

## پهنه‌بندی مناطق حساس در برابر خشک‌سالی در دشت نجف‌آباد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

علی اصغر آل شیخ\* - استاد سیستم اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
ابوالفضل مسعودیان - استاد هیدرولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم انسانی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران  
روزا ابراهیمیان - دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه علوم و تحقیقات، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۵/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۵

### چکیده

در تحقیق حاضر، با استفاده هم‌زمان از داده‌های ایستگاهی بارندگی و تبخیر-تعرق واقعی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و روش فازی، کوشش شده است تا مناطق حساس در برابر خشک‌سالی در دشت نجف‌آباد واقع در استان اصفهان شناسایی شود. برای دست‌یابی به این هدف از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای در یک دوره ۲۵ ساله استفاده شد. در این پژوهش سال‌های ۱۹۹۵، ۲۰۰۸، و ۲۰۱۵ به‌عنوان نمونه انتخاب شد و با اجرای الگوریتم سبال بر روی تصاویر ماهواره‌ای لندست تبخیر-تعرق واقعی محاسبه شد. سپس، با هم‌پوشانی فازی نقشه‌های بارندگی و تبخیر-تعرق مناطق حساس شناسایی شد. نتایج حاصل گویای آن است که در سال ۱۹۹۵ نواحی جنوب و جنوب شرقی و بخش‌هایی از شرق دشت نجف‌آباد حساسیت بیشتری نشان داده‌اند. این در حالی است که در سال ۲۰۰۸، علاوه بر نواحی فوق‌الذکر، نواحی شرقی، مرکزی، و غربی نیز درگیر خشک‌سالی شده‌اند. در سال ۲۰۱۵ بخش‌های جنوب و جنوب شرقی به سبب برخورداری از بارش بیشتر از وضعیت خشک‌سالی خارج و از شرایط مطلوب‌تری برخوردار شده‌اند. ویژگی ممتاز این تحقیق کاربرد پارامترهای تکمیلی در سنجش حساسیت به خشک‌سالی است.

کلیدواژه‌ها: تبخیر-بارندگی، تعرق واقعی، خشک‌سالی، دشت نجف‌آباد، سنجش از دور، GIS.

### مقدمه

در طبقه‌بندی مخاطرات محیطی، خشک‌سالی در جایگاه نخست قرار دارد؛ زیرا علل وقوع خشک‌سالی نسبت به سایر مخاطرات بسیار پیچیده‌تر است (پاتاک و دودامانی، ۲۰۱۶: ۶۲۶). خشک‌سالی در ذات خود کمبود آب را به همراه دارد؛ این امر ناشی از کاهش شدید بارش است و به این واسطه تأثیر زیادی در زندگی انسان‌ها می‌گذارد. انجمن هواشناسی امریکا خشک‌سالی را یک فعل و انفعال پیچیده بین کمبود بارش و افزایش تبخیر-تعرق در یک بازه طولانی و بهره‌برداری نامناسب بشر از منابع آبی به علت ناکارآمدی برنامه‌ها و شیوه توزیع و مصرف آب می‌داند (میلر و فاکس، ۲۰۱۷: ۳۵).

وقوع خشک‌سالی‌های شدید و اثرهای فاجعه‌بار آن طی دهه‌های اخیر در نقاط مختلف دنیا سبب اقدامات درخور توجه متخصصان به منظور پایش خشک‌سالی، پیش‌بینی، و تجزیه و تحلیل خطر برای مقابله با خشک‌سالی و همچنین کاهش اثرهای آن شده است (هو و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۹۹). یکی از این اقدامات محاسبه کمی و کیفی اثرهای خشک‌سالی برای

مدیریت مناسب آن است. در این مدیریت براساس شدت، مدت، و آسیب‌پذیری ناشی از خشک‌سالی چه قبل از وقوع و چه بعد از وقوع با اجرای برنامه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت از پیش تنظیم‌شده، به دنبال کاهش یا جبران خسارات ناشی از خشک‌سالی خواهد بود. مدیریت خشک‌سالی نیز مانند مدیریت هر پدیده مخرب طبیعی دیگر، مانند سیل، دارای مراحل چهارگانه است؛ این مراحل عبارت‌اند از: ۱. شناخت مناطق مستعد بروز خشک‌سالی کشاورزی با پایش و پیش‌بینی؛ ۲. تعیین اثرها و خسارات وارده به هر محصول خاص کشاورزی و منابع طبیعی براساس شدت و مدت خشک‌سالی؛ ۳. پهنه‌بندی و میزان خسارات با تلفیق مراحل شناخت و اثرها؛ ۴. ارائه راهکارها و برنامه‌های کاهش و جبران خسارات با ارزیابی برنامه‌های اجراشده (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۱: ۲). شناسایی مناطق مستعد در برابر خشک‌سالی، علاوه بر اینکه نقش مهمی در مدیریت خشک‌سالی دارد، سبب کاهش مشکلات و افزایش توانایی در مدیریت منابع طبیعی و منابع کشاورزی می‌شود (رستم‌زاده، ۱۳۸۸: ۵).

خوشبختانه، ظهور فناوری‌های نوین در راستای شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد خشک‌سالی سبب شده است که محققان تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام دهند؛ در اینجا به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود: عمرانی و همکاران (۱۳۹۳: ۳) از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و الگوریتم سبال برای محاسبه میزان تبخیر-تعرق روزانه در یک دوره یازده‌ساله استفاده کردند. ایشان نتایج خود را با شاخص استاندارد شده بارش SPI صحت‌سنجی کردند. یافته‌ها حاکی از آن است که در منطقه مورد مطالعه خشک‌سالی رخ داده است.

هو و همکاران (۲۰۱۷: ۱۹۹) در تحقیق خود پکیجی یک پارچه، شامل طیف گسترده‌ای از برنامه‌های کاربردی، برای مدل‌سازی و ارزیابی خشک‌سالی براساس شاخص‌های تک‌متغیره و چندمتغیره ارائه کرده‌اند. این بسته همچنین شامل پیش‌بینی احتمالاتی خشک‌سالی به واسطه شاخص‌های متعدد خشک‌سالی نیز هست و در نهایت درباره تعمیم و بسط بالقوه این بسته به سایر شرایط بحث شده است. این بسته در اختیار عموم متخصصان قرار دارد تا با پیش‌بینی زودهنگام و مدیریت خشک‌سالی جلوی اثرهای نامطلوب آن گرفته شود.

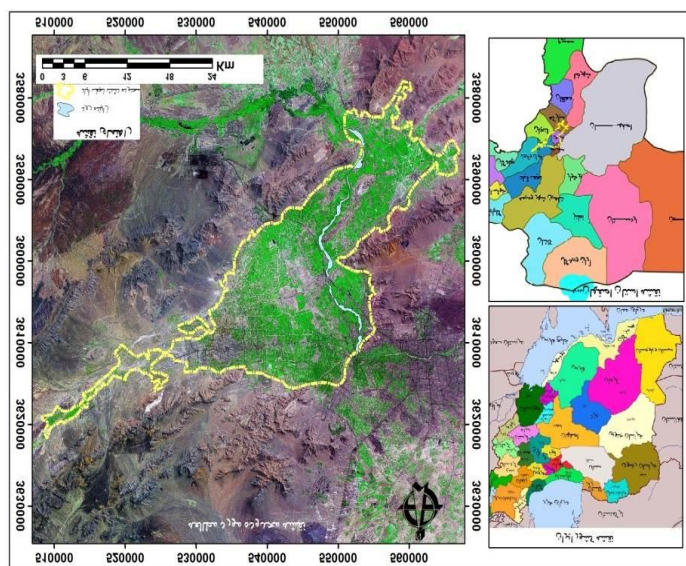
مهری هاشمی دوبین و زهرا آهنگرزاده (۱۳۹۲: ۱) به پایش و پهنه‌بندی خشک‌سالی‌های هواشناسی در استان خراسان شمالی با استفاده از دو شاخص خشک‌سالی هواشناسی دهک و SPI پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که پر دوام‌ترین خشک‌سالی مربوط به فاصله سال‌های ۱۹۹۴-۱۹۹۷ است که اثرهای بسیار نامطلوبی بر منابع آب زیرزمینی وارد کرده است. حادثه خشک‌سالی‌ها طی سال‌های ۱۹۹۰ (غرب استان)، ۱۹۹۵ (مرکز)، ۲۰۰۱ (جنوب غربی)، و ۲۰۰۸ (به جز نواحی مرکزی استان در سایر نقاط) رخ داده است و خشک‌سالی سال ۲۰۰۸ در بین این چهار سال شدیدتر است.

