

پایش خشکسالی بر اساس شاخص ماهواره‌ای (SDI) و داده‌های سنجنده TRMM (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی)

مژده سلیمی فرد^۱، سید حسین ثنائی نژاد^{۲*}، عادل سپهر^۳، لیلیا ثابت دیزاوندی^۴

۱- دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار گروه مناطق خشک و بیابانی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- کارشناس ارشد اداره کل هواشناسی خراسان رضوی

(تاریخ دریافت: ۹۷/۰۱/۱۴، تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۰۵)

چکیده

بررسی احتمال وقوع خشکسالی‌های شدید در ایران با توجه به قرار گرفتن این کشور در منطقه خشک جهان اهمیت زیادی دارد. میانگین بارش در کشور کمتر از یک سوم میانگین بارش سالانه جهان است و همین مقدار نیز از توزیع زمانی و مکانی مناسبی برخوردار نیست. از جمله روش‌های بررسی خشکسالی استفاده از شاخص‌های هواشناسی است. یکی از مهمترین مشکلات استفاده از این شاخص‌ها در ایران پراکندگی نامناسب ایستگاه‌های هواشناسی یا کمبود داده است. در مقابل این روش‌ها، فناوری سنجش‌ازدور قادر به جمع‌آوری داده از نواحی وسیع توسط سنجنده‌های مختلف است. در این مطالعه به منظور بررسی خشکسالی در استان خراسان رضوی در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰، از شاخص ترکیبی بررسی خشکسالی (SDI) استفاده شده است. این شاخص با استفاده از اطلاعات سه شاخص، وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، وضعیت دمایی (TCI) و وضعیت بارش (PCI) از طریق روش تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) محاسبه می‌شود. برای صحت‌سنجی شاخص (SDI)، رابطه همبستگی این شاخص با شاخص (SPI) در بازه‌های زمانی ۳، ۶ و ۹ ماهه در طی فصل رشد بررسی و مقایسه-ای میان مجموع بارش سالیانه و میانگین بلندمدت بارش در ۱۰ ایستگاه همدید (سینوپتیک) در این استان انجام شد. همچنین رابطه همبستگی دو شاخص (VCI) و (SDI) با میزان عملکرد دیم دو گیاه گندم و جو نیز بررسی شد. نتایج این مطالعه حاکی از بروز خشکسالی در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸ در استان خراسان رضوی بود. نتایج بررسی صحت‌سنجی نیز حاکی از وجود همبستگی (R) زیاد میان دو شاخص (SDI) و (SPI) می‌باشد. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص ترکیبی (SDI) علاوه بر پایش همه‌جانبه خشکسالی هواشناسی و افزایش دقت مکانی پایش این پدیده قادر به شناسایی خشکسالی کشاورزی است.

کلمات کلیدی: خشکسالی، داده‌های NDVI، داده‌های دمای سطح زمین، سنجنده TRMM، شاخص ترکیبی خشکسالی (SDI).

مقدمه

کاهش بارش‌ها نسبت به حد نرمال منطقه‌ای را مدنظر قرار می‌دهند (کوئیرینگ و همکاران، ۲۰۱۰). کشور ایران با قرار گرفتن در منطقه خشک و بیابانی جهان با بارشی حدود یک سوم بارش جهانی و نوسان‌های شدید مکانی و زمانی بارش، از دسته کشورهای است که خسارات هنگفتی را از این تهدید طبیعی در گستره‌های مختلف، به ویژه طی دهه‌های اخیر دریافت کرده است (بابایی و همکاران، ۱۳۹۲). بررسی فراوانی رخداد خشکسالی نشان می‌دهد ایران از سال ۱۳۴۷ تا ۱۳۸۴ با بیش از ۱۰ دوره خشکسالی مواجه بوده است (باعقیده و همکاران، ۱۳۹۰).

زندگی بشر در طول تاریخ و در سراسر جهان همواره در معرض انواع مخاطرات طبیعی قرار داشته است که بخشی از این خطرات و حوادث ناشی از فرآیندهای آب‌وهوایی است و در این میان خشکسالی از اهمیت و گستردگی قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. با توجه به اینکه مقدار نرمال بارش‌ها در هر منطقه‌ای با توجه به اقلیم آن متفاوت است در نتیجه تعاریف خشکسالی نیز در هر منطقه متفاوت است؛ به طوری که برخی از تعاریف، روی فاصله زمانی بین بارش‌ها (به عنوان مثال: تعداد متوالی روزهای خشک) تمرکز دارند و برخی دیگر میزان

روش‌های سنتی و متداول پایش خشکسالی بر مبنای کمیت‌های هواشناسی که از روی داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی به دست می‌آیند، استوار هستند. معمولاً تعداد ایستگاه‌های هواشناسی یا موقعیت ایستگاه‌ها در سطح منطقه مورد مطالعه نامناسب است. در چنین شرایطی باید از روش‌های درون‌یابی برای بررسی تغییرات پارامترهای هواشناسی بین ایستگاه‌ها استفاده کرد. این امر به خصوص در مناطقی با تغییرات ارتفاعی زیاد منجر به عدم قطعیت خواهد شد (مؤذن زاده و همکاران، ۱۳۹۱). در مقایسه با روش‌های هواشناسی، فناوری سنجنش از دور توانایی و کارایی خود را در زمینه فراهم سازی اطلاعات لازم و نیز بستر مناسب برای پایش و ارزیابی گستره وقوع و عوارض این پدیده نشان داده است (ثنائی نژاد و همکاران، ۱۳۸۶). از مزایای استفاده از فناوری سنجنش از دور نسبت به روش‌های زمین پایه، می‌توان به افزایش نقاط نمونه برداری، پوشش مکانی وسیع‌تر، تفکیک زمانی بهتر و هزینه کمتر اشاره کرد (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۱). در این روش به منظور بررسی خشکسالی از شاخص‌هایی استفاده می‌شود که از جمله آنها می‌توان به شاخص‌های $NDVI$ ، VCI و TCI اشاره نمود.

