

بررسی و پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی در مناطق زاگرسی بر اساس شاخص‌های سنجش‌ازدور و مدل‌های گردش عمومی جو در دوره ۲۰ ساله

سالار میرزاپور^۱، میرمسعود خیرخواه زرکش^{۲*} و زهرا عزیزی^۳

۱- دانشجوی دکتری سنجش‌از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری سازمان تحقیقات و آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
پست الکترونیک: kheirkhahzarkesh96@gmail.com

۳- استادیار سنجش‌از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۷

چکیده

خشک‌سالی در زاگرس که یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های ایران می‌باشد چالشی بزرگ است. سنجش‌ازدور در تشخیص، پایش و مدیریت منابع طبیعی کاربردی کم‌نظیر دارد. هدف این مطالعه بررسی و تحلیل وضعیت خشک‌سالی در زاگرس میانی و جنوبی بر اساس مدل‌های گردش عمومی جو و شبکه عصبی در ارتباط با شاخص‌های سنجش دوری NDVI، VCI، TCI، VHI، DDI، EVI، NDWI و SAVI می‌باشد. برای بررسی روند خشک‌سالی و پیش‌بینی آن از تصاویر سری زمانی ماهواره مودیس در دوره زمانی ۲۰ ساله استفاده شد. نخست شاخص‌های مذکور از محصولات MOD021KM سنجنده Terra طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ تولید شدند و به کمک مدل‌های آماری-دینامیکی MP5 تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 قرار گرفتند و طی دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۹ و شبکه عصبی و شاخص‌های سنجش‌ازدور میزان بارش برآورد شد. وضعیت خشک‌سالی به صورت ۲ دوره، بر اساس روش SPI برای ۲۰ سال وضعیت موجود (۲۰۱۹ - ۲۰۰۰) و بر اساس سناریوهای RCP و روش‌های سنجش‌ازدور و شبکه‌های عصبی برای ۲۰ سال آینده (۲۰۳۹ - ۲۰۲۰) بررسی گردید. نتایج حکایت از ترسالی شدید و بسیار شدید در دوره ۲۰۱۹ - ۲۰۰۰ و دوره ۲۰ سال آینده در نواحی مرتفع منطقه دارد. همچنین تحلیل فضایی و پیش‌بینی خشک‌سالی‌ها نشان‌دهنده الگوی نامنظمی در همه شاخص‌ها بوده و تنها در شاخص‌های NDVI و SAVI تحلیل فضایی خشک‌سالی‌ها توانسته است الگوی نسبتاً منظمی را ارائه کند.

واژه‌های کلیدی: خشک‌سالی، زاگرس، شاخص‌های سنجش‌ازدور، مدل آماری - دینامیکی، مدل گردش عمومی جو.

مقدمه

سیاسی خواهد داشت (Tallaksen & Van Lanen, 2004; Pourkhosrwni *et al.*, 2018). این پدیده در اثر تغییر الگوهای آب‌وهوایی ناشی از کم شدن مقدار برف و باران نسبت به حد معمول در یک منطقه به وجود می‌آید و موجب عدم سازگاری جوامع گیاهی و جانوری ساکن در محل

خشک‌سالی جزو مخاطرات جهانی است و منجر به خسارت‌های بسیار بر اقتصاد، کشاورزی و بروز مسائل سوء اجتماعی می‌شود. از این رو پایش دقیق آن تأثیر زیادی بر کاهش و کنترل آسیب‌های محیطی، اجتماعی، اقتصادی و

بر الگوی پراکنش گیاهان اثرگذار بوده است. میزان رطوبت، زمان‌بندی فصلی و ذخایر انرژی در کنار شرایط اقلیمی موجب شکل‌گیری این الگو می‌شود. از این رو هرگونه فرایند اکوسیستمی در یک منطقه به صورت مستمر تحت کنترل اقلیم قرار دارد و پاسخی طبیعی و سازگار شده به شرایط اکولوژیکی و اقلیم‌شناختی غالب آن منطقه است (Chen *et al.*, 2006; Stephenson, 1990; Foster *et al.*, 1998; Turner *et al.*, 1998).