از آنجا که در بسیاری از تحقیقات انجام‌یافته تصاویر ماهواره‌ای و همچنین تبخیر-تعرق واقعی، که از پارامترهای مناسب برای نمایش رفتار خشک‌سالی و پیش‌بینی آن است، در نظر گرفته نمی‌شود، در این پژوهش با استفاده از میزان تبخیر-تعرق واقعی- که از تصاویر ماهواره‌ای در یک دوره ۲۵ ساله و داده‌های هواشناسی و بارندگی ایستگاه‌های سینوپتیک دشت نجف‌آباد واقع در استان اصفهان به دست آمده و روش فازی- وضعیت خشک‌سالی در این بازه زمانی مطالعه شد. در واقع، آنچه این تحقیق را از سایر تحقیقات مشابه متمایز می‌کند بررسی هم‌زمان فاکتورهای هواشناسی مانند بارندگی، دما، سرعت وزش باد، تعداد ساعات آفتابی، میزان تبخیر-تعرق واقعی با فاکتورهای پوشش گیاهی، و شاخص سطح برگ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و روش فازی است؛ به طوری که بررسی هم‌زمان همه این متغیرها به‌ویژه فاکتور بارندگی و تبخیر-تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و روش فازی در بیشتر تحقیقات صورت گرفته به چشم نمی‌آید.

بر این اساس، هدف از این تحقیق شناسایی مناطق حساس در برابر خشک‌سالی با استفاده از تلفیق داده‌های بارندگی و تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از داده‌های هواشناسی و سنجش از دور است.

## مواد و روش‌ها

دشت نجف‌آباد با مساحت ۱۷۵۳ کیلومتر مربع، واقع در استان اصفهان، به علت وجود یکی از شبکه‌های آبیاری مدرن قدیمی و برخورداری از منابع آب زیرزمینی و سطحی فراوان از جمله دشت‌های مهم این استان است؛ گفتنی است به‌تازگی وضعیت سفره آب زیرزمینی این دشت از حالت آزاد به ممنوعه تغییر یافته و با افت شدید سطح آب زیرزمینی مواجه شده است. از سوی دیگر، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و کاهش میزان بارندگی در این محدوده سبب وقوع خشک‌سالی‌های متعدد در این دشت شده و این امر اهمیت توجه به این دشت را در استان اصفهان دوچندان کرده است. بنابراین، در این تحقیق دشت نجف‌آباد به عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب و مناطق مستعد در این دشت شناسایی شد تا از این طریق با اجرای الگوی کشت مناسب منطقه و روش‌های آبیاری مدرن صدمات ناشی از وقوع خشک‌سالی در این محدوده مهم کاهش یابد. شکل ۱ موقعیت محدوده دشت نجف‌آباد را نمایش می‌دهد. در این تصویر خط زردرنگ نمایانگر محدوده این دشت است.

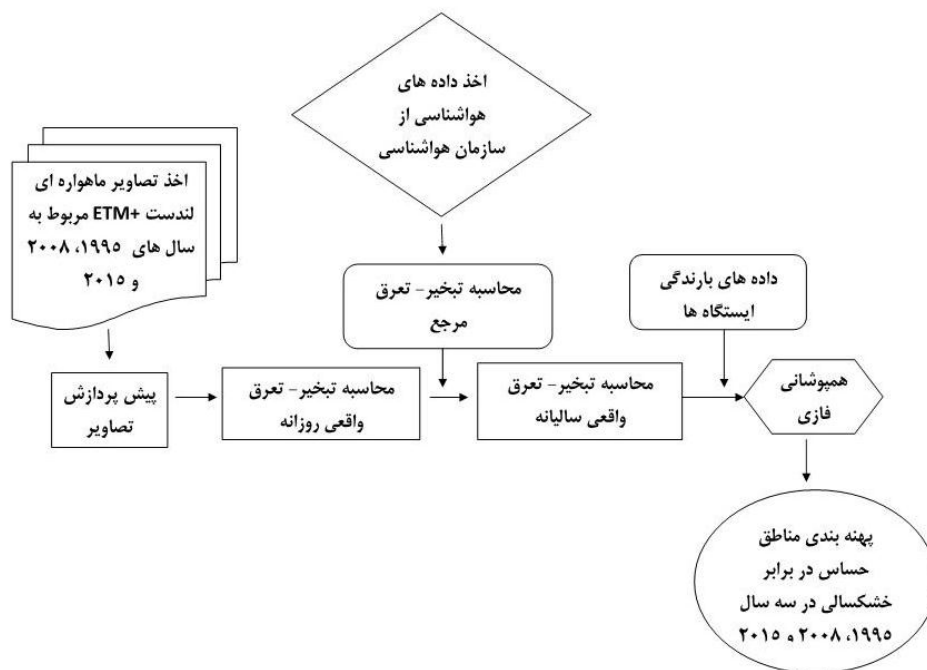


شکل ۱. نقشه موقعیت محدوده مطالعاتی نجف‌آباد

در این بررسی داده‌های بارندگی و داده‌های روزانه هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک دشت نجف‌آباد طی یک دوره ۲۵ ساله گردآوری شد. با استفاده از داده‌های بارش، شاخص SPI محاسبه شد و سال ۱۹۹۵ به عنوان سال پُربارش، سال ۲۰۰۸ به عنوان سال کم‌بارش، و سال ۲۰۱۵ به عنوان سال نرمال انتخاب شد. سپس، میزان تبخیر-تعرق مرجع به وسیله معادله پنمن مانتیث و تبخیر-تعرق واقعی از الگوریتم سبال و تصاویر ماهواره‌ای به‌دست آمد. بدین منظور، ۳۶ تصویر ماهواره‌ای لندست سنجنده ETM+ مربوط به سال‌های آبی ۱۹۹۵، ۲۰۰۸، و ۲۰۱۵ تهیه و تبخیر-تعرق روزانه در روزهایی که تصویر آن‌ها گرفته شده بود محاسبه شد. در ادامه بازه زمانی تحت پوشش هر تصویر مشخص شد و با استفاده از روش پنمن مانتیث و داده‌های هواشناسی میزان تبخیر-تعرق مرجع برای بازه‌های تحت پوشش هر تصویر

محاسبه شد و با توجه به الگوریتم سبال در مقادیر تبخیر- تعرق روزانه ضرب و میزان تبخیر- تعرق واقعی هر بازه مشخص شد. سپس، از مجموع مقادیر بازه‌ها میزان تبخیر- تعرق سالیانه به دست آمد. در ادامه با استفاده از روش‌های درون‌یابی نقشه پهنه‌بندی بارندگی در این سه سال تهیه شد.