کوگان (۱۹۹۵) برای اولین بار دو شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) و شاخص وضعیت دمایی (TCI) را که به ترتیب با استفاده از داده‌های $NDVI$ و باندهای گرمایی سنجنده $AVHRR$ محاسبه می‌شدند، معرفی کرد. سایروس و همکاران (۲۰۰۴)، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای دو شاخص VCI و TCI با هدف بدست آوردن تأثیر دوره خشکسالی بر روی محصولات زراعی محاسبه کردند. سان و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی رابطه شاخص $NDVI$ و دمای سطح زمین (LST) در شمال آمریکا پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که رابطه همبستگی بین این شاخص و دمای سطح زمین بستگی به فصل سال دارد. کوئیرینگ و همکاران (۲۰۱۰)، به منظور پایش

خشکسالی در آمریکا شاخص VCI را محاسبه کردند و رابطه همبستگی این شاخص را با شاخص‌های هواشناسی خشکسالی از قبیل SPI ، $PDSI$ ، شاخص Z پالمر، درصد نرمال و شاخص دهک بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص VCI دارای همبستگی قوی با شاخص‌های SPI (۶ ماهه) و SPI (۹ ماهه) و همچنین $PDSI$ می‌باشد. بو و همکاران (۲۰۱۰)، با استفاده از ۳ شاخص VCI ، TCI و $TRCI$ اقدام به محاسبه شاخص DCI در جنوب چین به منظور پایش خشکسالی کردند. در این مطالعه از داده‌های سنجنده مودیس و همچنین داده‌های بارش سنجنده $TRMM$ استفاده شد. کارنیللی و همکاران (۲۰۱۰)، به بررسی رابطه $NDVI$ و LST در طول فصل رشد به عنوان مؤلفه‌ای برای پایش خشکسالی در مناطق مختلف پرداختند. سون و همکاران (۲۰۱۲)، به بررسی خشکسالی کشاورزی با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس در تایلند پرداختند. آنها از شاخص $TVDI$ برای پردازش داده‌ها استفاده نمودند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که همبستگی مناسبی بین شاخص $TVDI$ و داده‌های رطوبت خاک و بارش مشاهده می‌شود. دو و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی همه‌جانبه خشکسالی با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس و $TRMM$ در بخشی از چین پرداختند. در این مطالعه از داده‌های LST و $NDVI$ سنجنده مودیس و داده‌های بارش سنجنده $TRMM$ استفاده شد. آنها در این مطالعه شاخص جدید SDI را که ترکیبی از ۳ شاخص VCI ، TCI و PCI است معرفی کردند. ژانگ فنگ و همکاران (۲۰۱۳)، به منظور شناسایی رابطه میان زمان تاخیر کاهش بارش‌ها و تأثیر آن بر روی $NDVI$ در دوران بروز خشکسالی، مطالعه‌ای را در طی فصل رشد در چین به انجام دادند. ثنائی نژاد و همکاران (۱۳۸۶)، به منظور پایش خشکسالی با استفاده از دو تصویر ماهواره لندست یکی در سال کم‌باران و دیگری در سال مرطوب، مطالعه‌ای را در محدوده‌ای از دشت مشهد انجام دادند. در این مطالعه به منظور

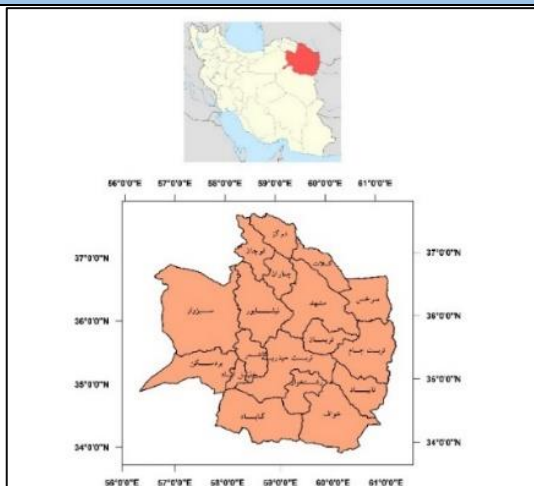
3- Tropical Rainfall Condition Index (TRCI)

4- Synthesized Drought Index (SDI)

5- Precipitation Condition Index (PCI)

1- Vegetation Condition Index (VCI)

2- Temperature Condition Index (TCI)



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی خراسان رضوی

تنوع اقلیمی استان خراسان رضوی بر اساس روش دومارتن گسترش یافته مطابق با شکل ۲ است.

نزدیک به ۳۰ درصد از اراضی این استان به زراعت آبی و دیم اختصاص دارد. این نواحی عمدتاً در بخش‌های مرکزی، شمال، شمال غربی و شرق استان قرار دارند. عمده محصولات زراعی تولید شده در استان در زمینه غلات شامل: گندم آبی و دیم، جو آبی و دیم و ذرت دانه‌ای است (آسیائی و همکاران، ۱۳۸۳).

توجه به این نکته ضروری است که اثرات خشکسالی در مناطقی که رشد گیاهان مستقیماً و تنها تحت تأثیر اکوسیستم منطقه است مانند مناطق مرتعی و مناطقی که تحت کشت دیم هستند، بهتر و بیشتر قابل مشاهده و بررسی می‌باشد. از این رو محدوده مناطق شهری، زراعی آبی و باغ‌ها با توجه به نقشه کاربری اراضی خراسان رضوی شناسایی شدند. با توجه به مساحت محدوده‌های فوق و اندازه یک کیلومتر مربعی پیکسل‌های تصاویر مربوط به شاخص‌ها، محدوده‌های فوق تقریباً ۲۱ درصد از کل مساحت استان خراسان رضوی را شامل می‌شد. در نقشه‌های محاسبه شده برای شاخص‌ها این محدوده‌ها با توجه به درصد کم نمایش داده نشده است.

بررسی تأثیر خشکسالی روی محصولات زراعی شاخص NDVI محاسبه شد. مؤذن‌زاده و همکاران (۱۳۹۱)، با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس روند تغییرات شاخص NDVI را در ماه‌های نوامبر تا مه سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ در کشت مرتعی و اراضی دیم حوضه آبریز نیشابور مورد مطالعه قرار دادند. یزدان-پناه و همکاران (۱۳۹۳)، مطالعه‌ای را در نیمه شمالی خوزستان به منظور بررسی کارایی شاخص NDVI در پایش خشکسالی انجام دادند. در این پژوهش از داده‌های سنجنده مودیس برای محاسبه NDVI در ماه ژوئن و بر اساس داده‌های ۱۳ ایستگاه همدید به منظور محاسبه SPI در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه استفاده شد.

هدف مطالعه اخیر، استفاده و ترکیب داده‌های متفاوت و شاخص‌های مختلف حاصل از فناوری سنجنش از دور (داده‌های LST به عنوان مؤلفه دمایی، داده‌های NDVI به عنوان مؤلفه گیاهی و داده‌های بارش سنجنده TRMM به عنوان مؤلفه بارش) به منظور شناسایی و بررسی دقیق خشکسالی به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک و افزایش دقت مکانی و زمانی بررسی این پدیده است. با توجه به این موارد در این مطالعه از شاخص ترکیبی خشکسالی (SDI) به منظور بررسی این پدیده در استان خراسان رضوی استفاده شد. این شاخص با ترکیب سه شاخص VCI، TCI و PCI و از طریق روش آماری آنالیز مولفه اصلی (PCA^۱) محاسبه شد.