پوشش جنگلی زاگرس یکی از مهم‌ترین اجزای اکوسیستم زاگرس بوده که نقش مهمی در حفاظت آب‌و‌خاک این منطقه ایفا می‌کند (Alirezaie *et al.*, 2019). با افزایش خشک‌سالی‌های شدید طی چند دهه اخیر که بر اثر کاهش بارندگی در بسیاری از نقاط ایران رخ داد، جنگل‌ها و مراتع باتحمل تنش‌های بسیار دچار آسیب‌های فراوان شدند (Baguskas *et al.*, 2014; Hejazizadeh *et al.*, 2003). به‌عنوان نمونه در پژوهشی مشخص شد درختان بلوط ایرانی دشت برم کازرون بر اثر کاهش بارندگی دچار خشکیدگی شدند و تغییرات دمایی اثر چندانی بر آن‌ها نداشته است (Hamzehpoor *et al.*, 2011). همچنین تطبیق نقشه‌های اقلیمی با نقشه زوال جنگل‌های زاگرس مرکزی در محدوده استان لرستان حکایت از ارتباط معنادار بین عوامل بارش، دما، رطوبت نسبی و تبخیر و تعرق داشت (Attarod *et al.*, 2015).

مدل‌های گردش عمومی جو (General Circulation Model) مدل‌هایی برای شبیه‌سازی اقلیم کنونی و پیش‌بینی تغییرات اقلیم آینده کره زمین هستند. شباهت مدل‌های گردش عمومی جوی با مدل‌های پیش‌بینی آب‌وهوایی در این است که هر دو معادلات پیوستگی دینامیک سیال جوی را در مقیاس‌های گسسته زمانی و مکانی حل می‌کنند. مهم‌ترین تفاوت این مدل‌ها در این است که مدل‌های پیش‌بینی آب‌وهوا معمولاً در دوره‌های کوتاه زمانی (در حد روز)، با تعریف شرایط اولیه دقیق و در ابعاد کمتر از ۱۵۰ کیلومتر مربع اجرا می‌شود. این موضوع برخلاف مدل‌های GCM است که شبکه‌ای مشتمل بر چند طول و عرض

می‌گردد و کیفیت زندگی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در خشک‌سالی هرچه کاهش مقدار نزولات جوی نسبت به میانگین بیشتر باشد اثرگذاری مخاطره بیشتر می‌گردد (Hejazizadeh & Javizadeh, 2010).

کاهش میزان پوشش گیاهی یکی از مشهودترین و مهم‌ترین بازخوردهای خشک‌سالی است. فقر پوشش گیاهی سبب به وجود آمدن مشکلات گوناگونی مانند فرسایش خاک، افزایش میزان رواناب سطحی به شکل سیلاب و بسیاری موارد دیگر استرس‌زا برای محیط خواهد می‌شود. در راستای مدیریت این پدیده، لزوم پایش مستمر و دقیق آن از مهم‌ترین ابزارهای رویارویی است (Moghaddasi *et al.*, 2005).

شاخص SPI به‌عنوان شاخص استاندارد بارش که در سال ۱۹۹۳ معرفی شد، در بررسی و پایش خشک‌سالی و ترسالی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. میانگین و انحراف معیار درازمدت مقادیر بارندگی برای دوره‌های مختلف به‌عنوان ورودی در محاسبه آن به کار می‌روند (Bonaccorso, 2003; Tsakiris *et al.*, 2004). همچنین شناسایی تعداد رخداد‌های خشک‌سالی و ترسالی طی دوره‌های زمانی با توجه به خواست تحلیلگر تعریف می‌گردد (Mckee *et al.*, 1993). ماهیت بی‌بعدی این شاخص این امکان را فراهم می‌آورد تا با مقایسه اطلاعات مناطق مختلف نقشه پهنه‌های خشک‌سالی با دقت بالا تولید شود (Agnew, 2000).

همان‌طور که اشاره شد محاسبه مقیاس‌های مختلف زمانی، مهم‌ترین توانایی SPI است. کاهش بارش در بازه زمانی کوتاه‌مدت، بر رطوبت خاک اثر می‌گذارد. همچنین روند نزولی بارش در مقیاس بلندمدت، بر دبی رودخانه‌ها، مخازن آب و آب‌های زیرزمینی اثر کرده و پیامدهای تنش‌زای محیطی را ایجاد می‌کند. با توجه به دلایل مذکور، در مطالعه وجوه مختلف پدیده خشک‌سالی و پیش‌بینی آن از تجزیه و تحلیل‌های مکانی- زمانی شاخص SPI بهره‌برداری می‌شود (Roshan *et al.*, 2013).