روش‌های فازی و هم‌پوشانی وزنی از جمله روش‌های تعیین‌کننده مناطق حساس در برابر خشک‌سالی‌اند؛ در این تحقیق روش فازی به کار برده شد؛ زیرا در روش هم‌پوشانی وزنی متغیرهای مورد استفاده کلاس‌بندی خواهند شد و این کلاسه‌ها با توجه به نظر کارشناسان و نوع نیاز پروژه مشخص می‌شود. از طرفی دیگر، جایگاه هر یک از متغیرهای به کاررفته با وزنی که داده می‌شود سنجیده خواهد شد. وزن داده‌شده به متغیرهای به کاررفته به نظر کارشناسان مربوطه به آن بستگی خواهد داشت. در صورتی که در روش فازی به هر یک از پیکسل‌ها در هر نقشه ورودی مقداری بین صفر تا یک اختصاص داده می‌شود که بیانگر میزان مناسب بودن محل پیکسل از دیدگاه معیار مربوطه برای هدف مورد نظر است. بنابراین، روش فازی نتایج را بهتر و واضح‌تر و با جزئیات بیشتر نشان می‌دهد (بزرگمهر و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۹). در انتها لایه‌های پهنه‌بندی بارندگی و تبخیر- تعرق واقعی سالیانه هم‌پوشانی و مناطق مستعد شناسایی شد. شکل ۲ مراحل اجرای این تحقیق را به اختصار نشان می‌دهد.



شکل ۲. مراحل اجرای تحقیق

### تعیین تبخیر- تعرق مرجع

معادله فائو پنمن- مانیتث برای گیاه مرجع یونجه به صورت زیر تعریف می‌شود (آلن و همکاران، ۲۰۰۸: ۳۸۰):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma(900/(T + 273))U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

که در اینجا  $ET_0$  تبخیر- تعرق (میلی‌متر بر روز)،  $R_n$  تابش آفتابی خالص (مگا ژول بر متر مربع بر روز)،  $G$  شار گرمایی خاک (مگا ژول بر متر مربع بر روز)،  $T$  دمای هوای میانگین روزانه (درجه سانتی‌گراد)،  $U_2$  متوسط سرعت روزانه باد در

ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)،  $e_s - e_a$  کمبود فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، و  $\gamma$  ضریب ثابت (کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد) است.

## پیش‌پردازش تصاویر

### تصحیح هندسی

قبل از هر گونه تجزیه و تحلیل بر روی تصاویر ماهواره‌ای، نخست باید یک سری تصحیحات از جمله تصحیح هندسی بر روی باندهای اطلاعاتی صورت پذیرد. از آنجا که تصویر  $ETM^+$  دارای تصحیح هندسی اولیه است، به اجرای این‌گونه تصحیحات نیاز نیست.

### تصحیح توپوگرافی

با استفاده از مدل ارتفاع رقومی منطقه (DEM)، تصحیح توپوگرافی منطقه انجام شد. روش‌های متعددی برای کاهش اثر توپوگرافی در بازتاب ثبت‌شده حاصل از پدیده‌ها پیشنهاد شده است. یکی از این روش‌ها مدل لامبرت است. این روش در نرم‌افزار ERDAS برای کاهش اثر توپوگرافی منطقه به کار برده شد؛ به طوری که این نرم‌افزار برای اجرای آنالیز نرمال کردن توپوگرافی تنها نیازمند پارامترهایی چون ارتفاع و آزیموت خورشید و مدل ارتفاع رقومی منطقه است. شرط لازم بودن این تصحیح عدم تغییر واریانس مقادیر پیکسل‌های تصویر قبل و بعد از تصحیح خواهد بود؛ به طوری که اگر این اختلاف زیاد باشد، تصحیح توپوگرافیک احتیاج نخواهد بود.

### اجرای الگوریتم سبال

در این مدل با استفاده از دمای سطحی، بازتابندگی سطحی، شاخص تفاضل نرمال‌شده گیاهی<sup>۱</sup>، و روابط درونی آن‌ها شارهای سطحی برای انواع پوشش‌های سطح زمین برآورد می‌شود. با استفاده از الگوریتم سبال می‌توان مقدار شار تبخیر- تعرق لحظه‌ای را در زمان تصویر برآورد کرد. مقدار شار گرمای نهان تبخیر از رابطه ۲ تعیین می‌شود:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (2)$$

که در آن  $\lambda ET$  شار گرمای نهان (انرژی‌ای که برای تبخیر آب به کار می‌رود) است،  $R_n$  تشعشع خالص در سطح،  $G$  شار گرمای خاک، و  $H$  شار گرمای محسوس به هوا (همه پارامترها بر حسب وات بر متر مربع‌اند). از این فرمول استنباط می‌شود تابشی که از جو به سطح زمین می‌رسد به سه بخش تقسیم می‌شود: بخشی صرف گرم کردن زمین یا خاک می‌شود؛ بخشی صرف گرم کردن هوای اطراف سطح زمین می‌شود؛ و بقیه به تبخیر- تعرق منجر می‌شود (پورمحمدی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۱).

شار تابش خالص در سطح زمین با استفاده از همه شارهای تابشی ورودی و خروجی از سطح به دست می‌آید. میزان تابش خالص در سطح زمین و اجزای آن از رابطه ۳ تعیین می‌شود.

$$R_n = (1 - \alpha)R_{sl} + R_{il} - R_{it} - (1 - \epsilon_o)R_{il} \quad (3)$$

که در آن  $\alpha$  آلبدوی سطحی،  $R_{SI}$  تابش موج کوتاه ورودی (۰/۳ تا ۳ میکرومتر) بر حسب وات بر متر مربع،  $R_{II}$  تابش موج بلند ورودی (۳ تا ۱۰۰ میکرومتر) بر حسب وات بر متر مربع،  $R_{IT}$  تابش موج بلند خروجی بر حسب وات بر متر مربع، و  $\epsilon_0$  گسیلندگی سطحی عریض باند است. بنابراین، تابش خالص عبارت از اختلاف بین جریان تابش ورودی و خروجی است و معیاری از مقدار انرژی موجود در سطح زمین به‌شمار می‌رود (قمرنیا و رضوانی، ۱۳۹۳: ۷۲).

NDVI شاخصی است که به میزان و وضعیت پوشش گیاهی حساسیت دارد. NDVI معیاری از سبزی پوشش گیاهی در یک حوضه آبخیز است. این شاخص نشانه توان و تراکم پوشش گیاهی سطح است. 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 که از رابطه ۴ به‌دست می‌آید (ملسی، ۲۰۰۴: ۷۹۵).

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

شار گرمای خاک انرژی استفاده‌شده برای گرم کردن خاک است. شار گرمای خاک در مقایسه با دیگر پارامترهای معادله تعادل انرژی کوچک است و اغلب در محاسبه تبخیر-تعرق نادیده گرفته می‌شود. با این حال، مقدار شار گرمایی خاک از رابطه ۵ به‌دست می‌آید (بستیانسن، ۲۰۰۰: ۸۷).