منطقه مورد مطالعه

استان خراسان رضوی با وسعتی حدود ۱۱۷۷۶۹ کیلومتر مربع معادل ۷ درصد از مساحت کل کشور در شمال شرقی ایران بین مدارات ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی جغرافیایی قرار گرفته است (شکل ۱).

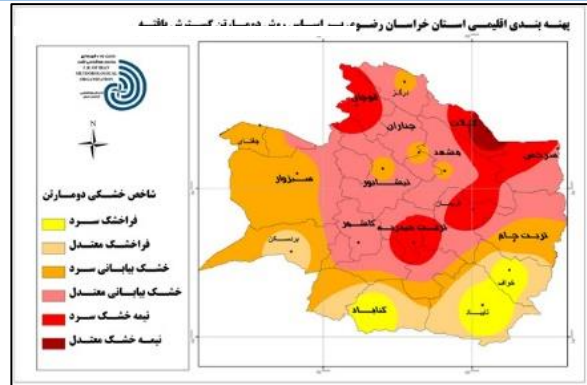
که در آن مقدار شاخص وضعیت پوشش گیاهی در سال i در دوره مطالعاتی مورد نظر، $NDVI_i$ مقدار $NDVI$ مربوط به هر پیکسل در سال i در دوره مطالعاتی مورد نظر، $NDVI_{min}$ مقدار حداقل $NDVI$ هر پیکسل در دوره مطالعاتی مورد نظر و $NDVI_{max}$ = مقدار حداکثر $NDVI$ هر پیکسل در دوره مطالعاتی مورد نظر است.

محدوده تغییرات این شاخص گیاهی بین (۰-۱) می‌باشد. هرچه میزان شاخص به صفر نزدیک باشد، نماینگر شاخص به صفر نزدیک باشد، وضعیت رشد ضعیف پوشش در منطقه و بروز پدیده خشکسالی است و هر چه میزان شاخص به ۱ نزدیک باشد، نشان دهنده وضعیت رشد مطلوب پوشش گیاهی و شرایط مناسب آب و هوایی است.

برای محاسبه این شاخص از محصولات ماهواره‌ای سنجنده مودیس با نام (MOD 13A3) استفاده شد. این محصول دارای تفکیک زمانی ماهانه و تفکیک مکانی ۱ کیلومتر در ۱ کیلومتر می‌باشد. کلیه تصاویر مورد استفاده در این مطالعه در بازه زمانی سال‌های (۲۰۱۰-۲۰۱۱) برای منطقه مورد مطالعه استخراج شدند. تصحیحات اولیه بر روی تصاویر شامل تغییر سیستم مختصات تصاویر به UTM، جداسازی لایه $NDVI$ تصاویر و آماده‌سازی تصاویر جهت محاسبات شاخص مذکور در نرم افزار سنجنش از دور **Imagie Erdas 9.1** انجام شد، سپس تصاویر به صورت ماهانه در طی دوره ۱۰ ساله مورد مطالعه مرتب‌سازی شدند. محاسبات مربوط به شاخص VCI در نرم افزار **Matlab 8.7** صورت گرفت. تصاویر زمین مرجع شده شاخص بر اساس نقشه خراسان رضوی برش خوردند.

۳-۲ شاخص وضعیت دمایی (TCI)

شاخص وضعیت دمایی (TCI) در سال ۱۹۹۵ توسط کوگان، به عنوان ابزاری مکمل برای شاخص VCI جهت بررسی هرچه دقیق‌تر پدیده خشکسالی معرفی شد (کوگان، ۱۹۹۵). در این شاخص فرض می‌شود پدیده خشکسالی باعث کاهش رطوبت خاک و ایجاد تنش گرمایی در سطح زمین



شکل ۲- پهنه‌بندی اقلیمی استان خراسان رضوی بر اساس روش دومارتن گسترش یافته.

مواد و روش‌ها

شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)

مقادیر پوشش گیاهی بر روی سطح زمین اساساً توسط مؤلفه‌های اصلی محیط فیزیکی مانند اقلیم، خاک و آب‌وهوا کنترل می‌شوند. شاخص $NDVI$ از جمله معروف‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌ها در زمینه مطالعات پوشش گیاهی بوده و دارای بیشترین حساسیت نسبت به تغییرات پوشش سطح زمین است. برای مناطق دارای پوشش گیاهی، تغییرات کوتاه‌مدت آب و هوا نسبت به تغییرات بلندمدت اکوسیستم دارای تأثیر کمتری بر روی تغییرات $NDVI$ است. در نتیجه تأثیر پدیده خشکسالی روی پوشش گیاهی به راحتی از طریق داده‌های $NDVI$ قابل شناسایی نمی‌باشد. به همین منظور در این مطالعه از شاخص VCI که قادر به شناسایی تأثیرات تغییر اکوسیستم بر پوشش گیاهی در منطقه می‌باشد استفاده شد (کوگان، ۱۹۹۵).

مقادیر VCI مقدار افزایش یا کاهش رشد پوشش گیاهی در پاسخ به تغییرات آب‌وهوا و همچنین چگونگی توسعه رشد پوشش نسبت به پتانسیل حداکثری و حداقلی رشد را که توسط محدودیت‌های اکولوژیکی تعریف می‌شود نشان می‌دهد (گانای و همکاران، ۱۹۹۸). این شاخص با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای شاخص $NDVI$ و در سطح محاسبات پیکسلی از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$VCI_i = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (1)$$

خواهد شد، که نتیجه آن افزایش دمای هوا در سال‌های خشک نسبت به سال‌های نرمال است.

الگوریتم محاسبه این شاخص همانند شاخص VCI در سطح محاسبات پیکسلی می‌باشد، و از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$TCI_i = \frac{LST_{max} - LST_i}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (2)$$

که TCI_i مقدار شاخص وضعیت دمایی در سال i در دوره مطالعاتی مورد نظر، LST_{max} مقدار بیشینه دمای سطح زمین مربوط به هر پیکسل در دوره مطالعاتی مورد نظر، LST_i مقدار دمای سطح زمین مربوط به هر پیکسل در سال i در دوره مطالعاتی مورد نظر و LST_{min} مقدار کمینه دمای سطح زمین مربوط به هر پیکسل در دوره مطالعاتی مورد نظر هستند.

محدوده تغییرات این شاخص نیز بین (۰-۱) است که در شرایط خشکسالی نزدیک به صفر و در شرایط ترسالی به ۱ نزدیک است.

