



## پایش شرایط نیاز آبی محصولات کشاورزی با استفاده از داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: مزرعه نمونه آستان قدس رضوی، مشهد)

رضا قاسمی<sup>۱</sup>، علی عباسی<sup>۲\*</sup>، حسین اعتمادفرد<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

[aabbasi@um.ac.ir](mailto:aabbasi@um.ac.ir)

### خلاصه

با توجه به محدودیت منابع آب در دسترس برای اهداف مختلف، بخصوص کشاورزی، مدیریت بهینه منابع آب از اولویت‌های اساسی می باشد. با توجه به مصرف حجم عمده آب در بخش کشاورزی، یکی از عوامل مهمی که نقش بسزایی در مدیریت منابع آب حوضه ایفا می کند، استفاده بهینه از آب و افزایش عملکرد به ازای حجم آب مصرفی می باشد. این امر مستلزم پایش پیوسته نیاز آبی محصولات کشت شده و اتخاذ تصمیم مناسب است. در شرایط کمبود داده‌های زمینی برای این هدف، سنجش از دور ابزار مناسب و کم هزینه‌ای برای برآورد نیاز آبی گیاهان می باشد. در این پژوهش از مدل بیلان انرژی در سطح زمین (سبال) برای تخمین میزان تبخیر و تعرق و نیاز آبی محصولات کشاورزی استفاده شده است. ۳۲ تصویر ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ و داده‌های ایستگاه سینوپتیک مشهد در الگوریتم سبال مورد استفاده قرار گرفت تا نیاز و تنش آبی محصولات زراعی و باغی مزرعه نمونه آستان قدس رضوی در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ برآورد گردد. برای استفاده از تمامی تصاویر، تصاویر ابری توسط الگوریتم تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی (هانتس)، بازسازی شدند. نتایج بدست آمده از مدل سبال با نتایج حاصل از روش پنمن-مانتیش فائو توسط شاخص‌های آماری مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این ارزیابی نشان دهنده کارایی خوب این الگوریتم در این منطقه می باشد.

**کلمات کلیدی:** نیاز آبی، سنجش از دور، الگوریتم سبال، لندست ۷، لندست ۸

### ۱. مقدمه

بخش کشاورزی بزرگترین مصرف کننده آب شیرین در بین مصرف کننده‌گان آب می باشد، بنابراین مدیریت مصرف آب در این بخش کمک شایانی به بهبود ذخایر آب شیرین خواهد کرد. یکی از مهم‌ترین پارامترها جهت مدیریت آب کشاورزی، برآورد نیاز آبی محصولات است. از گذشته تاکنون از روش‌های مختلفی برای تخمین نیاز آبی استفاده شده است که اکثر آن‌ها علاوه بر هزینه‌بر و زمان‌بر بودن، یا دقت کافی نداشته و یا در صورت داشتن دقت کافی، تنها اطلاعات یک نقطه از کل منطقه مورد مطالعه را ارائه می کند. سنجش از دور یکی از روش‌های برآورد نیاز آبی گیاهان می باشد که معایب قید شده را نداشته و داده‌های آن به طور متوالی موجود است. از پرکاربردترین روش‌های مبتنی بر سنجش از دور برای برآورد نیاز آبی گیاهان، می توان الگوریتم سبال<sup>۱</sup> را نام برد که با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های زمینی اندک، نیاز آبی گیاهان موجود منطقه را بر پایه روابط فیزیکی و تجربی برآورد می کند.

<sup>۱</sup> SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land)



باستیانسن<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۸) در سال ۱۹۹۸ برای اولین بار مدل جدیدی به نام سبال را معرفی کردند که می‌توانست با استفاده از داده‌های سنجش از دور، توزیع مکانی انرژی سطوح با پوشش‌های گوناگون را تخمین بزند. در این مدل شار انرژی مستقل از نوع پوشش زمین محاسبه شده و تصاویر مادون قرمز حرارتی با قدرت تفکیک مکانی مختلف به کار گرفته شدند [1].

باستیانسن و همکاران (۱۹۹۸) به منظور صحت‌سنجی مدل سبال، اطلاعات تبخیر و تعرق سه مزرعه در کشورهای اسپانیا، نیجریه و چین را با نتایج حاصل از این مدل مقایسه کردند. این محققین بعد از بررسی نتایج و مقایسه آن با داده‌های زمینی به این نتیجه رسیدند که شار تبخیر و تعرق روزانه محاسبه شده با کمک الگوریتم سبال در مقیاس بزرگ قابل استفاده بوده و هر چه مقیاس مکانی بزرگ‌تر باشد مقدار خطا کاهش و صحت نتایج بدست آمده افزایش می‌یابد [2].

ثنائی نژاد و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس<sup>۲</sup> و الگوریتم سبال، تبخیر و تعرق واقعی روزانه برای زیر حوضه آبریز قره‌قوم واقع در حوضه آبریز مشهد را در روزهای ۱۴ خرداد، ۱۰ تیر و ۴ مرداد سال ۱۳۸۸ با در نظر گرفتن شرایط توپوگرافی بدست آوردند. طبق نتایج این پژوهش، نواحی دارای تبخیر و تعرق کم، از پوشش گیاهی پراکنده و دمای بالا برخوردار بودند و نواحی دارای تبخیر و تعرق زیاد از پوشش گیاهی متراکم و دمای پایین برخوردار بودند. نتایج این مطالعه نشان داد که الگوریتم سبال و تصاویر سنجنده مودیس قادر هستند مقادیر تبخیر و تعرق واقعی را در مقیاس روزانه در حوضه آبریز مشهد به خوبی محاسبه کنند [3].

زارع خورمیزی و غفاریان مالیری (۱۳۹۹) با استفاده از ۱۶ تصویر ماهواره لندست ۸، که دوره رشد یک ساله گیاه پسته در سال ۱۳۹۴-۱۳۹۳ را پوشش می‌دهد و با کمک الگوریتم سبال و داده‌های هواشناسی، پس از بازسازی تصاویر شاخص‌های گیاهی تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی<sup>۳</sup> و دمای سطح زمین<sup>۴</sup> با استفاده از الگوریتم تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی<sup>۵</sup> و تجزیه و تحلیل طیفی منفرد، تبخیر و تعرق واقعی روزانه در باغات پسته حاشیه‌ی کویر ابرکوه در استان یزد را برآورد نمودند. در مرحله‌ی بعد با تقسیم این مقدار بر تبخیر و تعرق گیاه مرجع، نقشه‌های ضریب گیاهی<sup>۶</sup> را تهیه کردند. سپس رابطه‌ی این نقشه‌ها را با شاخص NDVI برای دوره‌های مختلف رشد گیاه پسته بدست آوردند. طبق نتایج این پژوهش، در میانه فصل رشد پسته و اوج گرما، همبستگی بین NDVI و Kc بیشتر بوده و در ابتدا و انتهای دوره رشد همبستگی کمتری مشاهده شد [4].

چنگک<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهش خود از ۳ محصول سنجنده مودیس شامل مقادیر آلبدوی سطح، دمای سطح زمین و NDVI استفاده کرده و با بکارگیری آن‌ها در الگوریتم سبال، تبخیر و تعرق روزانه را برای یک دوره طولانی مدت از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸ در کشور چین با دقت مکانی ۱ کیلومتر در ۱ کیلومتر محاسبه کردند. نتایج این مدل با محصول MOD16 ET سنجنده مودیس در مقیاس نقطه‌ای و حوضه‌ای مقایسه شد. در مقیاس نقطه‌ای هر دو مدل دقت قابل قبولی داشتند، اما نتایج مدل سبال دقیقتر بود. در سطح حوضه، نتایج هر دو مدل نسبت به مقیاس نقطه‌ای بهبود یافته بود و باز هم نتایج مدل سبال از محصول MOD16 ET بهتر بود [5].