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} \times [0.0032 \times \alpha + 0.0062 \times \alpha^2] \times [1 - 0.978 \times NDVI^4] \quad (5)$$

که در آن  $T_s$  دمای سطحی بر حسب درجه سانتی‌گراد و  $\alpha$  آلبدوی سطحی است. شار حرارتی از سمت زمین به طرف هوای مجاور بر اساس پارامترهای متعددی محاسبه می‌شود و نیازمند استفاده از اطلاعات زمینی و داده‌های هواشناسی منطقه است. به شکل مرسوم، شار حرارتی محسوس هوا ( $H$ ) با توجه به رابطه ۶ قابل پیش‌بینی خواهد بود (کورات و همکاران، ۲۰۰۵: ۲۲۳؛ میجرینک و همکاران، ۲۰۰۵: ۸۹).

$$H = \frac{\rho_{air} \times C_{air} \times dT}{r_{ah}} \quad (6)$$

که در آن  $\rho_{air}$  چگالی هوا (کیلو گرم بر متر مکعب)،  $C_{air}$  گرمای ویژه هوا (ژول بر کیلوگرم بر کلوین)،  $dT$  اختلاف دمای بین دو ارتفاع  $Z_1$  و  $Z_2$  (کلوین)، و  $r_{ah}$  مقاومت آیرودینامیکی برای انتقال گرما (ثانیه بر متر) است. تبخیر-تعرق روزانه از رابطه ۷ محاسبه‌شدنی است.

$$ET_{24} = ETrf \times ETr_{24} \quad (7)$$

که در این رابطه  $ETrf$  جزء تبخیری گیاه مرجع،  $ETr_{24}$  تبخیر-تعرق ۲۴ ساعته گیاه مرجع، و  $ET_{24}$  تبخیر-تعرق روزانه است و واحد آن میلی‌متر بر روز است (واتر و همکاران، ۲۰۰۸: ۳۴).

برای تعیین تبخیر-تعرق فصلی یا تجمعی نخستین قدم مشخص کردن دوره زمانی است که بتوان به وسیله یک تصویر به توسعه داده‌های موجود اقدام کرد. به شکل معمول، می‌توان داده‌های حاصل از تصویربرداری را برای یک ماه یا یک فصل تعمیم داد و از آن استفاده کرد. مثلاً، اگر تصویربرداری در روز ۱۴ یک ماه انجام شده باشد، می‌توان از آن برای ماه مزبور به عنوان داده معتبر استفاده کرد. قدم دوم محاسبه تبخیر-تعرق مرجع (تبخیر-تعرق گیاه مرجع یا همان یونجه) برای دوره تعیین‌شده به وسیله هر تصویر است، که معمولاً برای محاسبه، کاربر می‌تواند از معادله پنمن-مانیت

یا روش مشابه دیگر استفاده کند. قدم سوم محاسبه  $K_m$  برای دوره زمانی مشخص شده است.  $K_m$  عبارت است از نسبت  $ET_r$  (تبخیر- تفرق مرجع) تجمعی دوره به  $ET_{r24}$  قدم چهارم برآورد تبخیر- تفرق فصلی است که بر اساس رابطه ۸ بیان می‌شود:

$$ET_{\text{cumulative}} = \sum [(ET_{\text{SEBAL-24}})_i (K_m)_i] \quad (8)$$

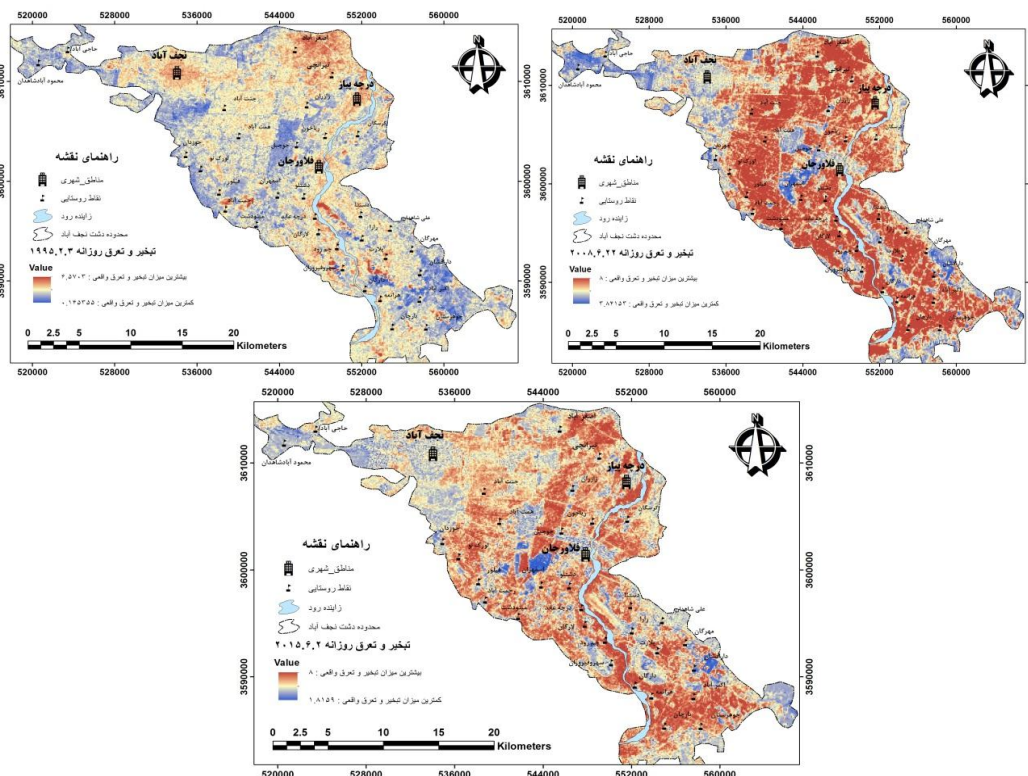
## یافته‌های پژوهش

### تبخیر- تفرق روزانه

متغیرهای لازم برای محاسبه تبخیر- تفرق روزانه شامل آلبیدو، شاخص پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ، دمای سطحی، تابش خالص، شار محسوس هوا، و شار گرمایی خاک است که محاسبه هر یک از پارامترهای نام‌برده نیازمند فاکتورهای دیگری است. شکل ۳ برای نمونه پراکنش تبخیر- تفرق (میلی‌متر) در تصاویر  $ETM^+$  را در دشت نجف‌آباد نشان می‌دهد. در شکل‌های زیر نواحی قرمز رنگ از تبخیر- تفرق بیشتری نسبت به نواحی آبی رنگ برخوردارند.

با توجه به شکل ۳، بیشترین میزان تبخیر- تفرق مربوط به نواحی‌ای با پوشش گیاهی است. در دشت نجف‌آباد بیشترین میزان پوشش گیاهی اختصاص دارد به اراضی کشاورزی تحت شرب شبکه آبیاری نکوآباد و کمترین میزان تبخیر- تفرق متعلق به نواحی شهری و کم‌پوشش است.

جدول ۱ میزان کمینه، بیشینه، و میانگین تبخیر- تفرق را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کمترین میزان تبخیر- تفرق بیشینه ۶/۵۷ است و بیشترین میزان تبخیر- تفرق ۸ میلی‌متر است. مقادیر کمینه تبخیر- تفرق بین این سه روز گویای آن است که سال ۲۰۰۸ از بیشترین میزان برخوردار است و سال ۱۹۹۵ از کمترین میزان.