به منظور محاسبه این شاخص از محصولات سنجنده مودیس با نام (MOD 11A2) استفاده شد. داده‌های این محصول دارای تفکیک زمانی ۸ روزه و تفکیک مکانی ۱ کیلومتر است. برای پردازش و مقایسه شاخص‌ها با یکدیگر لازم است هر سه شاخص از لحاظ تفکیک مکانی و زمانی یکسان باشند. به این منظور تصاویر ۸ روزه دمای سطح زمین (LST) باید به صورت تصاویر ماهانه تبدیل شوند. برای محاسبه تصاویر ماهانه (LST) از روش وزن دادن به تعداد روزهای هر ماه بر اساس داده‌های ۸ روزه دمای سطح زمین استفاده می‌شود (ری و همکاران، ۲۰۱۰). تصحیحات لازم بر روی تصاویر صورت گرفت و شاخص TCI در نرم افزار Matlab محاسبه و خروجی‌های مورد نظر استخراج شد.

شاخص وضعیت بارندگی (PCI)

شاخص‌های VCI و TCI که از جمله شاخص‌های پراهمیت در بررسی خشکسالی است، مستقیماً قادر به تخمین بارش‌ها در منطقه نیست. به همین دلیل در این مطالعه از شاخص

PCI برای بررسی تغییرات بارش استفاده شده است. الگوریتم محاسبه این شاخص مشابه شاخص VCI است با این تفاوت که در آن از داده‌های سنجنده TRMM استفاده شده است. این شاخص از طریق رابطه (۳) و در سطح پیکسلی محاسبه می‌شود:

$$PCI_i = \frac{TRMM_i - TRMM_{min}}{TRMM_{max} - TRMM_{min}} \quad (3)$$

که PCI_i مقدار شاخص وضعیت بارش در سال i در دوره مطالعاتی، $TRMM_i$ مقدار بارش مربوط به هر پیکسل در سال i در دوره مطالعاتی، $TRMM_{min}$ مقدار حداقل بارش برای هر پیکسل در دوره مطالعاتی مورد نظر و $TRMM_{max}$ مقدار حداکثر بارش مربوط به هر پیکسل در دوره مطالعاتی مورد نظر است.

محدوده تغییرات این شاخص نیز همانند دو شاخص VCI و TCI، میان (۰-۱) است که هر چه میزان شاخص به سمت صفر میل کند حاکی از کمبود بارش و هر چه به سمت ۱ میل کند حاکی از شرایط مناسب بارش در منطقه و وضعیت معمولی اکوسیستمی است. در مطالعه اخیر از محصول 43B3 ماهواره TRMM استفاده شد. این محصول دارای داده‌های بارش بر حسب میلیمتر بر ساعت (mm/h) است که داده‌های بارش را از سال ۱۹۹۸ تا حال حاضر شامل می‌شود. این محصول شامل تصاویر با فرمت HDF می‌باشد که دارای تفکیک مکانی ۰,۲۵ × ۰,۲۵ و تفکیک زمانی ماهانه است. تصحیحات اولیه و آماده سازی تصاویر به منظور محاسبه شاخص مورد نظر در نرم‌افزار سنجش از دور Erdas صورت گرفت و همچون دو شاخص بالا شاخص PCI در بازه زمانی ماهانه در دوره سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ محاسبه شد.

شاخص ترکیبی بررسی خشکسالی (SDI)

برای بررسی همه‌جانبه خشکسالی لازم است تمامی عوامل بارش، دما و پوشش گیاهی همزمان با یکدیگر بررسی شود. در این مطالعه شاخص ترکیبی بررسی خشکسالی (SDI) از طریق روش تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)، به منظور دریافت اطلاعات

جدول ۱- کلاس‌های خشکسالی شاخص ترکیبی بررسی خشکسالی

(SDI)

میزان شاخص SDI	کلاس‌های خشکسالی
$SDI < ۰,۲$	خشکسالی بسیار شدید
$۰,۲ \leq SDI < ۰,۳$	خشکسالی شدید
$۰,۳ \leq SDI < ۰,۴$	خشکسالی متوسط
$۰,۴ \leq SDI < ۰,۵$	خشکسالی خفیف
$SDI > ۰,۵$	بدون خشکسالی

صحت سنجی

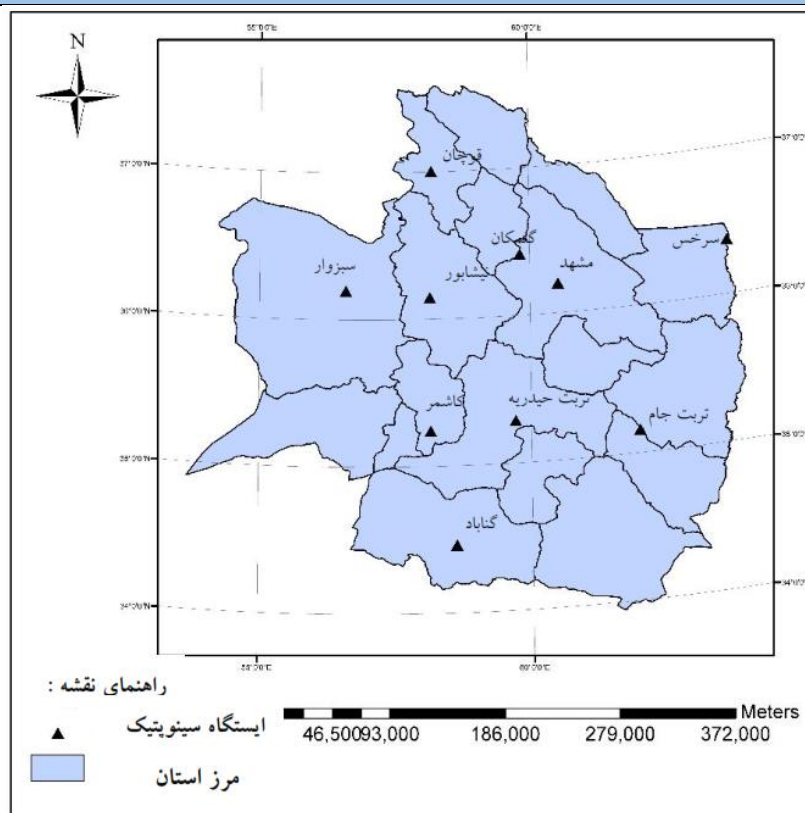
بررسی رابطه همبستگی میان شاخص SDI و شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

برای ارزیابی دقت و صحت شاخص ترکیبی بررسی خشکسالی (SDI)، رابطه همبستگی این شاخص با شاخص هواشناسی SPI بررسی شد. به منظور محاسبه شاخص SPI، ابتدا ۱۰ ایستگاه همدید مطابق شکل (۳) در سطح استان خراسان رضوی بر مبنای دوره آماری مشترک ۱۷ ساله‌ای بین سال‌های (۲۰۱۰-۱۹۹۳) برگزیده شدند. پس از مرتب‌سازی داده‌ها و بازسازی داده‌های مفقود، شاخص SPI توسط نرم‌افزار DIP (مرید و همکاران، ۲۰۰۵)، در بازه‌های زمانی ۳، ۶ و ۹ ماهه محاسبه شد. رابطه همبستگی بین دو شاخص SPI و میانگین پیکسل‌های شاخص SDI برای هر شهرستان، تنها طی فصل رشد یعنی دوره زمانی بین ماه‌های (مارس- سپتامبر) سال‌های (۲۰۱۰-۲۰۰۱) بررسی شد.