هدف از این پژوهش تعیین نیاز و تنش آبی محصولات زراعی و باغی مزرعه نمونه آستان قدس رضوی با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ می‌باشد. برای جلوگیری از ورود اطلاعات غلط ناشی از ابرناکی پیکسل‌ها در مدل، تصاویر شاخص‌های گیاهی، دمای سطح زمین و آلبدو سطح بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای با الگوریتم تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی بازسازی شدند.

## ۲. منطقه مورد مطالعه

مزرعه نمونه آستان قدس رضوی در جنوب شرقی مشهد مقدس، در طول جغرافیایی ۳۸° ۵۹' تا ۴۸° ۵۹' و عرض جغرافیایی ۰۷' ۳۶' تا ۱۸' ۳۶' واقع شده است. ارتفاع این منطقه از سطح آب‌های آزاد ۹۸۵ متر و میانگین بارندگی سالانه آن ۲۴۸ میلی‌متر می‌باشد. از نظر طبقه‌بندی اقلیمی این منطقه دارای آب و هوای خشک و نیمه خشک است [6]. در شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعاتی و ایستگاه سینوپتیک مشخص شده است.

در این مزرعه به دلیل برخورداری از منابع آب مناسب و وسعت زیاد، محصولات متنوعی کشت می‌شود. در شکل ۲ موقعیت مکانی محصولات گندم، جو، کلزا، گوجه، ذرت و باغات در مزرعه نشان داده شده است. این محصولات که سطح کشت وسیعی از مزرعه را به خود اختصاص داده‌اند، برای

<sup>1</sup> Bastiaanssen et al.

<sup>2</sup> MODIS

<sup>3</sup> NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

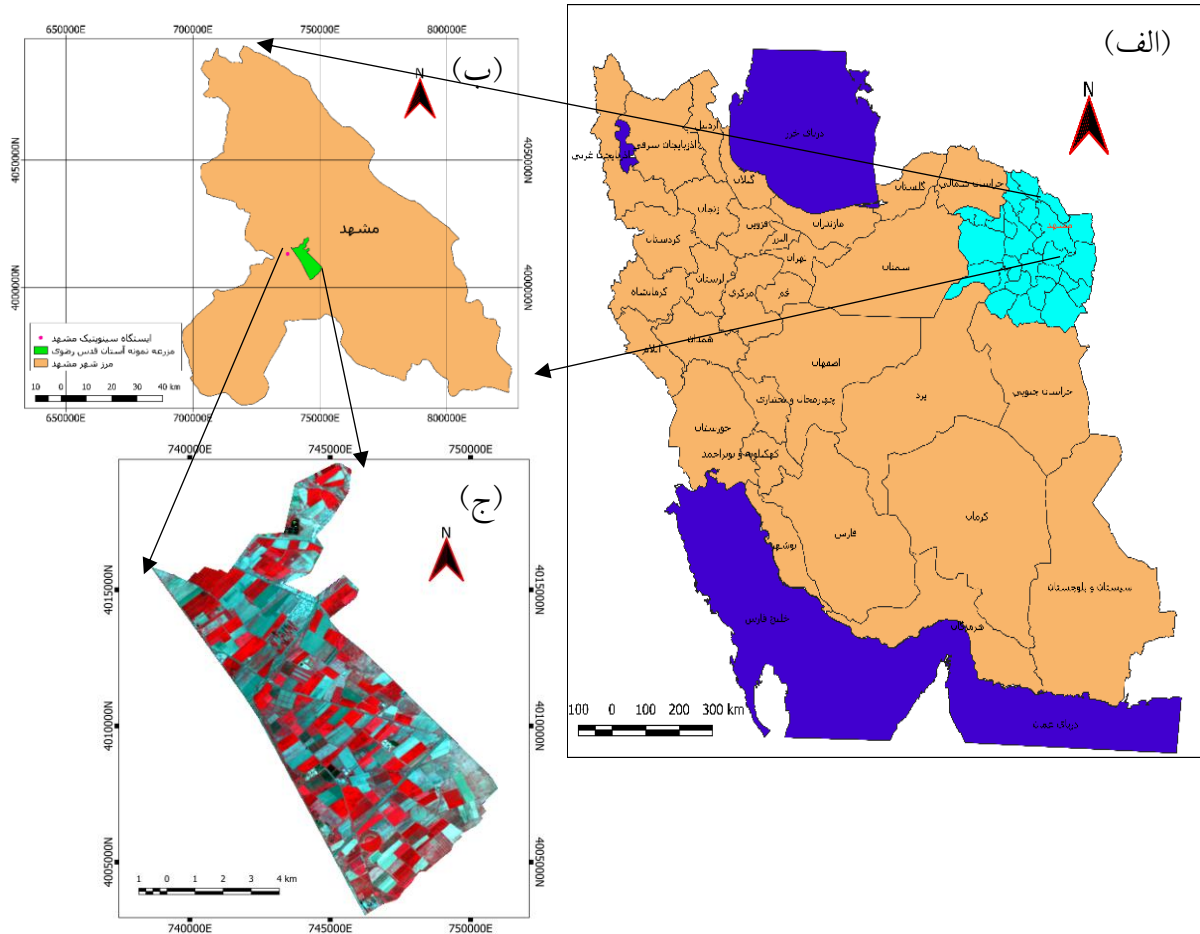
<sup>4</sup> LST (Land Surface Temperature)

<sup>5</sup> HANTS (Harmonic ANalysis of Time Series)

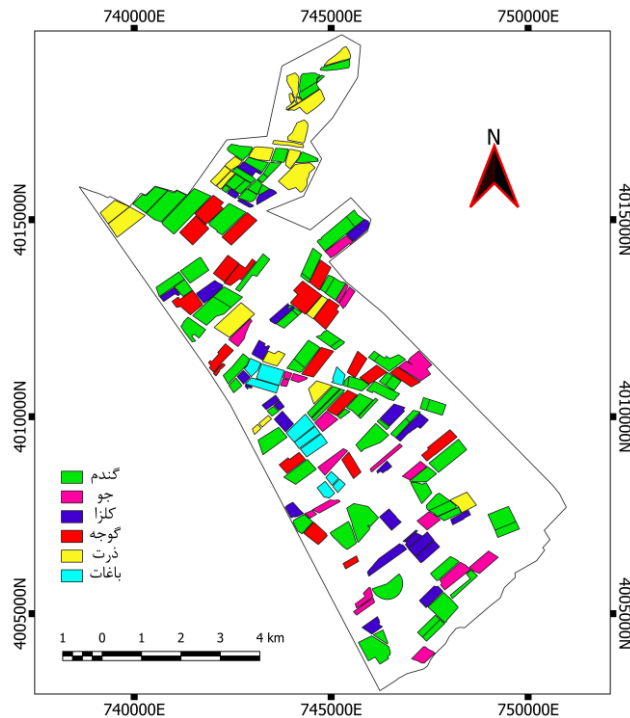
<sup>6</sup> Kc

<sup>7</sup> Cheng et al.

انجام پژوهش انتخاب شدند. باغات شامل محصولات سیب، گلابی، آلبالو، آلو، هلو و شلیل است که به دلیل چرخه فنولوژی تقریباً یکسان، این محصولات در دسته باغات قرار گرفتند.