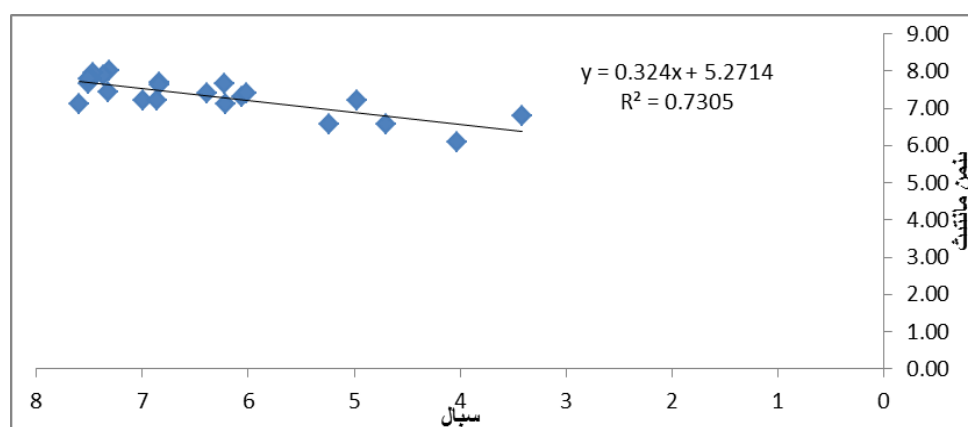
شکل ۳. نقشه میزان تبخیر- تفرق روزانه، به ترتیب از راست در روزهای ۳ فوریه ۱۹۹۵، ۲۲ جون ۲۰۰۸، و ۲ آوریل ۲۰۱۵

جدول ۱. جدول مقادیر بیشینه، کمینه، و میانگین تبخیر- تعرق روزانه

MIN	MEAN	MAX	Julian day
۰.۱۵	۲.۴۹	۶.۵۷	۱۹۹۵.۲۳
۰.۸۴	۷.۰۱	۸	۲۰۰۸.۲۲
۱.۸۲	۶.۳۱	۸	۲۰۱۵.۲

### ارزیابی و کنترل دقت و صحت نتایج تبخیر- تعرق واقعی روزانه با روش پنمن- مانتیث

برای ارزیابی یافته‌ها در این تحقیق نتایج حاصل از تبخیر- تعرق ۲۴ ساعته برخی روزهای سال با میزان تبخیر- تعرق مرجع حاصل از روش پنمن- مانتیث در همان روز مقایسه شد. شکل ۴ مقایسه بین مقادیر حداکثر تصویر  $ETM^+$  در هر منطقه و مقادیر به دست آمده از فرمول پنمن- مانتیث را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ قابل مشاهده است، میزان خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) بین داده‌های حاصل از الگوریتم سبال با روش پنمن- مانتیث حدود ۰.۲۱ است؛ که این موضوع بیانگر خطای کم نتایج حاصل از روش سبال نسبت به روش پنمن- مانتیث و نزدیکی داده‌ها به یکدیگر است. میزان  $R^2$  (ضریب تبیین) معادله رگرسیونی شکل ۴، ۷۳ درصد است که از میزان مناسب و بالایی برخوردار است. بنابراین، می‌توان به معادله رگرسیونی به دست آمده اعتماد کرد؛ زیرا تبخیر- تعرق مرجع ۷۳ درصد تغییرات تبخیر- تعرق واقعی را توجیه می‌کند.

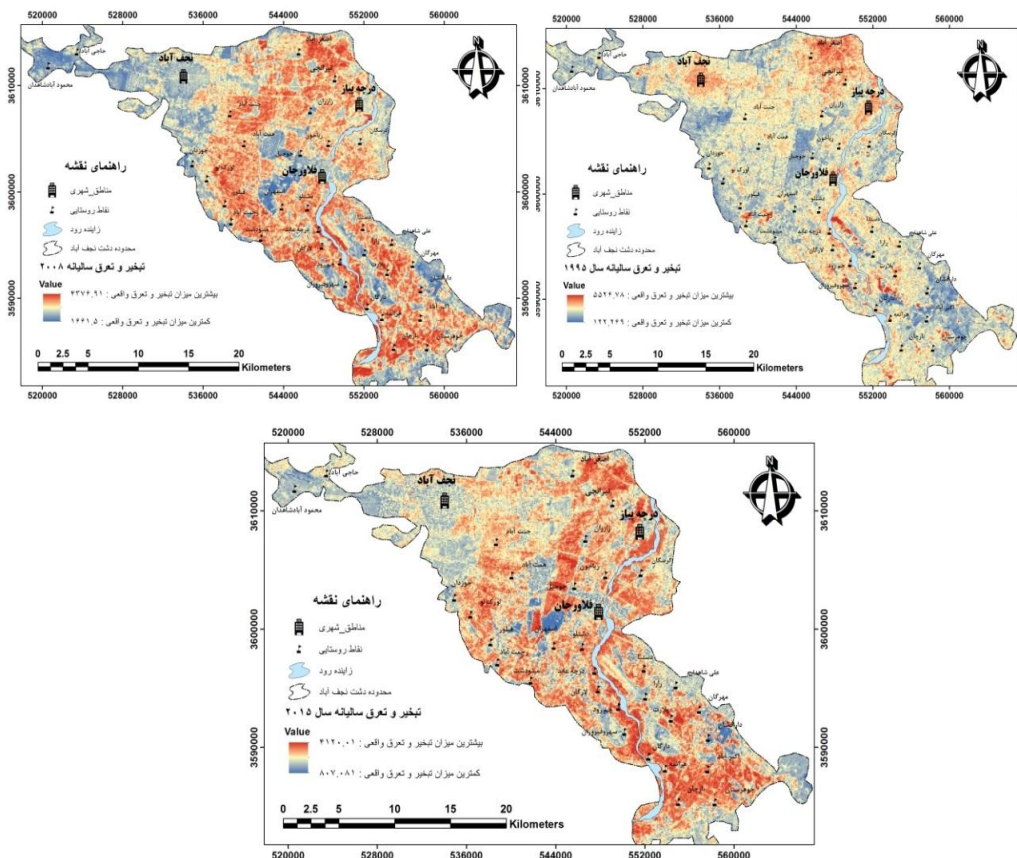


شکل ۴. نمودار مقایسه تبخیر- تعرق حداکثر به دست آمده از سبال با پنمن- مانتیث

### تبخیر- تعرق سالیانه واقعی

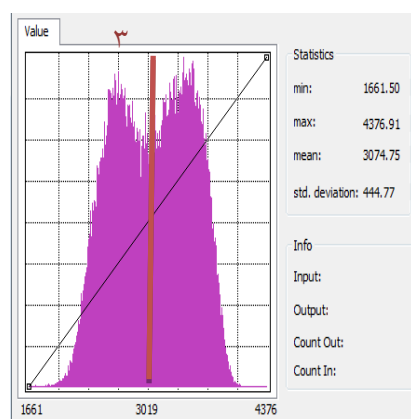
همان‌طور که در شکل‌های ۵، ۶، و ۷ قابل مشاهده است، مناطقی با پوشش گیاهی که با رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند از بیشترین میزان تبخیر- تعرق برخوردارند. نواحی آبی‌رنگ، که بیشتر شامل ارتفاعات و مناطق شهری است، میزان تبخیر- تعرق کمی دارند. بیشترین مقدار بیشینه (Max) تبخیر- تعرق در این سه سال متعلق به سال ۱۹۹۵ با میزان ۵۵۲۶.۷۸ میلی‌متر و کمترین میزان حداکثر تبخیر- تعرق متعلق به سال ۲۰۱۵ است. برعکس، بیشترین کمینه (Min) تبخیر- تعرق در منطقه در این سه سال مربوط به سال ۲۰۰۸ با میزان ۱۶۶۱.۵ میلی‌متر است.