اصلی از سه شاخص VCI، TCI و PCI و حذف همبستگی در آنها، محاسبه شد (دو و همکاران، ۲۰۱۳).

تحلیل مؤلفه اصلی تبدیلی در فضای برداری است که غالباً برای کاهش ابعاد مجموعه داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تحلیل شامل تجزیه مقدار ویژه ماتریس کوواریانس است. با استفاده از این روش می‌توان تعداد زیادی متغیر همبسته را با تعداد محدودی متغیر جدید که مؤلفه اصلی نامیده می‌شوند و ناهمبسته‌اند جایگزین کرد و به این ترتیب بعد مسأله را کاهش داد. این شاخص به ۵ کلاس متفاوت مطابق جدول (۱) برای شناسایی شدت پدیده خشکسالی، تقسیم بندی می‌شود.

برای محاسبه شاخص SDI به صورت ماهانه در کل دوره مطالعاتی ۱۰ ساله بین سال‌های (۲۰۱۰-۲۰۰۱)، ابتدا هر یک از ۳ شاخص VCI، TCI و PCI به صورت یک باند طیفی مجزا برای هر ماه وارد نرم افزار Erdas شدند و روی یکدیگر قرار گرفتند. در نهایت تصویری با ۳ لایه اطلاعاتی که هر کدام از لایه‌های آن شامل اطلاعات یکی از شاخص‌های فوق است تولید و در نهایت ۱۲۰ تصویر ماهانه برای خراسان رضوی حاصل شد. پس از آن روش تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) روی هر یک از تصاویر در نرم افزار Erdas انجام شد. در این تحلیل با توجه به تعداد لایه‌های تصاویر سه مؤلفه اصلی تعریف می‌شود. لایه اول حاوی اطلاعات مؤلفه اول است و بیش از ۷۵ درصد اطلاعات ۳ شاخص VCI، TCI و PCI را شامل می‌شود و به عنوان شاخص ترکیبی بررسی خشکسالی (SDI) شناخته می‌شود. پس از آن با توجه به کلاس‌های طبقه‌بندی شاخص SDI که مطابق با جدول (۱) است، کلیه تصاویر طبقه‌بندی شدند و خروجی مناسب از تصاویر استخراج شد.



شکل ۳- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های همدید مورد مطالعه

(کشت غالب در خراسان رضوی) و همچنین شاخص‌های VCI و SDI، در دوره ۱۰ ساله مورد مطالعه صورت پذیرفت. با توجه به اینکه مقادیر عملکرد به صورت سالانه زراعی اندازه‌گیری می‌شود، میانگین سالانه زراعی دو شاخص VCI و SDI نیز محاسبه شد.

بحث و نتایج

خشکسالی را می‌توان از جمله عوارض طبیعی تغییرات اقلیمی در سطح دنیا دانست که عواملی مانند مقدار بارندگی منطقه، دما، وضعیت پوشش گیاهی، تبخیر و تعرق از جمله فراسنج‌های مهم تأثیرپذیر از این پدیده زیان‌بخش هستند. با توجه به اینکه بررسی تمامی عوامل مشکل است، در این مطالعه از سه عامل پوشش گیاهی، دمای سطح زمین و بارش به عنوان پارامترهای تأثیرپذیر از خشکسالی، به منظور پایش همه‌جانبه این پدیده در سطح استان خراسان رضوی استفاده شد. هر چند سه شاخص VCI، TCI و PCI می‌توانند به تنهایی وضعیت

مقایسه مجموع بارش سالانه و میانگین بلند مدت بارش

در این مطالعه همچنین به منظور صحت‌سنجی شاخص SDI، مقایسه‌ای بین مجموع بارش سالانه دوره مطالعاتی (۲۰۱۰-۲۰۱۱) و میانگین بلندمدت بارش (۲۰۱۰-۱۹۹۳) در ۱۰ ایستگاه همدید مذکور صورت پذیرفت. در این مقایسه میزان مجموع بارش سالیانه برای هر یک از سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱ در ۱۰ ایستگاه همدید منتخب محاسبه شد و سپس با میانگین بلندمدت بارش مقایسه شد.

بررسی میزان عملکرد کشت دیم در دوره مطالعاتی

با توجه به اینکه خشکسالی کشاورزی از جمله عوامل تأثیرگذار بر روی عملکرد گیاهان زراعی دیم است، بررسی عملکرد این گیاهان از جمله روش‌های بررسی صحت و دقت شاخص‌های خشکسالی است. از این رو در این مطالعه مقایسه‌ای میان میزان تغییرات عملکرد دیم دو گیاه زراعی گندم و جو

مشاهده شد. در این ماه ۶۳ درصد از مساحت استان در طبقه خشکسالی متوسط تا بسیار شدید شاخص ترکیبی خشکسالی قرار گرفتند. نتایج در طی سال ۲۰۰۷ حاکی از نرمال بودن شرایط استان در این سال بود. در کلیه ماه‌های این سال اکثر مناطق استان دارای شاخص SDI بیشتر از ۰٫۵ بودند که در طبقه بدون خشکسالی قرار گرفتند.