شکل ۱ - موقعیت منطقه مطالعاتی: (الف) کشور ایران؛ (ب) شهر مشهد؛ (ج) مزرعه نمونه آستان قدس رضوی



شکل ۲ - موقعیت مکانی محصولات مزرعه نمونه آستان قدس رضوی

## ۳. مواد و روش‌ها

در ابتدا تصاویر ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ برای منطقه مورد نظر و در زمان‌های مورد نیاز دانلود شدند. سپس بر روی این تصاویر پیش پردازش‌های مورد نیاز صورت گرفت تا این تصاویر برای استفاده در مراحل بعدی آماده شوند. میزان تبخیر و تعرق لحظه‌ای در الگوریتم سبال از طریق شار گرمای نهان تبخیر برای هر پیکسل تصویر، از باقیمانده تفریق شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس از شار تابش خالص خورشیدی در سطح زمین بدست می‌آید. شار تابش خالص خورشیدی از توازن چهار شار تابشی در سطح زمین محاسبه شد که این چهار شار تابشی عبارتند از: تشعشعات طول موج بلند ورودی، تابش طول موج کوتاه ورودی، تشعشعات طول موج بلند گسیل شده از سطح و بازتابش طول موج کوتاه خروجی. میزان انتقال گرما در پوشش گیاهی و سطح خاک بر اثر هدایت ملکولی را شار گرمای خاک گویند. طبق نتایج مطالعات برای بدست آوردن شار گرمای خاک، در ابتدا نسبت شار گرمای خاک و شار خالص خورشیدی در سطح بدست آمده و سپس شار گرمای خاک محاسبه شد. برای محاسبه شار گرمای محسوس ابتدا دو پیکسل انتخاب گردید. یکی از این پیکسل‌ها که پیکسل گرم نام دارد، زمین کشاورزی خشک و بدون پوشش گیاهی می‌باشد. بنابراین مقدار شار گرمای نهان تبخیر در این پیکسل صفر فرض می‌شود. پیکسل دوم که پیکسل سرد نام دارد، مربوط به منطقه‌ای آبیاری شده با پوشش گیاهی کامل می‌باشد. دمای سطح در این پیکسل نزدیک به دمای هوا است و تبخیر و تعرقی معادل تبخیر و تعرق مرجع دارد. سپس با توجه به فرمول کلی، شار گرمای محسوس در این دو پیکسل محاسبه شده و سپس شار گرمای محسوس با توجه به رابطه بدست آمده از دو پیکسل انتخابی برای سایر پیکسل‌ها تخمین زده می‌شود. پس از محاسبه همه پارامترها، تصویر تبخیر و تعرق واقعی لحظه‌ای برآورد می‌شود که با استفاده از این تصویر می‌توان تبخیر و تعرق را برای بازه‌های زمانی دلخواه روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه برآورد نمود. در نهایت، نتیجه بدست آمده، با تبخیر و تعرق حاصل از روش پنمن-مانیت فائو از طریق شاخص‌های آماری خطای جذر میانگین مربعات، میانگین خطای مطلق و درصد میانگین خطای مطلق مقایسه و صحت‌سنجی شد. با استفاده از نتایج حاصل از الگوریتم سبال و نقشه موجود از منطقه، که در آن محصولات تفکیک شده‌اند، نیاز آبی محصولات منطقه برای یک دوره رشد محاسبه شد. با محاسبه تبخیر و تعرق استاندارد و مقایسه آن با تبخیر و تعرق واقعی، تنش آبی محصولات منطقه در بازه‌های زمانی مختلف بررسی شد. در الگوریتم سبال نمی‌توان از عکس‌های ابری به دلیل عدم وجود اطلاعات صحیح در مناطقی که توسط ابر پوشیده شده است استفاده کرد و در صورت از دست دادن تصویر، بازه زمانی بین تصاویر استفاده شده افزایش می‌یابد. هر چه بازه زمانی بین تصاویر کمتر باشد نتایج دقیق‌تری حاصل خواهد شد. برای رفع این مشکل از الگوریتم HANTS



# سیزدهمین کنگره ملی مهندسی عمران

۲۰ و ۲۱ اردیبهشت ۱۴۰۱

دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران



استفاده شده است. این الگوریتم براساس مفهوم تبدیل فوریه گسسته به مدل سری زمانی برای داده‌های ماهواره‌ای است. با استفاده از این روش می‌توان از تمام تصاویر موجود استفاده کرد. شکل ۳ ساختار کلی مراحل انجام پژوهش را نشان می‌دهد.

الگوریتم سبال بر پایه روابط تجربی و فیزیکی با قابلیت کالیبراسیون داخلی، تبخیر و تعرق واقعی را با کم کردن مقدار انرژی وارد شده به خاک و شار گرمای محسوس از تابش خالص خورشیدی برآورد می‌نماید [7]. جهت دقیق‌تر و کاربردی‌تر شدن این الگوریتم ضرایب تجربی به کار برده شده است. برای اجرای این الگوریتم نیازی به نقشه کاربری اراضی نمی‌باشد [8]. از این الگوریتم می‌توان برای برآورد نیاز آبی محصولات زراعی، مرتعی، جنگل‌ها، پوشش گیاهی طبیعی، خاک لخت، بیابان‌ها و آب‌های آزاد استفاده کرد [9]. مدل سبال نویدبخش‌ترین الگوریتمی است که می‌تواند با حداقل داده ورودی، تبخیر و تعرق واقعی را برای هر پیکسل تصویر در زمان تصویربرداری سنجنده با استفاده از معادله کلی بیلان انرژی محاسبه کند [10].

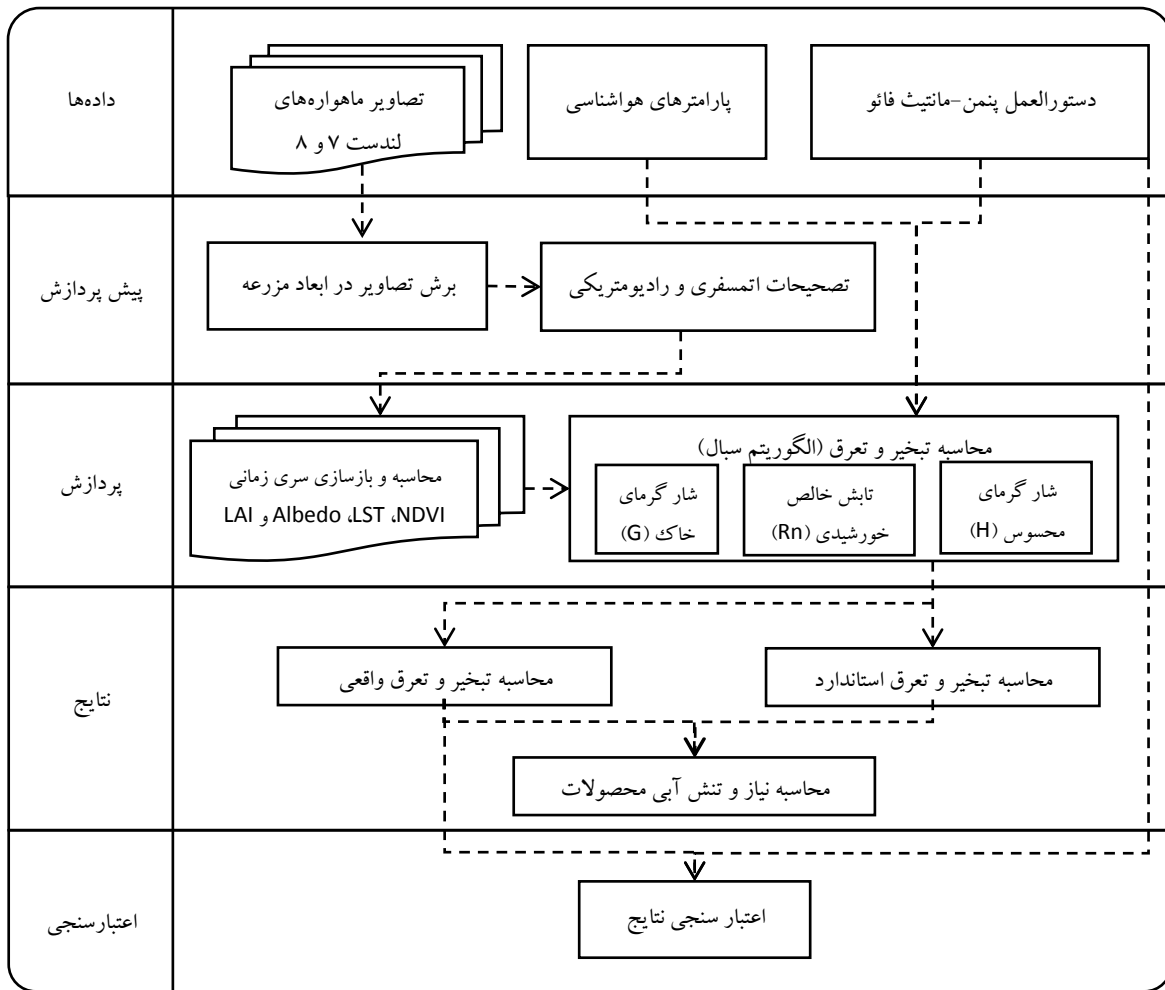
$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (1)$$

که در آن  $\lambda ET$  شار گرمای نهان ( $W/m^2$ )،  $R_n$  تابش خالص خورشیدی ( $W/m^2$ )،  $G$  شار گرمای خاک ( $W/m^2$ ) و  $H$  شار گرمای محسوس ( $W/m^2$ ) هستند.