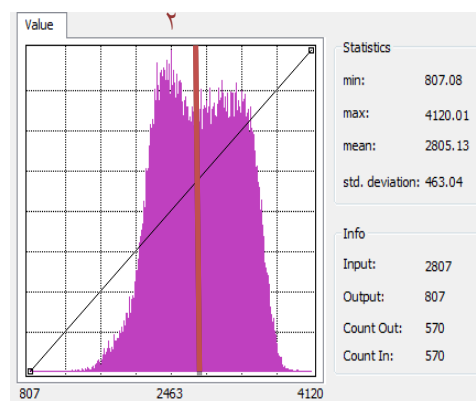


شکل ۵. نقشه میزان تبخیر- تعرق سالیانه سال‌های ۱۹۹۵، ۲۰۰۸، و ۲۰۱۵

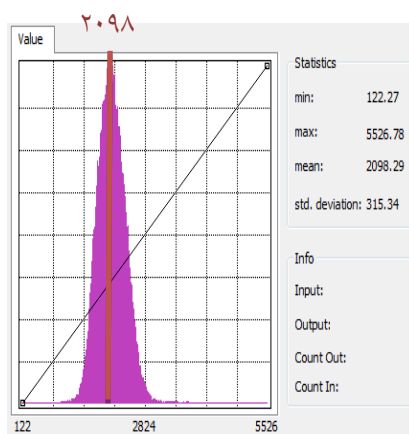
شکل‌های ۶، ۷، و ۸ هیستوگرام تبخیر- تعرق سالیانه را بین سال‌های ۱۹۹۵، ۲۰۰۸، و ۲۰۱۵ نمایش می‌دهند. سال ۱۹۹۵ با وجود آنکه از بیشینه بالاتری نسبت به سال‌های دیگر برخوردار است، کمترین میزان میانگین تبخیر- تعرق را دارد و ارزش بیشتر پیکسل‌ها کمتر از میانگین است. با کمی دقت بر روی نمودار هیستوگرام سال ۲۰۰۸ می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که تراکم پیکسل‌ها در سمت راست خط میانگین نسبت به سمت چپ بیشتر است و از بیشترین میزان میانگین تبخیر- تعرق نسبت به دو سال دیگر برخوردار است. در سال ۲۰۱۵ میزان میانگین تبخیر- تعرق نسبت به سال ۲۰۰۸ حدود ۲۷۰ میلی‌متر کمتر است و تراکم پیکسل‌ها در سمت چپ خط میانگین بیشتر است؛ این امر بیانگر آن است که بیشتر پیکسل‌ها از ارزشی کمتر از میانگین (۲۸۰۵ میلی‌متر) برخوردارند. نتیجه کلی حاصل از نمودارهای زیر آن است که سال ۲۰۰۸ بیشترین میزان تبخیر- تعرق و سال ۱۹۹۵ کمترین میزان تبخیر- تعرق سالیانه را داراست و این موضوع مؤید نتیجه حاصل از شاخص SPI است.



شکل ۷. هیستوگرام تبخیر- تعرق سال ۲۰۰۸



شکل ۶. هیستوگرام تبخیر- تعرق سال ۱۹۹۵

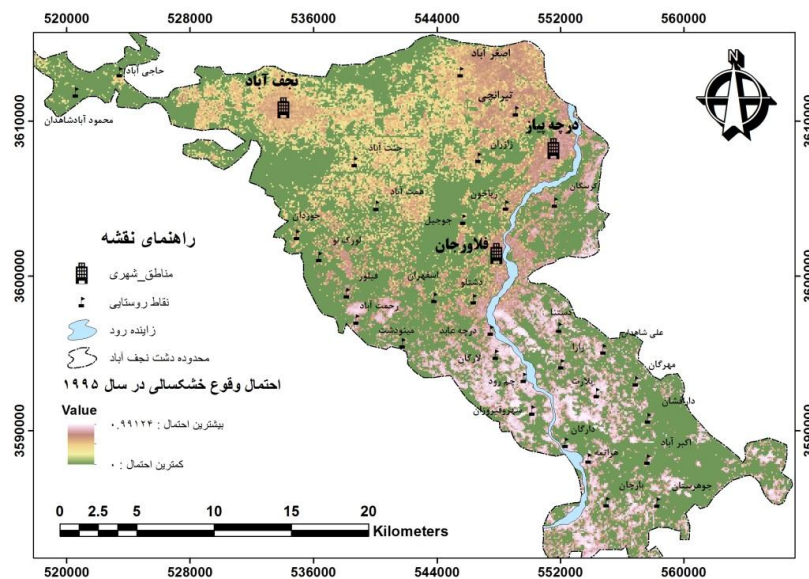


شکل ۸. هیستوگرام تبخیر- تعرق سال ۲۰۱۵

### پهنه‌بندی مناطق حساس در برابر خشک‌سالی

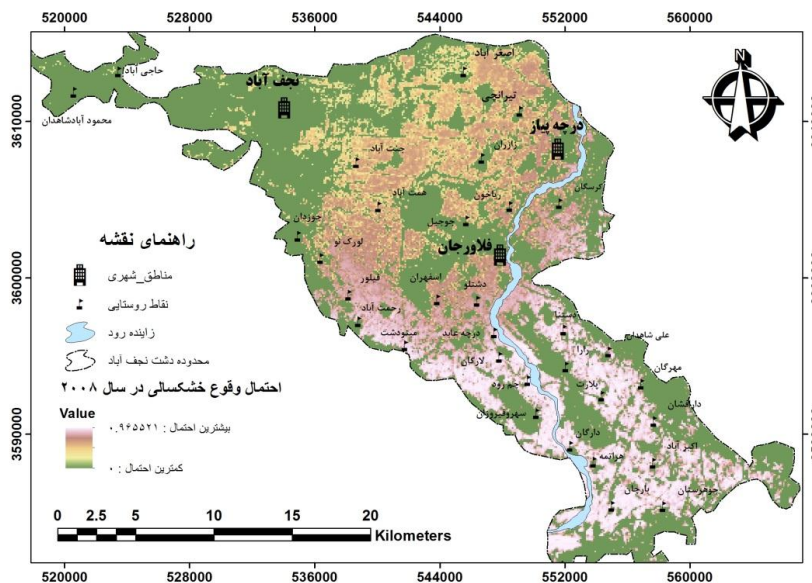
در این بخش نتایج حاصل از تبخیر- تعرق سالانه و درون‌یابی داده‌های بارندگی با استفاده از روش فازی هم‌پوشانی شده نشان داده می‌شود (شکل‌های ۹، ۱۰، و ۱۱).

در شکل ۹ مناطقی که احتمال وقوع خشک‌سالی در آن‌ها بیشتر است با رنگ صورتی مشخص شده‌اند؛ هرچه احتمال وقوع خشک‌سالی کاهش می‌یابد از شدت رنگ آن کاسته و به رنگ سبز نزدیک می‌شود. رنگ سبز گویای مناطقی است که احتمال وقوع خشک‌سالی در آن‌ها صفر و نزدیک صفر است. همان‌طور که می‌توان دید، بخش‌های جنوب شرقی و شرقی منطقه از احتمال بالاتری برای وقوع خشک‌سالی برخوردارند. در سال ۱۹۹۵، مناطق دارای پوشش گیاهی با خطر بیشتری برای وقوع خشک‌سالی مواجه بوده‌اند؛ زیرا در این مناطق میزان تبخیر- تعرق بسیار بالاست.