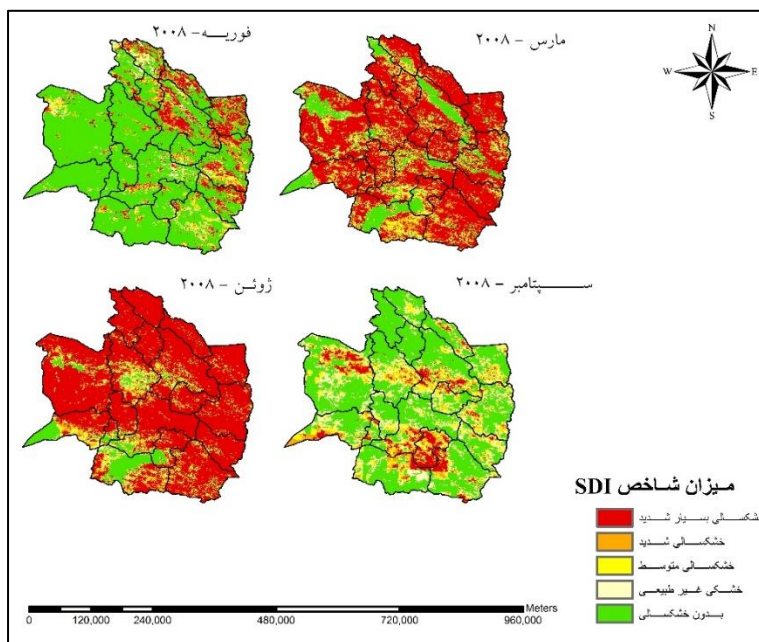
شکل ۴ روند تغییرات خشکسالی در استان خراسان رضوی در سال ۲۰۰۸ را نمایش می‌دهد. این پدیده در استان از ماه دسامبر سال ۲۰۰۷ آغاز شد و تا اکتبر سال ۲۰۰۸ ادامه پیدا کرد. بیشینه گستره وقوع این پدیده در ماه ژوئن و به مقدار ۱۰۲۹۷۱ کیلومتر یعنی ۸۹ درصد از مساحت استان مشاهده شد.

در سال ۲۰۰۹ شرایط استان از لحاظ وقوع پدیده خشکسالی در حالت نرمال بوده است. در اوایل سال ۲۰۱۰ نیز این شرایط حاکم بوده است ولی از اواخر سال ۲۰۱۰ تغییراتی در مقدار خشکی استان مشاهده شد. بررسی روند این تغییرات مستلزم داشتن داده‌های سال ۲۰۱۰ به بعد است که با توجه به اینکه دوره زمانی مورد مطالعه در این تحقیق شامل سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ می‌شود، تفسیر این موضوع با مشکل مواجه می‌شود.

خشکی منطقه را بررسی نمایند اما در عین حال هر سه شاخص دارای اطلاعات مرتبطی هستند که می‌توان از آنها به منظور پایش کامل خشکسالی استفاده کرد.

نتایج این شاخص وقوع پدیده خشکسالی را طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۸ با گستره وقوع بیشتر و در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۶ را با گستره وقوع کمتر نشان داد. نتایج شاخص SDI نشان داد که در سال ۲۰۰۱ پدیده خشکسالی بین ماه‌های ژانویه تا اکتبر در استان خراسان رضوی به وقوع پیوسته است. همچنین نتایج این شاخص حاکی از وقوع همین پدیده در سال ۲۰۰۲ ولی با مساحتی کمتر نسبت به سال ۲۰۰۱ در استان بود. بر اساس نتایج این شاخص برای سال ۲۰۰۲، پدیده خشکسالی از ماه مه در این استان آغاز و تا ماه نوامبر ادامه پیدا کرده است؛ به طوری که در ماه مه ۱۱۷۶۵ کیلومتر مربع یعنی تنها ۱۰ درصد از مساحت استان دارای خشکسالی متوسط تا بسیار شدید، و سایر مناطق در شرایط بدون خشکسالی بوده‌اند.

در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ بر اساس نتایج شاخص، در سطح استان پدیده خشکسالی مشاهده نشد. در سال ۲۰۰۶ نتایج شاخص حاکی از وقوع خشکسالی بین ماه‌های فوریه تا اکتبر بود که حداکثر گستره وقوع خشکسالی در ماه اوت این سال



شکل ۴- روند تغییرات خشکسالی با استفاده از شاخص SDI در استان خراسان رضوی در سال ۲۰۰۸

کاهش بارندگی نتایج شاخص SDI را که نشان دهنده بروز خشکسالی طی سال‌های فوق می‌باشد، تایید کردند.

جدول ۳- مقادیر ضریب همبستگی (R) میان دو شاخص SPI (۳، ۶، ۹) ماهه و شاخص SDI در طی فصل رشد در سطح استان خراسان رضوی طی سال‌های (۲۰۱۰-۲۰۰۱).

شاخص SPI	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژولای	آگوست	سپتامبر
SPI-3	۰,۵۹	۰,۷۵	۰,۸۲	۰,۱۱	۰,۰۱	۰,۴۸	۰,۱۴
SPI-6	۰,۶۲	۰,۶۵	۰,۸۷	۰,۳۰	۰,۲۱	۰,۸۲	۰,۵۲
SPI-9	۰,۶۴	۰,۶۵	۰,۸۳	۰,۵۲	۰,۳۱	۰,۸۱	۰,۶۹

رابطه همبستگی معنادار در سطح ۰,۰۵.

نتایج بررسی مقدار عملکرد کشت دیم

نتایج مقایسه مقدار مجموع عملکرد گندم و جو دیم و شاخص VCI به صورت شکل ۶ است. مقدار ضریب همبستگی (R) در این مقایسه برابر با ۰,۷ بود. نتایج مقایسه مقدار مجموع عملکرد گندم و جو دیم و شاخص SDI نیز به صورت شکل ۷ است. مقدار ضریب همبستگی (R) در این مقایسه نیز برابر ۰,۸ بود. هر دو نمودار طی سال‌های ۱۳۸۰ (۲۰۰۱)، ۱۳۸۵ (۲۰۰۶) و ۱۳۸۷ (۲۰۰۸) کمترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند که حاکی از بروز خشکسالی در این سال‌ها و کاهش عملکرد گیاهان زراعی است.