تابش خالص خورشیدی موازنه انرژی جذب شده، منعکس شده و منتشر شده از سطح زمین و بیانگر انرژی تابش واقعی موجود در سطح زمین است. این تابش معمولاً در روز مثبت و در شب و شرایط حدی در عرض جغرافیای بالا، منفی است [11]. مقدار  $R_n$  مطابق رابطه زیر با کسر شارهای تابشی خروجی از تابش‌های ورودی محاسبه می‌شود [12].

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

که در آن  $R_{s\downarrow}$  تابش طول موج کوتاه ورودی ( $W/m^2$ )،  $\alpha$  آلبدو سطح (بدون بعد)،  $R_{L\downarrow}$  تابش طول موج بلند ورودی ( $W/m^2$ )،  $R_{L\uparrow}$  تابش طول موج بلند خروجی ( $W/m^2$ ) و  $\epsilon_o$  گسیلمندی سطحی باند پهن بدست آمده از شاخص سطح برگ (بدون بعد)، می‌باشند.



شکل ۳- روند کلی پژوهش

شار گرمای خاک مقدار انرژی مصرفی برای گرم شدن خاک در اثر هدایت مولکولی می‌باشد. مقدار این شار در مقایسه با تابش خالص خورشیدی پایین بوده و در بعضی روش‌ها از آن صرف نظر می‌شود [11] اما در مدل سیبال برای برآورد تبخیر و تعرق، این پارامتر لحاظ و از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0075\alpha^2)(1 - 0.98NDVI^4) \quad (3)$$

که در آن  $T_s$  دمای سطح ( $^{\circ}\text{C}$ )،  $\alpha$  آلبدو سطح و  $NDVI$  شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (بدون بعد) می‌باشند. شار گرمای محسوس، میزان هدر رفت گرمایی هوا توسط فرآیند همرفت و هدایت مولکولی به دلیل اختلاف دما می‌باشد.  $H$  تابعی از گرادیان دما، زبری سطح و سرعت باد است و از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$H = \frac{\rho \times c_p \times dT}{r_{ah}} \quad (4)$$

که در آن چگالی هوا ( $\text{kg/m}^3$ )،  $c_p$  گرمای ویژه هوا ( $1004 \text{ J/kg/}^{\circ}\text{K}$ )،  $dT$  اختلاف دما بین دو سطح  $Z_1$  و  $Z_2$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) و  $r_{ah}$  مقاومت آیرودینامیکی در برابر انتقال گرما ( $\text{s/m}$ ) هستند.

شار گرمای نهان میزان هدر رفت گرمای سطح برای تبخیر و تعرق می‌باشد که پس از محاسبه‌ی همه متغیرها با استفاده از رابطه ۱ می‌توان آن را برای لحظه گذر ماهواره برای هر پیکسل بدست آورد. برای محاسبه‌ی تبخیر و تعرق لحظه‌ای ابتدا باید گرمای نهان تبخیر محاسبه شود.

$$\lambda = (2.501 - 0.00236T_s) \times 10^6 \quad (5)$$

که در آن  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر یا میزان گرمای جذب شده برای تبخیر یک کیلوگرم آب ( $J/kg$ ) و  $T_s$  دمای سطح ( $^{\circ}C$ ) می‌باشند. پس از محاسبه‌ی متغیرهای لازم می‌توان تبخیر و تعرق لحظه‌ای را با استفاده از رابطه‌ای که در زیر ارائه شده است برای هر پیکسل تصویر محاسبه نمود.

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (6)$$

که در آن  $ET_{inst}$  تبخیر و تعرق واقعی ( $mm/hr$ ) و  $3600$  تبدیل زمان از ثانیه به ساعت می‌باشند. کسر تبخیر و تعرق مرجع به عنوان نسبت تبخیر و تعرق لحظه‌ای به تبخیر و تعرق مرجع تعریف می‌شود. از  $ET_r F$  برای برون‌یابی تبخیر و تعرق از زمان تصویر به بازه‌های زمانی ۲۴ ساعته و بیشتر استفاده می‌شود. مقدار  $ET_r F$  معمولاً بین صفر و یک است. در زمین‌های خشک به دلیل این که تبخیر و تعرقی انجام نمی‌شود، مقدار  $ET_r F$  صفر می‌باشد. در زمین‌های زراعی پوشیده شده با ذرت یا یونجه گاهی تبخیر و تعرق واقعی بیشتر از تبخیر و تعرق مرجع می‌شود که در این صورت مقدار  $ET_r F$  از یک بیشتر شده و به حدود  $1/1$  می‌رسد. مقادیر منفی  $ET_r F$  می‌تواند به علت خطای سیستماتیک ناشی از مفروضات صورت گرفته در الگوریتم سبال باشد [12].

$$ET_r F = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (7)$$

که در آن  $ET_{inst}$  تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ( $mm/hr$ ) و  $ET_r$  تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده با پارامترهای هواشناسی ( $mm/hr$ ) می‌باشند.

معمولاً مقادیر روزانه تبخیر و تعرق از مقادیر لحظه‌ای کاربرد بیشتری دارد که با استفاده از فرمول زیر می‌توان آن را بدست آورد.

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_{r\_24} \quad (8)$$

که در آن  $ET_r F$  کسر تبخیر و تعرق مرجع (بدون بعد) و  $ET_{r\_24}$  تبخیر و تعرق مرجع تجمعی ۲۴ ساعت روز تصویربرداری ( $mm/day$ ) می‌باشند.

گاهی نیاز است تا نقشه تبخیر و تعرق در یک بازه زمانی دلخواه در دسترس باشد. مثلاً داشتن نقشه تبخیر و تعرق برای دوره‌ای که فصل رشد محصول را پوشش دهد برای محاسبه‌ی نیاز آبی مورد نیاز است. برای این کار می‌توان از داده‌های تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته با برون‌یابی  $ET_{24}$  متناسب با تبخیر و تعرق مرجع از رابطه زیر استفاده کرد.

$$ET_{period} = ET_r F_{period} \sum_1^n ET_{r\_24} \quad (9)$$

که در آن  $ET_r F_{period}$  نماینده  $ET_r F$  برای دوره محاسباتی (بدون بعد)،  $ET_{r\_24}$  تبخیر و تعرق مرجع روزانه ( $mm/day$ ) و  $n$  تعداد روزهای دوره می‌باشند. برای محاسبه‌ی تبخیر و تعرق در یک دوره، اولین قدم تعیین دوره‌ای می‌باشد که برآورد تبخیر و تعرق برای آن مطلوب است. پس از آن باید مشخص کرد که هر تصویر ماهواره‌ای برای تعیین تبخیر و تعرق چه روزهایی استفاده می‌شود. به طور مثال اگر در تاریخ‌های ۱۳، ۲۱ و ۲۹ فروردین تصاویر ماهواره‌ای در دسترس باشد، دوره مربوط به تصویر ۱۳ فروردین، روزهای ۱۰ تا ۱۷ فروردین و دوره مربوط به تصویر ۲۱ فروردین، روزهای ۱۸ تا ۲۵ فروردین می‌باشد. برای تعیین روزهای مربوط به بقیه تصاویر به همین طریق عمل می‌کنیم.