همبستگی میان عوامل محیطی و پوشش گیاهی همواره

ویژگی‌های توپوگرافی و تغییرات فصلی مکان‌گزینی سامانه‌های گردش عمومی جو، خشک‌سالی و ترسالی‌های هواشناسی متناوبی را ایجاد می‌کند که منجر به مسائلی چون کم‌آبی، بیمناسکی از تأمین امنیت غذایی و ضررهای اقتصادی ناشی از آن می‌گردد. در این میان خشک‌سالی مزیدی بر عوامل استرس‌زایی است که جنگل‌های بلوط زاگرس به شدت دچار آن هستند و این اکوسیستم ارزشمند را با خطر نابودی مواجه می‌کنند.

مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه شامل بخش‌هایی از استان‌های اصفهان، یزد، چهارمحال و بختیاری، لرستان، کهگیلویه و بویر احمد و خوزستان می‌باشد و در طول جغرافیایی بین ۴۸ تا ۵۷ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۷ تا ۳۴ درجه شمالی واقع شده است. مساحت منطقه مورد مطالعه بیش از ۳۶۰۳۵۶ کیلومتر مربع است (شکل ۱).

روش تحقیق

هدف از این مطالعه بررسی و تحلیل وضعیت خشک‌سالی در بخش‌هایی از منطقه زاگرس است. بر اساس مدل‌های گردش عمومی جو، شبکه عصبی در ارتباط با شاخص‌های سنجش دوری NDVI، VCI، TCI، VHI، DDI، NDDI، EVI، NDWI و SAVI می‌باشد.

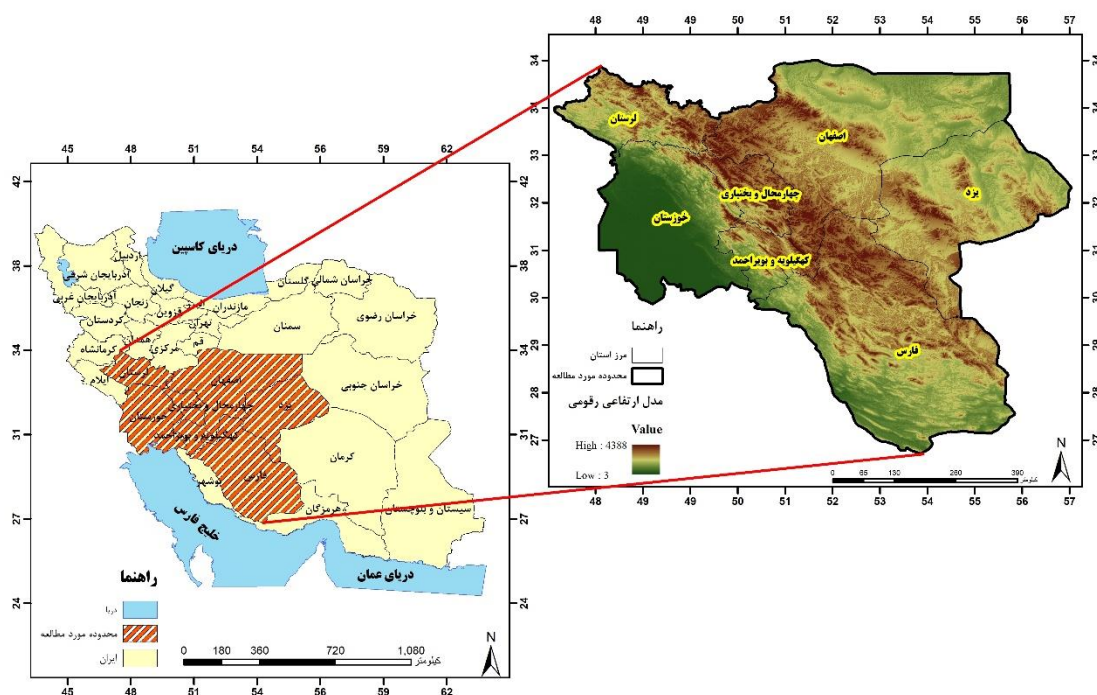
بنابراین در تحقیق پیش رو، به منظور بررسی روند تغییرات خشک‌سالی و پیش‌بینی آن در منطقه مورد مطالعه از تصاویر سری زمانی ماهواره‌ای مودیس در طول دوره زمانی ۲۰ ساله استفاده شد. برای این منظور، ابتدا محصولات MOD021KM سنجنده Terra از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ دریافت شدند. سپس تصحیحات هندسی، رادیومتری و اتمسفری لازم انجام شد. در این راستا برای بررسی خشک‌سالی از شاخص‌های سنجش‌ازدوری استفاده گردید (جدول ۱).