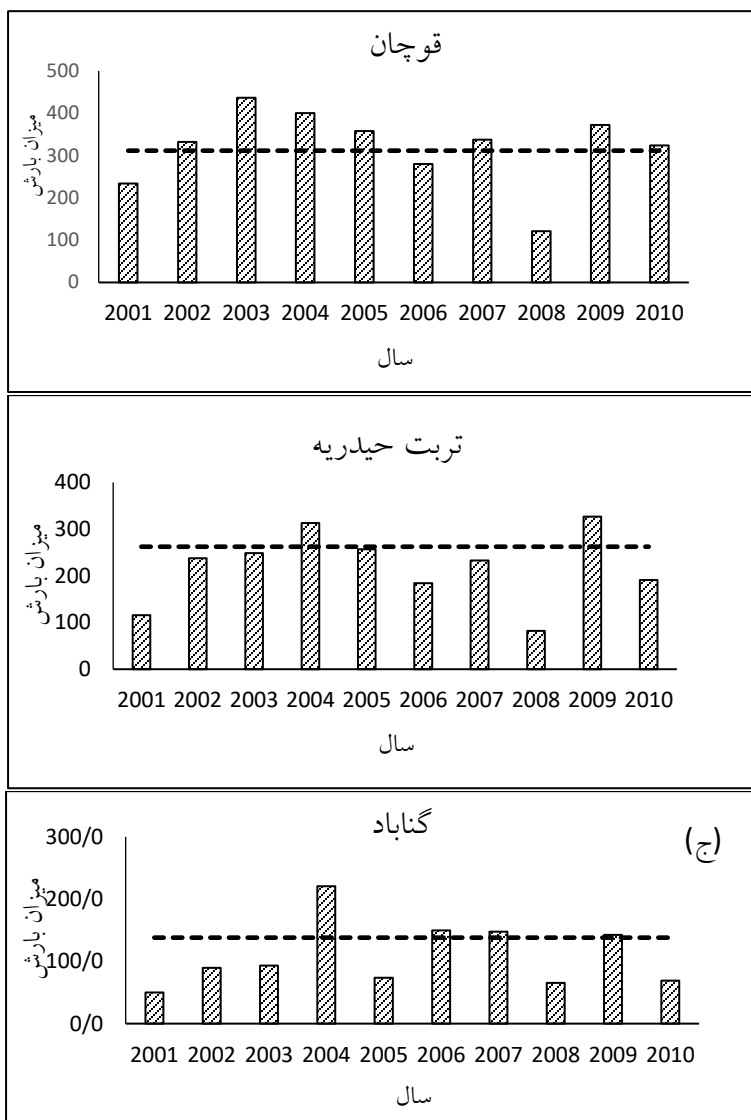
نتایج بررسی همبستگی میان دو شاخص SDI و بارش استاندارد شده (SPI)

نتایج حاصل از بررسی رابطه همبستگی بین دو شاخص SDI و SPI در بازه‌های زمانی ۳، ۶ و ۹ ماهه در فصل رشد مطابق جدول ۳ است.

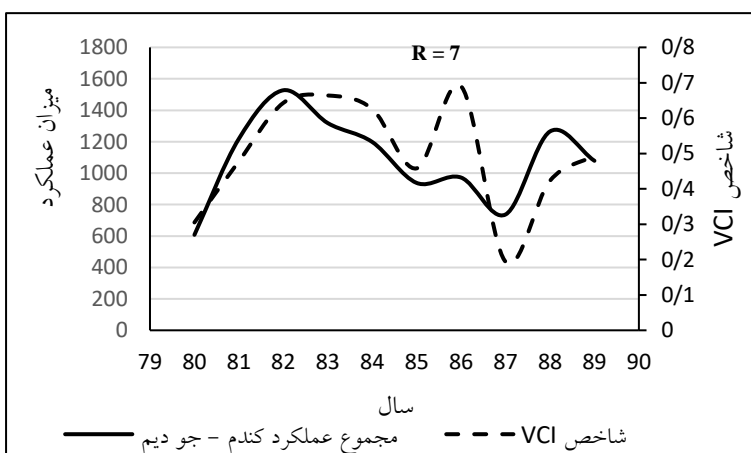
با توجه به نتایج جدول ۳ در ماه آوریل بیشینه ضریب همبستگی با SPI ۳ ماهه و در ماه مه بیشینه مقدار ضریب همبستگی با SPI ۶ ماهه مشاهده شده است. این نتیجه می‌تواند حاکی از تأخیر میان بارندگی‌های مؤثر و حداکثر رشد پوشش گیاهی باشد. با توجه به اینکه بارندگی‌های مؤثر استان معمولاً از ماه دسامبر در اوایل زمستان، آغاز می‌شود، این تأخیر منطقی به نظر می‌رسد. در ماه‌های اوت و سپتامبر نیز بیشترین ضریب همبستگی میان شاخص SDI و SPI ۶ و ۹ ماهه مشاهده شد. با توجه به حداقل شدن بارش‌ها پس از ماه مه و همچنین حداقل شدن رشد پوشش گیاهی، می‌توان نتیجه گرفت که حداقل رشد پوشش نیز در این ماه‌ها بستگی به بارش‌های فصل زمستان و بهار دارد که معمولاً ۶ تا ۹ ماه از یکدیگر فاصله دارند.

نتایج مقایسه مجموع بارش سالانه و میانگین بلندمدت بارش

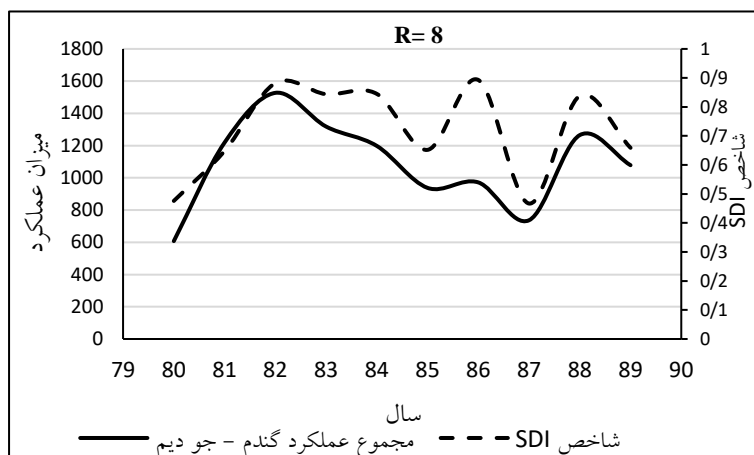
شکل ۵ نتایج این مقایسه را در ۳ ایستگاه قوچان، تربت حیدریه و گناباد که به ترتیب ایستگاه‌های نمونه در مناطق شمالی، مرکزی و جنوبی استان هستند، نشان می‌دهد. همین رفتار در سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز مشاهده شد. این مقایسه نشان داد که در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸ نسبت به سایر سال‌های دوره مطالعاتی در ۱۰ ایستگاه هم‌دید پراکنده در سطح استان خراسان رضوی، کاهش بارش نسبت میانگین بلندمدت بارش در همین ایستگاه‌ها مشاهده شد. این



شکل ۵- تغییرات مجموع بارندگی سالانه نسبت به میانگین بلندمدت بارش (خط نقطه چین) در ایستگاه‌های فوجان، تربت حیدریه و گناباد.



شکل ۶- تغییرات دو نمودار VCI و مجموع عملکرد دیم گندم و جو طی سال‌های (۱۳۸۹-۱۳۸۰).



شکل ۷- تغییرات دو نمودار SDI و مجموع عملکرد دیم گندم و جو طی سال‌های (۱۳۸۹-۱۳۸۰).