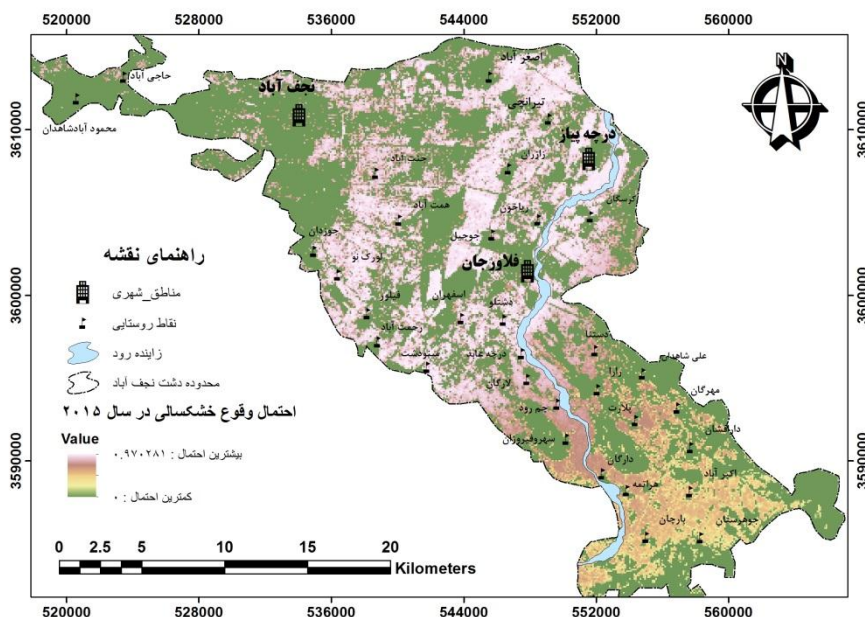
شکل ۹. نقشهٔ پهنه‌بندی احتمال وقوع خشک‌سالی در سال ۱۹۹۵

شکل ۱۰ مناطق مستعد خشک‌سالی در سال ۲۰۰۸ (خشک‌ترین سال) را نشان می‌دهد. در سال ۲۰۰۸ تعداد پیکسل‌هایی که احتمال وقوع خشک‌سالی در آن‌ها بالاست به نسبت بیشتر از سال ۱۹۹۵ است. تصویر ۱۰ گویای آن است که تعدادی از پیکسل‌های نواحی جنوب شرقی و شرق با احتمال وقوع خشک‌سالی روبه‌رو هستند؛ ولی در سال ۲۰۰۸ خشک‌سالی تقریباً همهٔ نواحی جنوب شرقی و شرق را فراگرفته؛ حتی نواحی مرکزی و غربی را نیز تحت تأثیر خود قرار داده است. نکتهٔ درخور تأمل شهر نجف‌آباد است که در سال ۱۹۹۵ با احتمال متوسطی در معرض خطر خشک‌سالی قرار داشته؛ در حالی که در سال ۲۰۰۸ احتمال وقوع خشک‌سالی در این شهر کاهش یافته است.



شکل ۱۰. نقشهٔ پهنه‌بندی احتمال وقوع خشک‌سالی در سال ۲۰۰۸

شکل ۱۱ نیز پهنه‌بندی مناطق حساس در برابر خشک‌سالی را در سال ۲۰۱۵ (سال نرمال) نشان می‌دهد. مقایسه تصویر ۱۱ و تصویر ۱۰ بیانگر آن است که نواحی جنوب شرقی از شرایط خشک‌سالی خارج شده و احتمال وقوع خشک‌سالی در آن مناطق کاهش یافته است؛ ولی به جای آن نواحی شمال شرق و بخش‌های غربی که در سال ۲۰۰۸ از احتمال کمی برای وقوع خشک‌سالی برخوردارند با خطر خشک‌سالی مواجه‌اند.



شکل ۱۱. نقشه پهنه‌بندی احتمال وقوع خشک‌سالی در سال ۲۰۱۵

## نتیجه‌گیری

در ایران حدود ۷۰ درصد از بارندگی در اثر تبخیر از دست می‌رود. دما، سرعت باد، رطوبت نسبی، و تابش آفتاب چهار پارامتر اصلی مؤثر در تبخیر و تعرق‌اند و مساعدبودن این عوامل در کشور به‌خصوص در بخش مرکزی ایران باعث شده است تا میزان تبخیر و تعرق از حد نرمال بالاتر باشد.

در بیشتر تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه خشک‌سالی، بارندگی پارامتر اصلی در نظر گرفته شده است. درحالی‌که محاسبه تبخیر- تعرق واقعی و پتانسیل بهتر از بارندگی رفتار خشک‌سالی را در ایران نمایش می‌دهد. بنابراین، بررسی هم‌زمان بارندگی و تبخیر- تعرق واقعی در یک دوره آماری بلندمدت می‌تواند نقشه‌های وسعت و شدت خشک‌سالی را مطابق آنچه در طبیعت رخ داده برای ما ترسیم کند. در این تحقیق، سعی بر آن بود که با بررسی تغییرات بارندگی و تبخیر- تعرق واقعی طی یک دوره ۲۵ ساله رفتار خشک‌سالی و مناطقی که بیشتر تحت تأثیر خشک‌سالی قرار می‌گیرند شناسایی شوند. بنابراین، سه سال پُربارش، نرمال، و خشک‌سالی شدید انتخاب شد و میزان تبخیر- تعرق واقعی روزانه و سالیانه و میزان بارندگی محاسبه و مناطق مستعد در برابر خشک‌سالی در این سال‌ها مشخص شد. نتایج حاصل از محاسبه میزان تبخیر- تعرق واقعی نمایانگر این موضوع است که میزان تبخیر- تعرق روزانه و سالیانه در سال ۲۰۰۸ نسبت به سایر سال‌ها از همه بیشتر است که با نتایج حاصل از محاسبه شاخص SPI سازگار است؛ زیرا شاخص بارش استاندارد شده (SPI) محاسبه‌شده در این سال بیانگر خشک‌سالی هواشناسی شدیدی است که در این محدوده رخ داده است. از سوی دیگر، مقایسه نتایج حاصل از تبخیر- تعرق واقعی با تبخیر- تعرق پتانسیل گویای مطابقت زیاد داده‌های

تبخیر- تعرق واقعی و پتانسیل است و ارزیابی مدل نیز نشان‌دهنده دقت مناسب مدل است؛ نتایج این تحقیق با نتایج ابریشم‌کار و احمدی (۱۳۹۳) و عبدلی (۱۳۸۹) همخوانی دارد و حاکی از این است که روش به‌کارگرفته‌شده برای محاسبه تبخیر- تعرق واقعی قابل استفاده و دارای نتایج معتبری است.