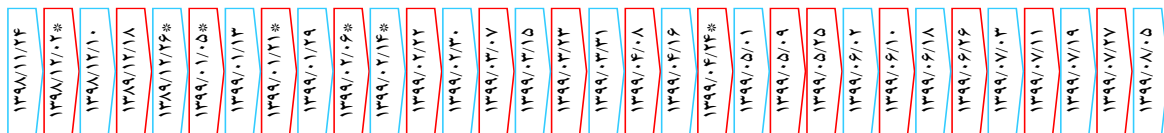
اکثر مطالعات در حوضه مدیریت منابع آب، از قبیل تعیین نیاز آبی در یک دوره زمانی، نیاز به داده‌های سری زمانی یکپارچه و بدون شکاف دارد. گرد و غبار هوا، ذرات معلق موجود در جو، ابرناکی و خرابی سنسورها باعث می‌شود که بعضی از تصاویر غیر قابل استفاده شده و اطلاعات سری زمانی دچار نقص شود [13]. در بین این عوامل ابرناکی مهم‌ترین عامل از دست رفتن داده‌ها می‌باشد. برای محاسبه‌ی تبخیر و تعرق نیاز به تصاویر بدون ابر است و وجود لایه نازکی از ابر باعث اشکال می‌شود [12]. ابرها در بین سایر پدیده‌های زمینی در باندهای مرئی، بازتابندگی بالاتر و در باند حرارتی، دمای پایین‌تری دارند. تلاش زیادی برای رفع این مشکل شده است که در نهایت منجر به برش قسمتی از تصویر یا صرف نظر کردن از تصویر می‌شد. یکی از الگوریتم‌های مورد استفاده برای حل این مشکل، استفاده از الگوریتم HANTS می‌باشد. این الگوریتم با درون‌یابی زمانی، توانایی شناسایی و از بین بردن اطلاعات دورافتاده و ابری و پر کردن فاصله بین مشاهدات را دارد. در الگوریتم HANTS برای مشاهدات سری زمانی، وزن یک یا صفر برای داده‌های خوب و بد اختصاص داده می‌شود. این الگوریتم از برازش منحنی تکرار شونده برای پیدا کردن نقاط دورافتاده و نواحی ابری استفاده می‌کند. در اولین مرحله، برازش منحنی با استفاده از تمام داده‌های موجود در سری با روش حداقل مربعات انجام می‌شود. در مرحله دوم، مشاهدات با منحنی حاصل از اولین تکرار بررسی می‌شوند. به مشاهداتی که اختلاف آن‌ها بیش از آستانه میزان خطای قابل قبول تعریف شده از قبل باشد، وزن صفر اختصاص داده شده و حذف می‌شوند. داده‌های باقی‌مانده وارد تکرار بعد شده و برازش منحنی با روش حداقل مربعات صورت می‌گیرد و همانند قبل مشاهدات دورافتاده



که اختلاف آن‌ها از حد آستانه بزرگتر باشد، شناسایی و حذف می‌شوند. این فرآیند تا زمانی که تمام مشاهدات باقی‌مانده، درون آستانه‌ای از پیش تعریف شده قرار گیرند و یا تعداد داده‌های باقی‌مانده، از تعداد پارامترهای توصیف منحنی کمتر باشد، ادامه می‌یابد [14].

## ۴. نتایج و بحث

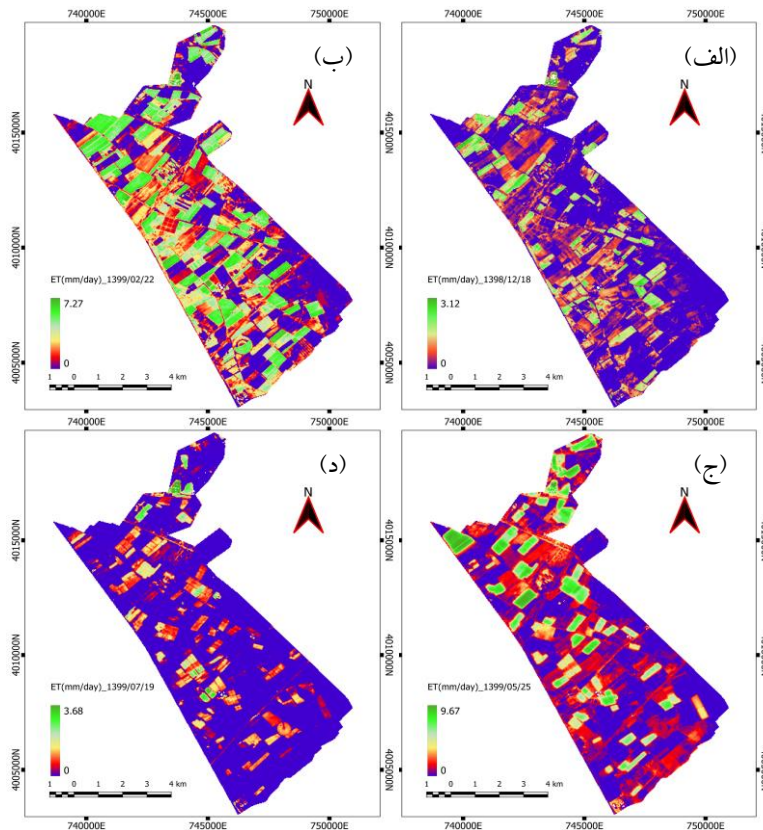
در این پژوهش از داده‌های ایستگاه سینوپتیک مشهد و تصاویر ماهواره‌های لندست ۷ و ۸، گذر = ۱۵۹ و ردیف = ۰۳۵ از تاریخ ۲۴ بهمن ۱۳۹۸ تا ۵ آبان ۱۳۹۹ برای مزرعه نمونه آستان قدس رضوی استفاده شد. در شکل ۴ تصاویر استفاده شده در این پژوهش به ترتیب تاریخ ارائه شده است.