جغرافیایی را شامل شده و ممکن است برای شبیه‌سازی تغییرات بلندمدت آب‌وهوایی و تغییر اقلیم به کار روند (YoosefDoost et al., 2018).

طی دهه‌های اخیر مدل‌های GCM زیادی (بیش ۴۰ مدل) در کشورهای مختلف دنیا (۱۲ کشور) توسعه یافته و این مدل‌ها در قالب پروژه جهانی CMIP با یک چارچوب مشترک مقایسه‌ای برای ارتقاء دانش تغییر اقلیم (اقلیم در گذشته، حال و آینده) و نیز ارتقاء عملکرد مدل‌های اقلیمی در گونه‌های مختلف به صورت گام‌به‌گام ارائه شده‌اند (Demirel & Moradkhani, 2016). این مدل‌ها بر اساس شرایط اولیه و مرزی، متغیرهای مورد استفاده آب‌وهوا و ساختار متفاوت هستند. از این رو برای استفاده از این مدل‌ها برای پیش‌بینی آب‌وهوای آینده در هر منطقه، ارزیابی نظام‌مند عملکرد مدل‌های مذکور در شبیه‌سازی سری زمانی پارامترهای اقلیمی تاریخی مانند دما و بارندگی روزانه، ماهیانه و سالیانه الزامی است (Ahmadian & Muntsari, 2021).

سنجش‌ازدور انعکاسی و حرارتی، در ارزیابی تأثیر خشک‌سالی یکی از کارآمدترین روش‌ها به شمار می‌آید (Jia et al., 2009; Lu et al., 2015). ویژگی تکرارپذیری در سری زمانی، پوشش وسعت بزرگ از سطح زمین، پایین بودن هزینه، سهولت تولید داده‌های قابل‌اعتماد برخی از توانمندی‌های سنجش‌ازدور است که کاربرد آن را کارآمد می‌نماید (Moran et al., 2004). محدوده مرئی و مادون‌قرمز طیف الکترومغناطیس در داده‌های ماهواره‌ای برای شناسایی گیاهان به کار می‌روند و امکان شناخت تغییرات ناشی از خشک‌سالی را در آن‌ها میسر می‌سازند (Farajzadeh, 2005).

ایران، به دلیل موقعیت جغرافیایی ویژه‌ای که دارد، نسبت به جریان‌های عمومی جو، در کمربند خشک جهان واقع شده است. هم‌جواری با جریان‌های پرفشار جنب‌حاره‌ای بیشتر قسمت‌های این سرزمین را به اقلیمی خشک و نیمه‌خشک بدل کرده است. گوناگونی



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Figure 1. Study area

به صورت مقادیر مثبت و منفی بیان می‌شود (Mosaeadi & Qobaei Souq, 2011). مفهوم SPI یک مقادیر Z ، یا تعدادی از اعداد استاندارد بالا یا پایین را نسبت به وقوع ۵۰ درصد (نرمال) ارائه می‌دهد (Mckee et al., 1993; Mckee et al., 1995). و چون بارش دارای چولگی است بهترین روش این است که پارامتر گاما با توجه به توضیحات بالا و با توجه به معادلات ارائه‌شده، برآورد شود (Alley et al., 1984).

بهترین روش این است که بارندگی شبکه‌ها با توزیع‌های مختلف برازش داده شود و بهترین توزیع انتخاب و پس از انتخاب توزیع مناسب، پارامترهای موردنیاز مانند توزیع گاما اعمال گردد (Lloyd-Hughes & Saunders, 2002).