نتایج حاصل از نقشه‌های پهنه‌بندی مناطق حساس در برابر خشک‌سالی نیز نشان می‌دهد که در سال ۱۹۹۵ نواحی جنوب و جنوب شرقی و بخش‌هایی از شرق محدوده نجف‌آباد نسبت به سایر بخش‌های این محدوده حساسیت بیشتری از خود نشان داده‌اند و ریسک بسیار زیادی برای وقوع خشک‌سالی دارند؛ زیرا در این بخش‌ها تبخیر- تعرق زیاد و میزان بارندگی کم بوده است. بنابراین، به عنوان مناطق حساس در برابر خشک‌سالی شناسایی شده‌اند. در سال ۲۰۰۸ ریسک خطرپذیری مناطق فوق‌الذکر به قوت خود باقی مانده است. با این تفاوت که در سال ۱۹۹۵، نسبت به سال ۲۰۰۸، پیکسل‌های کمتری نسبت به خشک‌سالی حساسیت نشان می‌دهند. درحالی‌که در همان نواحی در سال ۲۰۰۸ پیکسل‌های بیشتری درگیر خشک‌سالی شده‌اند و پهنه نواحی حساس وسیع‌تر شده است. علاوه بر آن‌ها، نواحی شرقی و مرکزی و غربی نیز نسبت به خشک‌سالی حساسیت از خود نشان داده‌اند. در سال ۲۰۱۵ نواحی جنوبی و جنوب شرقی، که در سال ۱۹۹۵ و ۲۰۰۸ دچار خشک‌سالی شده‌اند، در این سال از وضعیت خشک‌سالی تا حدود زیادی خارج شده و از شرایط مطلوب‌تری برخوردارند. این موضوع گویای بهتر شدن وضعیت بارش در این بخش از دشت است. نتایج حاصل از این تحقیق متخصصان را در زمینه شناسایی مناطقی که بیشتر در خطر وقوع خشک‌سالی قرار دارند و در حین وقوع خشک‌سالی بیشتر آسیب می‌بینند فراهم می‌آورد. با توجه به نقشه به‌دست‌آمده، برنامه‌ریزی‌های مناسب به منظور کاهش اثرهای خشک‌سالی به‌خصوص در مناطق با ریسک بالا بیش از پیش ضروری به‌نظر می‌رسد. به عبارت دیگر، نقشه به‌دست‌آمده می‌تواند به مدیریت ریسک خشک‌سالی کمک کند و آمادگی مقابله با آن را قبل از وقوع و گسترش آن را فراهم کند؛ به‌طوری‌که با آگاهی از شرایط فعلی منطقه، تصمیمات لازم و از قبل طراحی شده برای مقابله با آن اعمال شود.

## منابع

- ابریشم‌کار، م. و احمدی، آ. (۱۳۹۳). طرح تحقیقاتی کاربرد سنجش از دور در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در تعیین نیاز آبی، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان.
- بزرگ‌مهر، ک.؛ حکیم‌دوست، ی. و پورزیدی، ع. (۱۳۹۵). مکان‌یابی بهینه ایستگاه سینوپتیک با روش منطق فازی و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی مورد مطالعه: شهرستان تنکابن، دو فصل‌نامه پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری، ۲(۷): ۲۹-۳۰.
- پورمحمدی، س.، دستورانی، م.، مختاری، م.ح. و رحیمیان، م.ح. (۱۳۸۹). تعیین و پهنه‌بندی تبخیر و تعرق واقعی توسط تکنیک سنجش از دور و الگوریتم سبال مطالعه موردی: حوضه آبخیز منشاد در استان یزد، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۳(۴): ۲۱.
- رستم‌زاده، ه. (۱۳۹۳). کاربرد داده‌های دورسنجی در پهنه‌بندی مناطق آسیب‌پذیر نسبت به خشک‌سالی (مطالعه موردی دشت سراب)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه تبریز.
- وزارت جهاد کشاورزی (۱۳۹۱). گزارش طرح جامع مدیریت خطرپذیری خشک‌سالی کشاورزی، تهران.
- عبدلی، ح. (۱۳۸۹). برآورد تبخیر- تعرق با استفاده از الگوریتم توازن انرژی سطح برای زمین و تصاویر ماهواره‌ای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- عمرانی، ح.؛ ولی‌زاده، خ. و حجازی، آ. (۱۳۹۳). کاربرد سنجش از دور و GIS در مطالعه شاخص‌های خشک‌سالی به روش سبال کوهستانی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه تبریز.
- قمرنیا، ه. و رضوانی، و. (۱۳۹۳). محاسبه و پهنه‌بندی تبخیر- تعرق با استفاده از الگوریتم سبال در غرب ایران، آب و خاک، ۱(۲۸): ۷۲-۸۱.
- هاشمی دوبین، م. و آهنگرزاده، ز. (۱۳۹۲). پایش خشک‌سالی استان خراسان شمالی در محیط GIS، نخستین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران، دانشگاه صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان.
- Abrishamkar, M. and Ahmadi, A. (2014). A research project on the application of remote sensing for estimating actual evapotranspiration in water demand assessment, Regional Water Company Isfahan.
- Allen, R.G.; Tasumi, M. and Trezza, R. (2008). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model, *Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4): 380-394.
- Abdoli, H. (2011). Estimation of Evapotranspiration Using Surface Balance Algorithm for Land (SEBAL) and Satellite Images, Master's thesis, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. (In Persian).
- Bastiaanssen, W.G.M. (2000). SEBAL- based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, *Hydrology*, 229(1, 2): 87-100. (In Persian).
- Bozorgmehr, K.; Hakimmdost, Y. and Porzeidi, A. (2017). Optimal positioning station using Fuzzy logic and AHP case study: Tonkabon, *Biannual Journal of Urban Ecology Researches*, 2(7): 29-30.
- Courault, D.; Seguin, B. and Olioso, A. (2005). Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches, *Irrigation and Drainage system*, 19: 223-249.
- Department of Agriculture (2012). *Description of Services Master Plan Risk Management drought*, Tehran, Iran.

- Ghambarnia, H. and Rezvani, W. (2013). zoning and calculated evapotranspiration using the algorithm closer to the West, Iran (plain Miandarband), *Soil and Water*, 28(1): 72-81. (In Persian).
- Hao, Z.; Hao, F.; Singh, V.P.; Ouyang, W. and Cheng, H. (2017). An integrated package for drought monitoring, prediction and analysis to aid drought modeling and assessment, *Environmental Modeling and Software*, 91: 199.
- Hashemi Davin, M. and Angarzade, Z. (2013). Drought monitoring North Khorasan province in GIS, *Iran's National Meteorological Conference*, Industrial and Technology Graduate University, Kerman.
- Melesse, A.M. (2004). Spatiotemporal dynamics of land surface parameters in the Red River of the North Basin, *Physics and Chemistry of the Earth*, 29(11, 12): 795-810.
- Miller, R.B. and Fox, G.A. (2017). A tool for drought planning in Oklahoma: Estimating and using drought-influenced flow exceedance curves, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 10: 35.
- Meijerink, A.M.J.; Gieske, A.S.M. and Vekerdy, Z. (2005). Surface energy balance using satellite data for the water balance of a traditional Irrigation-Wetland system in SW Iran, *Irrigation and Drainage system*, 19(1): 89-105.
- Omrani, H.; Valizade, Kh. and Hejazi, A. (2015). Application of remote sensing and GIS in the study of drought indices using mountain SEBAL Case Study: East Azarbaijan, Master's thesis, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Tabriz. (In Persian).
- Pathak, A.A. and Dodamani, B.M. (2016). Comparison of two hydrological drought indices, *Perspectives in Science*, 8: 626-628.
- Pormohamadi, S.; Dastorani, M.; Mokhtari, M.H. and Rahimian, M.H. (2011). Real using by Remot sensing and SEBAL algorithm Case study: Manishad Watershed in evapotranspiration Yazd Province, *Journal of Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 13(4): 21.
- Rostamzade , H.; Jahanbakhsh asl, S. and Sari saraf, B. (2015). The use of telemetry data in regions vulnerable to drought zoning (Case Study Sarab plain), Master's thesis, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Tabriz. (In Persian).
- Waters, R.; Allen, R.; Tasumi, M.; Trezza, R. and Bastiaanssen, W. (2002). *SEBAL Surface Energy Balance Algorithms for Land*, First edition, NASA EOSDIS/Synergy grant from the Raytheon Company through The Idaho Department of Water Resources Publishing.