\* تصاویر ابری — تصاویر لندست ۷ — تصاویر لندست ۸

### شکل ۴- تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده

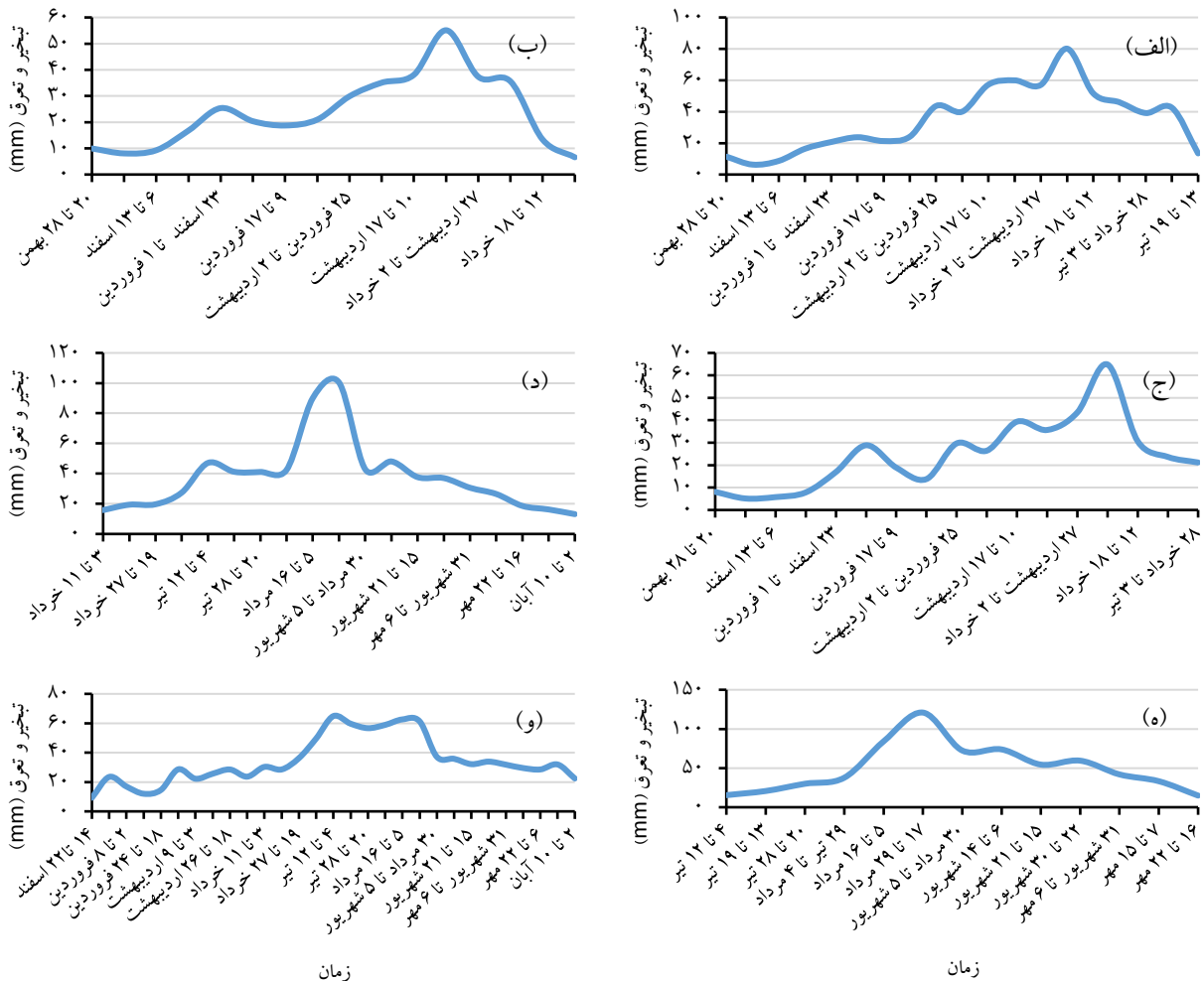
از محاسبه‌ی همه پارامترهای معادله بیلان انرژی، مقدار شار گرمای نهان تبخیر در لحظه گذر ماهواره محاسبه شد. پس از آن با استفاده از رابطه ۶ تبخیر و تفرق لحظه‌ای برآورد شد. در مرحله بعد کسر تبخیر و تفرق مرجع از طریق رابطه ۷ بدست آمد و از ضرب آن در تبخیر و تفرق مرجع تجمعی ۲۴ ساعته، میزان تبخیر و تفرق روزانه محاسبه شد. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در اواخر سال ۱۳۹۸ به دلیل دمای پایین و سبز شدن تازه محصولات، مقدار تبخیر و تفرق واقعی روزانه اندک بوده و با گرم شدن هوا و رشد محصولات، تبخیر و تفرق افزایش یافته که در اواخر بهار ۱۳۹۹ به حداکثر میزان خود می‌رسد و پس از آن روند کاهشی پیدا می‌کند.



شکل ۵ - مقادیر تبخیر و تفرق واقعی روزانه در منطقه مطالعاتی در چهار زمان انتخابی: الف) ۱۸ اسفند ماه ۱۳۹۸؛ ب) ۲۲ اردیبهشت ماه ۱۳۹۹؛ ج) ۲۵ مرداد ماه ۱۳۹۹ و د) ۱۹ مهر ماه ۱۳۹۹



برای محاسبه نیاز آبی در یک دوره رشد ابتدا تبخیر و تعرق روزانه برای روزهای دارای تصویر ماهواره‌ای برآورد گردید. سپس بازه زمانی که هر تصویر پوشش می‌دهد محاسبه شد. در مرحله بعد تبخیر و تعرق مرجع ۲۴ ساعته برای هر روز آن بازه زمانی بدست آمد و سپس، از ضرب کسر تبخیر و تعرق مرجع در مقدار تجمعی تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته بازه زمانی، تبخیر و تعرق واقعی برای آن بازه حساب شد. به همین ترتیب تبخیر و تعرق برای بازه تحت پوشش هر تصویر حساب شد. در ادامه روند تغییرات تبخیر و تعرق برای محصولات مختلف از آغاز سبز شدن تا برداشت محصولات در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶- نمودار تغییر تبخیر و تعرق واقعی محصولات: (الف) گندم؛ (ب) جو؛ (ج) کلزا؛ (د) گوجه؛ (ه) ذرت و (و) باغات

مرحله سبز شدن محصول گندم، جو و کلزا در یک زمان می‌باشد. اما در مراحل بعد مانند حداکثر میزان سبزی‌نگی، شروع به زرد شدن و برداشت محصول جو همیشه از محصول گندم جلوتر است به طوری که محصول جو تا اواخر خرداد برداشت شده و برداشت محصول گندم پس از آن یعنی از اوایل تیر صورت می‌گیرد. محصول کلزا پس از آن در دهه اول خرداد شروع به زرد شدن کرده و در اواخر خرداد، اوایل تیر برداشت می‌شود. در دهه اول و دوم فروردین ماه به علت کاهش دما و ساعت آفتابی، شاهد کاهش تبخیر و تعرق هستیم که این روند کاهش در محصولات گندم و جو نیز مشاهده می‌شود. در مزرعه نمونه آستان قدس، محصول گوجه به صورت نشا کشت می‌شود به همین دلیل از ابتدای کاشت، این محصول دارای تبخیر و تعرق بالایی می‌باشد. از اواخر خرداد ماه با افزایش رشد محصول، تبخیر و تعرق زیاد شده و در اواسط مرداد به بیشترین میزان خود می‌رسد. از اواخر مرداد ماه تبخیر و تعرق به شدت کاهش می‌یابد و پس از آن با شیب ملایمی تبخیر و تعرق کاهش یافته و در آبان ماه زرد شده و تبخیر و تعرق ناچیز می‌شود. محصول ذرت در بین سایر محصولات چرخه فنولوژیکی کوتاه‌تری دارد. این محصول در اوایل تیر ماه سبز می‌شود و دهه سوم مرداد ماه به حداکثر میزان تبخیر و تعرق می‌رسد. زمان برداشت این محصول، اواخر دهه دوم مهر ماه می‌باشد. باغات از اواسط اسفند سبز می‌شوند و میزان تبخیر و تعرق آن‌ها افزایش

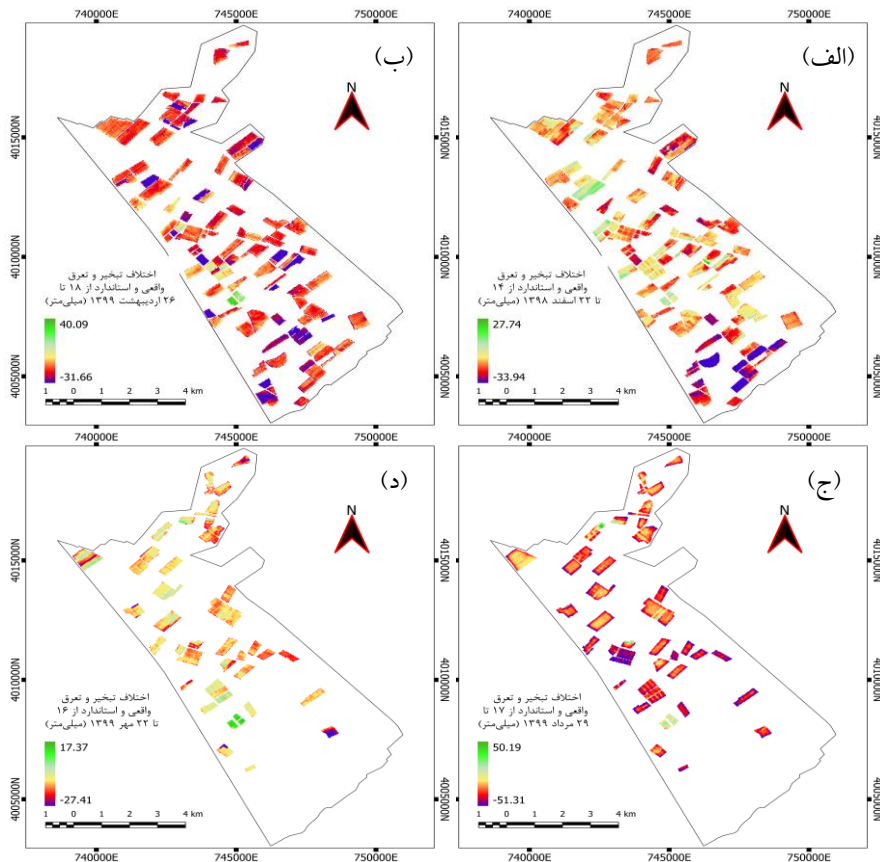
می‌یابد. مطابق انتظار همان طور که در محصولات دیگر نیز مشاهده شد، در فروردین ماه از شدت تبخیر و تعرق به علت سردی هوا کاسته شد. حداکثر تبخیر و تعرق در ماه‌های تیر و مرداد اتفاق افتاد و پس از آن با نرخ زیادی از شدت آن کاسته شد و در دهه اول آبان ماه روند نزولی شدیدی به خود گرفت.