نتیجه‌گیری

پایان خشکسالی، قادر به شناسایی شدت خشکسالی در مناطق مختلف نیز باشد.

وجود رابطه همبستگی بالا میان شاخص هواشناسی (SPI) و شاخص حاصل از فناوری سنجش از دور (SDI)، حاکی از قابلیت استفاده از این شاخص به همراه شاخص‌های هواشناسی در مناطق مختلف است. همچنین وجود رابطه همبستگی بالا میان شاخص‌های (VCI) و (SDI) با عملکرد دیم گیاهان زراعی، قابلیت استفاده این شاخص‌ها را در پایش و ارزیابی خشکسالی کشاورزی علاوه بر خشکسالی هواشناسی نیز نشان می‌دهد.

مراجع

- ۱- آسیائی، م. اقوامی، م. جغرافیای گردشگری استان خراسان. (۱۳۸۳). انتشارات سخن گستر.
- ۲- بابایی فینی، ا. علیجانی، ب. تحلیل فضایی خشکسالی‌های بلندمدت ایران. (۱۳۹۲). نشریه پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی. شماره ۳. صفحه ۱۲-۱.
- ۳- باعقیده، م. علیجانی، ب. ضیائیان، پ. بررسی امکان استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI در تحلیل خشک‌سالی‌های

با توجه به اقلیم خراسان رضوی که در بیشتر مناطق این استان شامل اقلیم خشک و نیمه خشک می‌شود، معمولاً اغلب بارش‌ها از اواخر پاییز تا اوایل بهار در منطقه رخ می‌دهد. نتایج شاخص ترکیبی بررسی خشکسالی (SDI) که با توجه به تغییرات پوشش گیاهی، نوسانات دمایی و همچنین تغییرات بارش در استان خراسان رضوی محاسبه شد، نشان داد که پدیده خشکسالی در استان معمولاً بین ماه‌های پایانی فصل زمستان، آغاز و تا اواسط پاییز، یعنی فاصله زمانی بین ماه‌های ژانویه تا اکتبر ادامه می‌یابد. معمولاً حداکثر مقدار گستره وقوع این پدیده در ماه‌های مارس تا اوت یعنی فصول بهار و تابستان مشاهده می‌شود. با توجه به آغاز بارش‌ها در ماه اکتبر اثرات خشکسالی کاهش می‌یابد.

نتایج مطالعه اخیر نشان داد که با توجه به پوشش مناطق مختلف به ویژه مناطق کوهستانی توسط حسگرها و سنجنده‌های ماهواره‌ای، امکان محاسبه شاخص‌های خشکسالی با دقت مکانی و زمانی بیشتر نسبت به شاخص‌های هواشناسی در این مناطق وجود دارد.

نتایج مطالعه اخیر نشان داد که شاخص ترکیبی خشکسالی (SDI) می‌تواند علاوه بر تعیین زمان شروع، طول مدت و زمان

Applied Earth Observation and Geoinformation 23: 245-253.

10- Karnieli, A., Agam, Nurit., Pinker, Rachel T., Anderson, Martha., Imhoff, Marc L., Gutman, Garik G., Panov, Natalya., Goldberg, Alexander. (2010). "Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations." Journal of climate 23 (3) : 618-633.

11- Kogan, F. (1995). "Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection." Advances in Space Research 15 (11): 91-100.

12- Morid, S., Moghaddam, M., Paymozd, Sh., Ghaemi, H. (2005). "Design of Tehran province drought monitoring system. Final Report. "Water Resources Management Co. (WRMC-Iran), 196p. (In Persian).

13- Quiring, S. M. and S. Ganesh (2010). "Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas." Agricultural and Forest Meteorology 150 (3): 330-339.

14- Rhee, J., Im, Jungho., Carbone, Gregory J. (2010). "Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data." Remote Sensing of Environment 114 (12) : 2875-2887.

15- Son N., Chen CF., Chen CR., Chang LY., Minh, VQ. (2012). "Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data." International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 18: 417-427.

16- Sun, D. and M. Kafatos (2007). "Note on the NDVI-LST relationship and the use of temperature-related drought indices over North America." Geophysical Research Letters 34 (24).

17- Tsirios, E., Domenikiotis, C., Spiliotopoulos, M., Dalezios, NR. (2004). Use of NOAA/AVHRR-based vegetation condition index (VCI) and temperature condition index (TCI) for drought monitoring in Thessaly, Greece. EWRA Symposium on water resources management: risks and challenges for the 21st century, Izmir, Turkey.

18- Unganai, L.S. and F.N. Kogan (1998). "Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data." Remote Sensing of Environment 63 (3): 219-232.

استان اصفهان. (۱۳۹۰). مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، سال اول، شماره چهارم، صفحه ۱۶-۱.

۴- ثنائی نژاد، ح. داوری، ک. عابدی، ع. پایش خشکسالی کشاورزی در دشت مشهد با استفاده از نمایه NDVI و معرفی نمایه APVI. (۱۳۸۶). مجله علوم و صنایع کشاورزی (ویژه آب و خاک). جلد ۲۱. شماره ۱. صفحه ۹۵-۸۹.

۵- رضایی مقدم، م. ولی زاده کامران، خ. رستم زاده، ه. ارزیابی کارایی داده‌های سنجنده MODIS در برآورد خشکسالی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه). (۱۳۹۱). نشریه جغرافیا و پایداری محیط. شماره ۵. صفحه ۵۲-۳۷.

۶- موذن زاده، ر. ارشد، ص. قهرمان، ب. داوری، ک. پایش خشکسالی در کشت‌های غیر آبی با استفاده از تکنیک سنجش از دور. (۱۳۹۱). نشریه مدیریت آب و آبیاری. دوره ۲. شماره ۲. صفحه ۵۲-۳۹.

۷- یزدان پناه، ح. مؤمنی، م. حسینقلی نژاد دزفولی، ح. سلیمانی - تبار، م. مقایسه شاخص‌های پوشش گیاهی سنجش از دور در پایش خشکسالی (مطالعه موردی: مراتع نیمه شمالی استان خوزستان). (۱۳۹۳). مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. شماره ۲. صفحه ۹۸-۸۵.

8- Bo Y., Su Ma., Jing Li., Yufang Liao., Bin Zhou., Kuenzer Claudia. (2012). Agricultural drought monitoring in Dongting Lake Basin by MODIS data. Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics), 2012 First International Conference on, IEEE.

9- Du L., Tian Qingjiu., Yu Tao., Meng Qingyan., Jancso Tamas., Udvardy Peter., Huang Yan. (2013). "A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. " International Journal of