده مودیس مربوط به سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲ در یک روز خاص (روز ۱۹۰ ژوئیه‌ی) این امر انجام شده است. همچنین به کمک تصاویر ماهواره‌ای، پارامترهای سبال مانند دمای سطح زمین، شاخص NDVI و تبخیر و تعرق مشخص شدند. برای صحت نتایج مدل سبال از دو روش پنمن مانیتث و هارگریوز سامانی استفاده گردید. وجود ضرایب خطای پایین حاصل از ارزیابی بین نتایج مدل سبال با روش‌های محاسباتی بخصوص در مورد روش پنمن مانیتث حاکی از صحت نتایج مدل سبال دارد. در تحقیقات دیگر، کیپتلاو همکاران (۲۰۱۳) از ارزیابی الگوریتم SEBAL و روش پنمن مانیتث، توافق خوب با ضرایب خطای RMSE ۰/۳۴، خطای MAE ۰/۲۸ و ضریب تبیین (R^2) ۰/۳۲ بدست آوردند و سان و همکاران (۲۰۱۱) نیز خطای ۰/۱۰۸ از مقایسه تبخیر و تعرق بدست آمده از سبال و روش پنمن مانیتث بدست آوردند. این همبستگی خوب بین سبال با روش‌های محاسباتی نشان داد که می توان با تکیه بر این مدل، تبخیر و تعرق در یک مکان با وسعت زیاد را پهنه بندی نمود و در برنامه ریزی آبیاری و طرح‌های منابع آب از آن‌ها استفاده نمود.

همچنین نتایج این تحقیق مشخص کرد که پارامتر پوشش گیاهی همسو و دمای سطحی زمین در جهت مخالف با تبخیر و تعرق تغییر می‌کند. به طوری که در مناطق با پوشش گیاهی خوب و مترکم و دمای سطح زمین کم، تبخیر و تعرق بیشتر از مناطق دیگر است. در جهت مخالف بودن دما با NDVI درست شبیه انتخاب پیکسل سرد و گرم می‌باشد در آن موقع نیز برای انتخاب پیکسل سرد از پیکس‌هایی با دمای کم و NDVI زیادتر استفاده شد. بنابراین باید در انتخاب پیکسل سرد و گرم دقت بیشتری ارائه کرد که تغییر در پیکسل سرد و گرم بر نتایج مدل سبال موثر خواهد بود. پائول و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقی حداقل اثر تعیین اشتباه پیکسل سرد و گرم را ۲۰٪ مشخص کرده بودند. بخصوص به دلیل اینکه هر پیکسل تصاویر مودیس مساحتی در حدود ۱۰۰ هکتار را شامل می‌شود ممکن است قسمتی از پیکسل سرد مناطق بدون پوشش گیاهی و با دمای زیاد و پیکسل گرم مناطقی با پوشش گیاهی مناسب‌تر را شامل شود که این سبب می‌شود تبخیر و تعرق بیشتر یا کمتر برآورد شود. همچنین این تحقیق، سال‌هایی که تبخیر و تعرق و نیاز آبی در مقایسه با سایر سال‌ها برای یک روز خاص بیشتر بوده و سال‌هایی که گیاهان به دلایل مختلف دچار تنش ناشی از کمبود تبخیر و تعرق شده اند را مشخص نمود. در حالت کلی این تحقیق مشخص کرد برای مناطق نیمه خشک مانند دشت نیشابور که در مقیاس وسیع و دارای مناطق کوهستانی فراوان می باشند، استفاده از وسایل اندازه‌گیری

مستقیم تبخیر و تعرق امکان پذیر نیست و می توان تبخیر
و تعرق واقعی را با روش های مبتنی بر سنجش ازدور
مانند الگوریتم سبال تخمین زد و از آن در طرح های منابع
آب، کشاورزی و محیط زیست بهره جست. همچنین با
مشخص شدن پهنه بندی تبخیر و تعرق از روند تغییرات
پوشش گیاهی و دمای سطح زمین منطقه نیز اطلاع حاصل
نمود.

فهرست منابع

۱. اکبری، م.، سیف ز. و ح. زارع ایبانه. ۱۳۹۰. برآورد میزان تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل در شرایط اقلیمی مختلف با استفاده از سنجش از دور. آب و خاک. (۴): ۸۴۴-۸۳۵.
۲. ثنائی نژاد، س.ح.، نوری، س.، و س.م. هاشمی نیا. ۱۳۹۰. برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره ای در منطقه مشهد. آب و خاک. (۳): ۵۴۷-۵۴۰.
۳. خاشعی سیوکی، ع. و ح. شجاعی سیوکی. ۱۳۹۰. بررسی منابع آب شور و لب شور دشت نیشابور و ارائه راهکارهای مدیریتی استفاده از آن. یازدهمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر. دانشگاه شهیدباهنر کرمان.
۴. علیزاده، ا. ۱۳۸۵. رابطه آب و خاک و گیاه. دانشگاه امام رضا(ع). انتشارات آستان قدس رضوی. ۶: ۳۱۹-۳۲۵.
۵. کریمی، ع.، فرهادی بانسوله، ب. و ح. حصادی. ۱۳۹۱. برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه ای با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر لندست. آبیاری و زهکشی ایران. (۴): ۳۶۴-۳۵۳.
۶. موسوی بایگی، م.، عرفانیان، م. و م. سرمد. ۱۳۸۸. استفاده از حداقل داده های هواشناسی برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع و ارائه ضرایب اصلاحی (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی). آب و خاک. (۱): ۹۹-۹۱.
7. Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., and W.G.M. Bastiaanssen. 2002. Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)-Advanced Training and User's Manual, University of Idaho: Kimberly, ID, USA, 98 p.
8. Bastiaanssen, W.G.M. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. Hydrology. 229: 87-100.
9. Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A. and A.A.M. Holtslag. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL), part 1: formulation. Hydrology. 212-213:198-212.
10. Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., David, G., Thoreson, B.P., and R.G. Allen. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions. Irrigation Drainage Engineering. 131: 85-93.
11. Kiptala, J.K., Mohamed, Y., Mul, M.L., and P. Van der Zaag. 2013. Mapping evapotranspiration trends using MODIS and SEBAL model in a data scarce and heterogeneous landscape in Eastern Africa. Water Resources Research. 49(12): 8495-8510.
12. Papadaavid, G., Hadjimitsis, D.G., Toullos, L., and S. Michaelides. 2013. A modified SEBAL modeling approach for estimating crop evapotranspiration in semi-arid conditions. Water resources management. 27(9): 3493-3506.
13. Paul, G., Gowda, P., Vara Prasad, P., Howell, T., Aiken, R., and C. Neale. 2014. Investigating the influence of roughness length for heat transport (zoh) on the performance of SEBAL in semi-arid irrigated and dry land agricultural systems. Hydrology. 509:231-244.

14. Sari, D.K., Ismullahb, I.H., Sulasdib, W., and A.B., NHartob. 2013. Estimation of water consumption of lowland rice in tropical area based on heterogeneous cropping calendar using remote sensing technology. *Procedia Environmental Sciences*. 17: 298 – 307.
15. Steele, D., Thoreson, B., Hopkins, D., Clark, B., Tuscherer, S., and R. Gautam. 2014. Spatial mapping of evapotranspiration over Devils Lake basin with SEBAL: application to flood mitigation via irrigation of agricultural crops. *Irrigation Science*. DOI: 10.1007/s00271-014-0445-1.
16. Sun, Z., Weia, B., Sub, W., Shena, W., Wanga, Ch., Youa, D., and Z. Ziu. 2011. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modeling*. 54: 1086–1092.