برای مقایسه بهتر نیاز آبی محصولات مختلف، میزان تبخیر و تعرق محاسبه شده دوره رشد هر پیکسل در مساحت پیکسل (۹۰۰ متر مربع) ضرب شد. در مرحله بعد عدد پیکسل‌های هر محصول با هم جمع شد تا در نهایت حجم نیاز آبی هر محصول از ابتدای سبز شدن تا زمان برداشت محصول محاسبه شود. در جدول ۱ مساحت هر محصول و میزان نیاز آب آن برای یک دوره رشد در سال ۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹ نشان داده شده است.

جدول ۱- مساحت و نیاز آبی محصولات مختلف در سال ۱۳۹۸-۱۳۹۹

نوع محصول	مساحت (هکتار)	نیاز آبی (دوره رشد/۱۰ <sup>۳</sup> ×m <sup>۲</sup> )
گندم	۱۱۹۷/۳۹۴	۷۷۹۸/۴۳۰
جو	۲۳۴/۱۹۲	۸۵۶/۵۳۷
کلزا	۲۷۴/۳۸۴	۱۰۹۸/۵۱۶
گوچه	۴۱۵/۳۳۶	۲۸۳۰/۷۸۹
ذرت	۳۳۱/۷۶۰	۲۰۷۴/۲۷۶
باغات	۱۳۳/۸۰۶	۱۲۶۰/۷۹۹

با کم کردن تبخیر و تعرق استاندارد از واقعی، تنش آبی برای محصولات مزرعه بدست آمد. بنابراین مناطقی که در آن‌ها مقدار مثبت بدست آمده است بیانگر این می‌باشد که گیاه بدون محدودیت، عمل تبخیر و تعرق را انجام داده و تبخیر و تعرق واقعی حتی از تبخیر و تعرق استاندارد هم بیشتر شده است؛ پس گیاه در شرایط نرمال قرار دارد. اما در پیکسل‌های دارای مقادیر منفی، گیاه در شرایط تنش آبی قرار دارد به همین علت تبخیر و تعرق واقعی کمتر از تبخیر و تعرق استاندارد می‌باشد. پیکسل‌های با مقادیر NDVI کمتر از ۰/۲ مربوط به زمین‌های با خاک لخت می‌باشد. بنابراین در تصاویر شکل ۷ زمین‌های دارای NDVI کمتر از ۰/۲ (زمین آبی) حذف شده و تنها زمین دارای محصولات کشاورزی ارائه شده است [15].

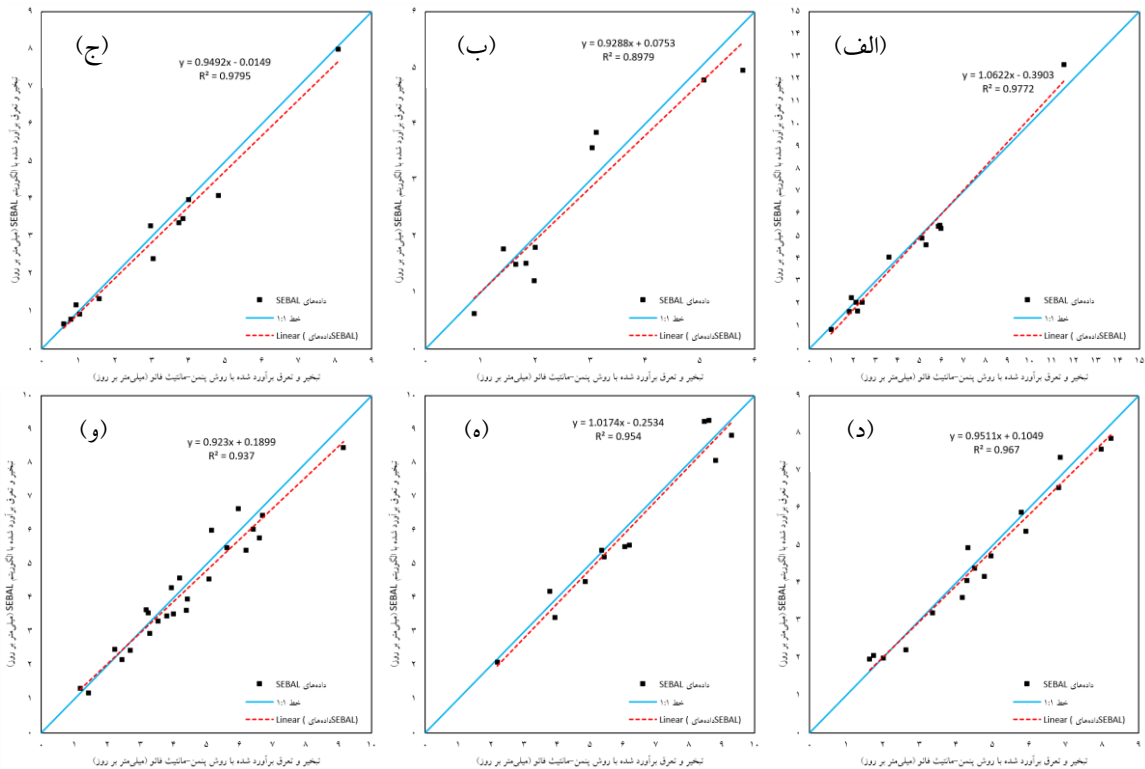


شکل ۷- بررسی تنش آبی در چهار دوره انتخابی: (الف) ۱۴ تا ۲۲ اسفند ماه ۱۳۹۸؛ (ب) ۱۸ تا ۲۶ اردیبهشت ماه ۱۳۹۹؛ (ج) ۱۷ تا ۲۹ مرداد ماه ۱۳۹۹ و (د) ۱۶ تا ۲۲ مهر ۱۳۹۹

برای بررسی دقت نتایج این پژوهش، اطلاعات با تبخیر و تعرق حاصل از روش مرجع پنمن-مانتیت فائو، از طریق شاخص‌های آماری مختلفی مقایسه شد. برای این کار ابتدا تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شد. سپس ضریب گیاهی با توجه به نوع گیاه و دوره رشد آن از جدول ارائه شده توسط فائو<sup>۱</sup> برداشت شد و با ضرب آن در تبخیر و تعرق مرجع، تبخیر و تعرق گیاه حاصل گشت و با تعدادی از پیکسل‌ها هر محصول مقایسه شد. در ادامه نتیجه اعتبار سنجی محصولات مختلف در جدول ۲ و شکل ۸ آورده شده است.