برای برآورد خشک‌سالی‌ها از روش مدل‌های گردش عمومی جو، شبکه عصبی و شاخص‌های سنجش‌ازدوری استفاده شده است. از آنجایی که وضعیت خشک‌سالی‌ها نمایی از توزیع زمانی بارش در یک منطقه است، ابتدا میزان بارش به کمک مدل آماری - دینامیکی MP5 تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 طی دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۹ و شبکه عصبی و شاخص‌های سنجش‌ازدوری برآورد شده است. در ادامه شاخص خشک‌سالی (SPI) بر اساس هر سه روش برآورد شده است. برای محاسبه شاخص SPI از تابع چگالی توزیع گاما و گاهی از تابع پیرسون برای برازش داده‌های بلندمدت بارش استفاده می‌شود، که پس از انجام محاسبات لازم و تعیین پارامترهای مربوطه شاخص SPI

جدول ۱- شاخص‌های پوشش گیاهی مورد استفاده

Table 1. Vegetation indices

نام شاخص Index Name	علامت اختصاری Abbreviation	ارائه‌دهنده Provider	سال ارائه Year of Presentation	فرمول محاسبه Calculation Formula
شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی Normalized difference vegetation index	NDVI	Rouse	1973	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
شاخص پوشش گیاهی بارز شده Enhanced vegetation index	EVI	Huete & Justice	1999	$EVI = \frac{B_{NIR} - B_{RED}}{B_{NIR} + C_1 B_{RED} - C_2 B_{Blue} + L} (1 + L)$
شاخص خاک و پوشش گیاهی Soil-Adjusted Vegetation Index	SAVI	Huete	1988	$SAVI = \frac{B_{NIR} - B_{RED}}{B_{NIR} + B_{RED} + L} (1 + L)$
شاخص تفاضل آب و پوشش گیاهی Difference Drought Index	DDI	Gu	2007	$DDI = DVI - DWI$
شاخص نرمال شده اختلاف آب Normalized Difference Water Index	NDWI	Gao and Bo-Cai	1996	$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$
شاخص شرایط دما-پوشش گیاهی Temperature Condition Index	TCI	Kogan	1997	$TCIj = \frac{BTmax - BTj}{BTmax - BTmin} * 100$
شاخص شرایط گیاهی Vegetation Condition Index	VCI	Kogan	1997	$VCI = \frac{(NDVIj - NDVImin)}{(NDVImax - NDVImin)} * 100$
شاخص سلامت پوشش گیاهی Vegetation Health Index	VHI	Kogan	1997	$VHI = \frac{VCI + TCI}{2}$

صنعتی مقایسه شده است. روش‌های مختلفی برای تولید سناریوهای آب‌وهوایی وجود دارد ولی در حال حاضر معتبرترین ابزار برای تولید سناریوهای آب‌وهوایی مدل‌های سه‌بعدی سیاره‌ای جو است که تحت عنوان مدل‌های پیوندی جو-اقیانوس (AOGCM) نام برده می‌شود که با هدف شبیه‌سازی فرایندهای اصلی آب‌وهوای مرتبط با جو، اقیانوس، سطح زمین، یخ‌پهنه و زیست‌کره طراحی می‌گردد (IPCC, 2017).

سناریوی RCP8.5: بدون اتخاذ هیچ‌گونه سیاست کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب‌وهوای کره زمین در خط سیر سناریوی انتشار RCP8.5 پیش خواهد رفت. به طوری که ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌گردد. در این هنگام غلظت

انتخاب سناریوها در مدل‌های پیش‌بینی آب‌وهوایی: در مطالعه تغییرات اقلیم در چند سال گذشته بیشتر محققان بر اساس سناریوهای سری (SRES) که خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای را مشخص می‌کنند استوار بوده است. اما با انتشار گزارش پنجم IPCC که به تدریج از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ منتشر شد از سناریوهای جدید که تحت عنوان سناریوهای RCP (Representative Concentration Pathways) معروف است به عنوان نماینده خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. سناریوهای جدید انتشار دارای چهار خط سیر کلیدی بانام‌های RCP2.6, RCP4.5, RCP6 و RCP8.5 هستند که بر اساس میزان واداشت تابشی (Radiative Forcing) وات بر مترمربع (Wm⁻²) تا پایان سال ۲۱۰۰ با مقادیر قبل

$$G_i(d) = \frac{\sum_j w_{ij}(d)x_j}{\sum_j x_j} \quad j \neq i \quad (1)$$

که در آن، $w_{ij}(d)$ متناسب با ماتریس وزن فضایی یک یا صفر خواهد بود. عبارت یادشده در صورتی یک خواهد بود که نقطه موردنظر در داخل فاصله (d) که برای نقطه i در نظر گرفته شده است، باشد. در غیر این صورت، اگر در خارج از شعاع دایره مورد نظر باشد، وزن صفر به آن تعلق خواهد گرفت. در نمایه G ارتباط هر نقطه با خودش نیز صفر در نظر گرفته شده است. حاصل جمع وزن‌ها به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$W_i = \sum_{j \neq i} w_{ij}(d) \quad (2)$$

عملگر شمارنده سیگما در رابطه (۱) حاصل جمع همه x_j هایی است که در شعاع فاصله d از نقطه i هستند. یادآوری می‌شود که خود x_i در نظر گرفته نمی‌شود. در مخرج کسر حاصل جمع همه x_j ها بدون در نظر گرفتن خود x_i است. میانگین و پراش برای نقطه i نیز به کمک روابط زیر به دست می‌آید.

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_j x_j}{(n-1)} \quad (3)$$

$$s^2(i) = \frac{\sum_j x_j^2}{(n-1)} - [\bar{x}(i)]^2 \quad (4)$$

و پراش G_i به کمک رابطه زیر به دست می‌آید.

$$Var(G_i) = \frac{W_i(n-1-W_i)}{(n-1)^2(n-2)} \left[\frac{s(i)}{\bar{x}(i)} \right]^2 \quad (5)$$

مقادیر G و G^* از طریق این عمل آماری $W_i/(n-1)$ و محاسبه ریشه دوم پراش آن استاندارد می‌شود.

$$G_i(d) = \frac{\sum_j w_{ij}(d)x_j - W_i \bar{x}(i)}{s(i) \left\{ \left[\frac{(n-1)S_{1i}}{n-2} - W_i^2 \right] / (n-2) \right\}^{\frac{1}{2}}}, \quad j \neq i \quad (6)$$

دی‌اکسید کربن به ۱۰۰۰ ppm رسیده و روند افزایش خواهد بود. این سناریو توسط گروه مدل‌سازی MESSAGE و مؤسسه IIASA به سرپرستی پروفیسور کیوان ریاحی در مؤسسه بین‌المللی آنالیز سیستم‌های کاربردی IIASA اتریش توسعه و طراحی شد که وجه مشخصه آن روند افزایش گازهای گلخانه‌ای است (IPCC, 2017).

سناریوی RCP4.5: سناریوی RCP4.5 توسط گروه مدل‌سازی MiniCAM طراحی شده است و در آن واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند (IPCC, 2017). سناریوی انتشار RCP2.6: این سناریو توسط گروه مدل‌سازی IMAGE از مؤسسه ارزیابی‌های محیطی هلند طراحی شده است. این سناریو دربرگیرنده کمترین نرخ افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشت تابشی ناشی از آن است. مطابق این سناریو واداشت تابشی در اواسط این قرن به حدود ۳/۱ رسیده و بعد کاهش یافته و به ۲/۲ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد. برای رسیدن به این سطح واداشت تابشی بایستی گازهای گلخانه‌ای به میزان قابل توجهی کاهش یابد (IPCC, 2017).

در ادامه، به کمک الگوی خودهمبستگی فضایی الگوی مکانی هریک از شاخص‌های سنجش‌ازدوری با شاخص SPI به کمک G^* موردبررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نمایه یادشده میزان همبستگی را که ناشی از تمرکز نقاط موزون (یا پهنه‌ای که به‌وسیله نقاط موزون باشد) و همه نقاط موزونی که در داخل شعاع فاصله d از نقطه موزون مبدأ باشد، اندازه‌گیری می‌کند. آماره $GI(d)$ بر پایه‌ی رابطه زیر محاسبه می‌شود (Ord & Getis, 1995).