جدول ۲- مقدار حداقل، متوسط و حداکثر شاخص‌های آماری خطای جذر میانگین مربعات، میانگین خطای مطلق و درصد میانگین خطای مطلق برای محصولات مزرعه نمونه آستان قدس رضوی

نوع محصول	RMSE (روز/ میلی‌متر)			MAE (روز/ میلی‌متر)			MAPE (%)		
	حداکثر	متوسط	حداکثر	حداکثر	متوسط	حداکثر	متوسط	حداکثر	
گندم	۰/۱۰۹	۰/۳۸۴	۰/۹۶۸	۰/۰۸۹	۰/۳۰۴	۰/۶۹۶	۲/۶۳۰	۸/۸۷۰	
جو	۰/۱۱۱	۰/۳۲۷	۰/۶۶۷	۰/۰۹۶	۰/۲۵۷	۰/۵۳۴	۶/۵۹۴	۱۱/۶۲۶	
کلزا	۰/۰۴۳	۰/۳۲۳	۰/۸۲۰	۰/۰۳۳	۰/۲۴۷	۰/۶۴۶	۳/۵۵۲	۹/۷۸۵	
گوجه	۰/۰۹۷	۰/۳۸۰	۰/۷۶۸	۰/۰۷۱	۰/۳۰۶	۰/۶۴۷	۳/۵۲۲	۶/۹۴۴	
ذرت	۰/۱۵۷	۰/۴۹۲	۰/۹۱۲	۰/۱۲۷	۰/۳۹۸	۰/۷۸۱	۴/۴۲۳	۶/۶۵۲	
باغات	۰/۱۲۴	۰/۴۰۵	۰/۷۹۱	۰/۱۰۳	۰/۳۲۶	۰/۶۴۵	۳/۳۸۷	۸/۰۳۸	



شکل ۸- مقایسه تبخیر و تعرق محاسبه شده با الگوریتم سبال و روش پنمن-مانتیت فائو برای محصولات: (الف) گندم؛ (ب) جو؛ (ج) کلزا؛ (د) گوجه؛ (ه) ذرت و (و) باغات

نتایج جدول ۲ و شکل ۸ حاکی از این است که با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ می‌توان نیاز آبی محصولات مختلف را برای مزرعه آستان قدس رضوی با دقت خوبی برآورد کرد.

<sup>1</sup> FAO (Food and Agriculture Organization of the united)

## ۵. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر نیاز و تنش آبی محصولات مختلف مزرعه نمونه آستان قدس رضوی محاسبه و سامانه مدیریت آب کشاورزی ارائه شد. بدین منظور از ۳۲ تصویر ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ استفاده شد. به دلیل موجود نبودن داده‌های لایسیمیتری، از روش پنمن-مانتیت فائو برای صحت‌سنجی نتایج مدل سبال استفاده شد. بررسی مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط الگوریتم سبال با نتایج روش پنمن-مانتیت فائو نشان داد که این الگوریتم توانایی برآورد نیاز و تنش آبی گیاهان، با دقت قابل قبول در شرایط مشابه را دارد. به طوری که میانگین میزان خطای MAE, RMSE و MAPE برای محصول گندم به ترتیب ۰/۳۸ میلی‌متر بر روز، ۰/۳۰ میلی‌متر بر روز و ۸/۹ درصد، برای محصول جو به ترتیب ۰/۳۳ میلی‌متر بر روز، ۰/۲۶ میلی‌متر بر روز و ۱۱/۶ درصد، برای محصول کلزا به ترتیب ۰/۳۲ میلی‌متر بر روز، ۰/۲۵ میلی‌متر بر روز و ۹/۸ درصد، برای محصول گوجه به ترتیب ۰/۳۸ میلی‌متر بر روز، ۰/۳۱ میلی‌متر بر روز و ۶/۹ درصد، برای محصول ذرت به ترتیب ۰/۴۹ میلی‌متر بر روز، ۰/۴۰ میلی‌متر بر روز و ۶/۶ درصد و برای باغات به ترتیب ۰/۴۰ میلی‌متر بر روز، ۰/۳۳ میلی‌متر بر روز و ۸/۰ درصد بدست آمد. از نتایج این پژوهش این نکته برداشت می‌شود که با مدل سبال می‌توان نیاز و تنش آبی محصولات زراعی و باغی را در سطوح وسیع محاسبه نمود که با نتایج حاصل از بسیاری از تحقیقات دیگر در خصوص دقت مدل سبال همخوانی دارد. در این پژوهش می‌توان دریافت که هر محصول در هر بازه زمانی چه مقدار آب مصرف نموده است و در چه تاریخ‌هایی دچار تنش آبی بوده یا آب بیش از حد نیاز دریافت نموده است. با استفاده از این اطلاعات می‌توان میزان آب اختصاص یافته به محصولات و آبیاری آن‌ها را مدیریت کرد. برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود از مدل کالیبره برای منطقه مورد مطالعه استفاده شود و برای افزایش دقت تصاویر مورد استفاده، از تصاویر پهپاد استفاده شود.

## ۶. مراجع

1. Bastiaanssen, W.G.M.; Menenti, M.; Feddes, R.A. and Holtslag, A.A.M. (1998), "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation," journal of hydrology, 212-213, pp 198-212.
2. Bastiaanssen, W.G.M.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Ma, Y.; Moreno, J.F.; Roerink, G.J. and van der Wal, T. (1998), "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation," journal of hydrology, 212-213, pp 213-229.
۳. ثنائی‌زاد، س. ح.؛ نوری، س. و هاشمی‌نیا، س. م. (۱۳۹۰)، "برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره ای در منطقه مشهد،" نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، دانشگاه فردوسی مشهد، ۲۵، ۵۴۷-۵۴۰.
۴. زارع خورمیزی، ه. و غفاریان‌المیری، 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،" نشریه مدیریت بیابان، ۱۵، ۱۲۰-۱۰۱.
5. Cheng, M.; Jiao, X.; Li, B.; Yu, X.; Shao, M. and Jin, X. (2021), "Long time series of daily evapotranspiration in China based on the SEBAL model and multisource images and validation," Earth System Science Data, 13, pp 3995-4017.
۶. المهباش، م. (۱۳۹۳)، "ارزیابی، تعمیر و نگهداری سامانه‌های آبیاری قطره‌ای (مطالعه موردی: مزرعه نمونه آستان قدس رضوی)،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
۷. پورمحمدی، س.؛ دستورانی، م. ت.؛ مختاری، م. ح. و رحیمیان، م. ح. (۱۳۸۹)، "تعیین پهنه بندی تبخیر و تعرق واقعی توسط تکنیک سنجش از دور و الگوریتم سبال (مطالعه موردی: حوزه آبخیز منشاد در استان یزد)،" علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۴، ۱۰-۱.
۸. داورزنی، و. (۱۳۹۶)، "صحت‌سنجی تخمین تبخیر و تعرق واقعی براساس الگوریتم هاس سبال و متریک با استفاده از داده‌های لایسیمیتر،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
9. Bastiaanssen, W.G.M. (2000), "SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey," journal of hydrology, 229, pp 87-100.
10. Faris Beg, A.A.; Al-Sulttani, A.H.; Ochtyra, A.; Jarocińska, A. and Marcinkowska, A. (2016), "Estimation of Evapotranspiration Using SEBAL Algorithm and Landsat-8 Data—A Case Study: Tatra Mountains Region," Journal of Geological Resource and Engineering, 6, pp 257-270.



۱۱. وزیری، ژ؛ سلامت، ع.ر؛ انتصاری، م.ر؛ مسچی، م.؛ حیدری، ن. و دهقانی سانیچ، ح. (۱۳۸۷)، " تبخیر و تعرق گیاهان (دستورالعمل محاسبه آب مورد نیاز گیاهان)،" کتاب، نشر کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.
12. Allen, R.; Waters, R.; Tasumi, M.; Trezza, R. and Bastiaanssen, W.G.M. (2002), " Surface energy balance algorithms for land, Idaho Implementation," Advanced Training and Users Manual, Idaho, USA
13. Ghafarian Malmiri, H.M.; Zare, H.; Rousta, I.; Olafsson, H.; Izquierdo Verdiguier, E.; Zhang, H. and Darlington Mushore, T. (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, pp 1-22.
۱۴. غفاریان المیری، ح. ر. و زارع خورمیزی، ه. (۱۳۹۶)، " بازسازی سری های زمانی داده های ماهواره ای دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم تجزیه و تحلیل هارمونیک سری های زمانی (HANTS)،" سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۳، ۱۹-۱.
15. Zare, M. and Koch, M. (2016), " Computation of the Irrigation Water Demand in the Miandarband Plain , Iran , using FAO-56- and Satellite-estimated Crop Coefficients," Thai Interdisciplinary Research, 12, pp 15-25.