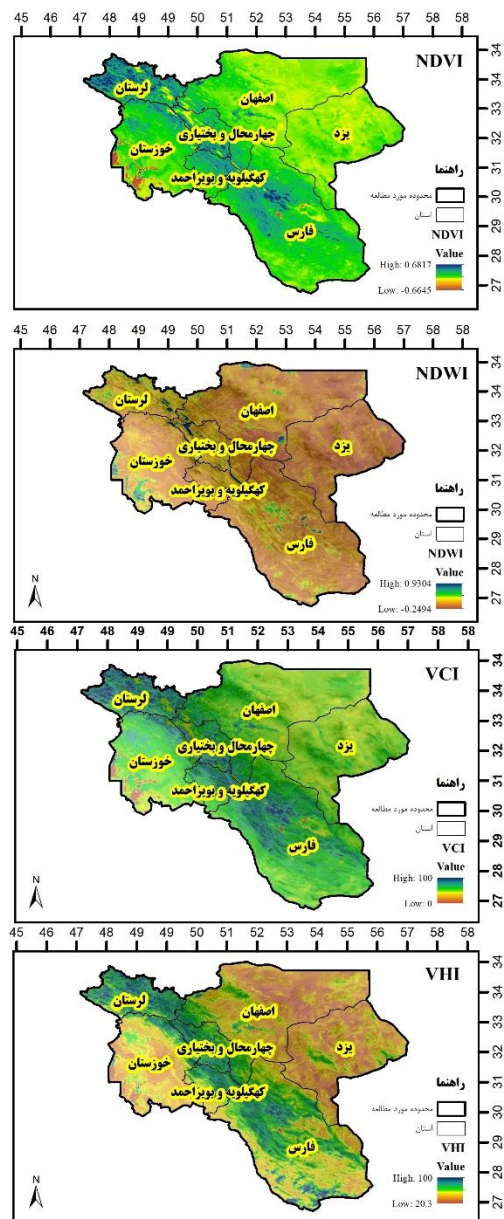
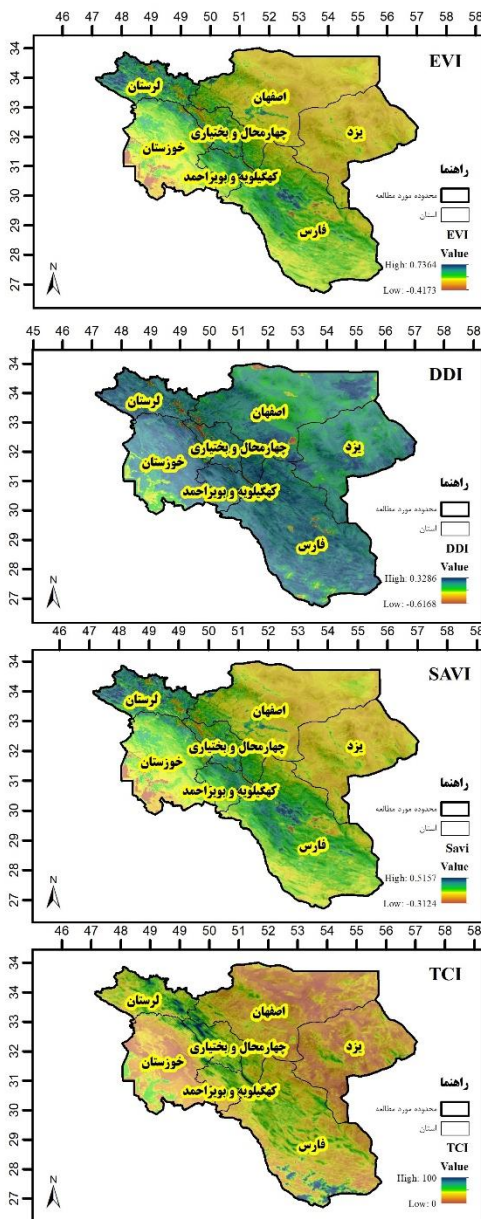
خواهد آمد.

اگر ما وزن خود نقطه i را نیز در نظر بگیریم ($w_{ii} \neq 0$), آماره استاندارد شده G^* به کمک رابطه زیر به دست

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_j w_{ij}(d)x_j - W_i^* \bar{x}}{s(i)\{[(nS_{1i}^*) - W_i^{*2}]/(n - 2)\}^{\frac{1}{2}}}, j = i \quad (7)$$

میانگین و پراش نمونه را نشان می‌دهند. مقادیر استاندارد شده G یا G^* بر پایه جدول نمره Z تفسیر می‌شوند.

در رابطه‌های ۶ و ۷، $S_{1i}^* = \sum_j w_{ij}^2$, $W_i^* = W_i + w_{ii}$ ، که در آن $\sum_j w_{ij}^2 = S_{1i}^*$ و $\sum_j w_{ij} = W_i$ به ترتیب



شکل ۲- محاسبه شاخص‌های مورد استفاده، اردیبهشت ۲۰۱۹

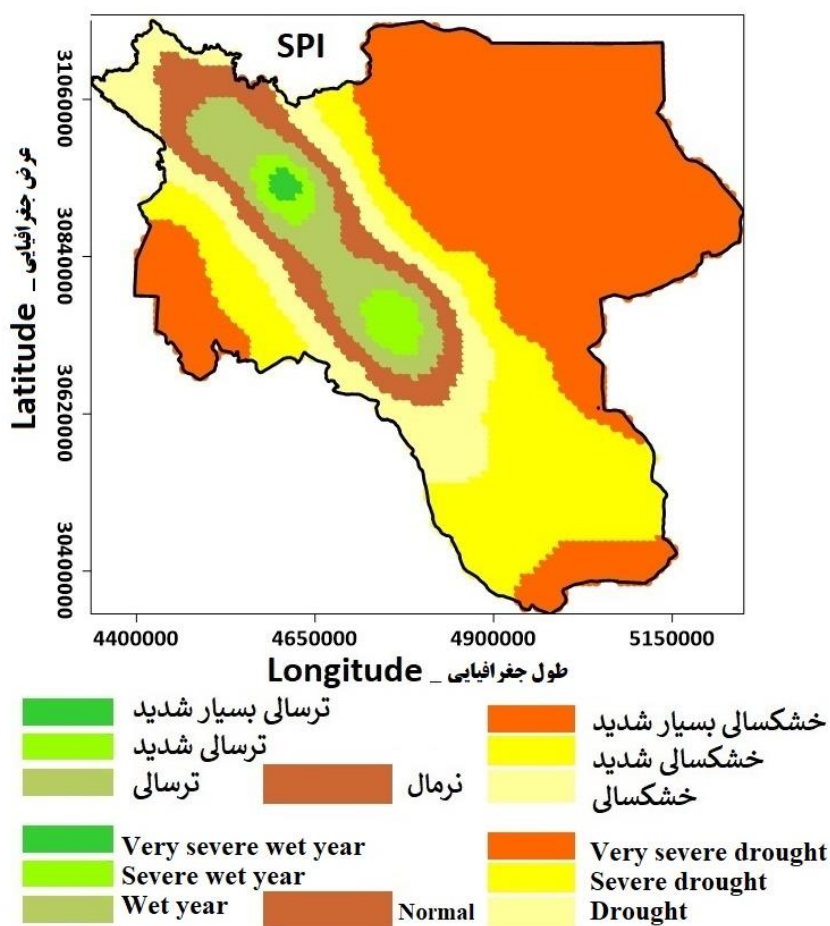
Figure 2. Vegetation indices in May 2019

نتایج

نتایج حاصل از آماده‌سازی پایگاه داده مکانی و سری زمانی ماهانه هر یک از شاخص‌ها در طی ۲۰ سال گذشته حکایت از میزان و روند گستره خشک‌سالی در منطقه مورد مطالعه دارد. شکل ۲ نتایج استفاده از شاخص‌های مذکور را فقط در تاریخ "می" سال ۲۰۱۹ (اردیبهشت ۱۳۹۸) نمایش می‌دهد.

توزیع مکانی وضعیت خشک‌سالی منطقه مورد مطالعه برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ بر اساس شاخص SPI، بیانگر آن است که طی بازه زمانی ۲۰ ساله، قسمت‌های شمال‌شرقی، جنوب‌شرق و جنوب‌غرب محدوده با پهنه وسیعی از خشک‌سالی با طبقه بسیار شدید مواجه بوده‌اند.

در نواحی مرتفع زاگرس، ترسالی بسیار شدید حاکم بوده است. نواحی مذکور به صورت ۲ هسته جدا از هم در جهت شمال‌غربی - جنوب‌شرقی (قلل مرتفع زاگرس) دیده می‌شوند. هسته شمالی‌تر، ترسالی بسیار شدید و هسته جنوبی‌تر، ترسالی شدید داشته‌اند. در اطراف این هسته‌ها یک منطقه به صورت پیوسته با مساحت بیشتر و با جهت شمال‌غرب - جنوب‌شرق در راستای ناهمواری‌های زاگرس طی دوره آماری مورد مطالعه ترسالی داشته است. در نواحی جنوب‌شرق به صورت وسیع و اطراف ناحیه‌ی ترسالی در جهت شمال‌غرب - جنوب‌شرق به صورت ۲ نوار باریک خشک‌سالی شدید نمایان است (شکل ۳).



شکل ۳- وضعیت خشک‌سالی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ (بر اساس شاخص SPI)

Figure 3. Drought situation from 2000 to 2019 (based on SPI index)

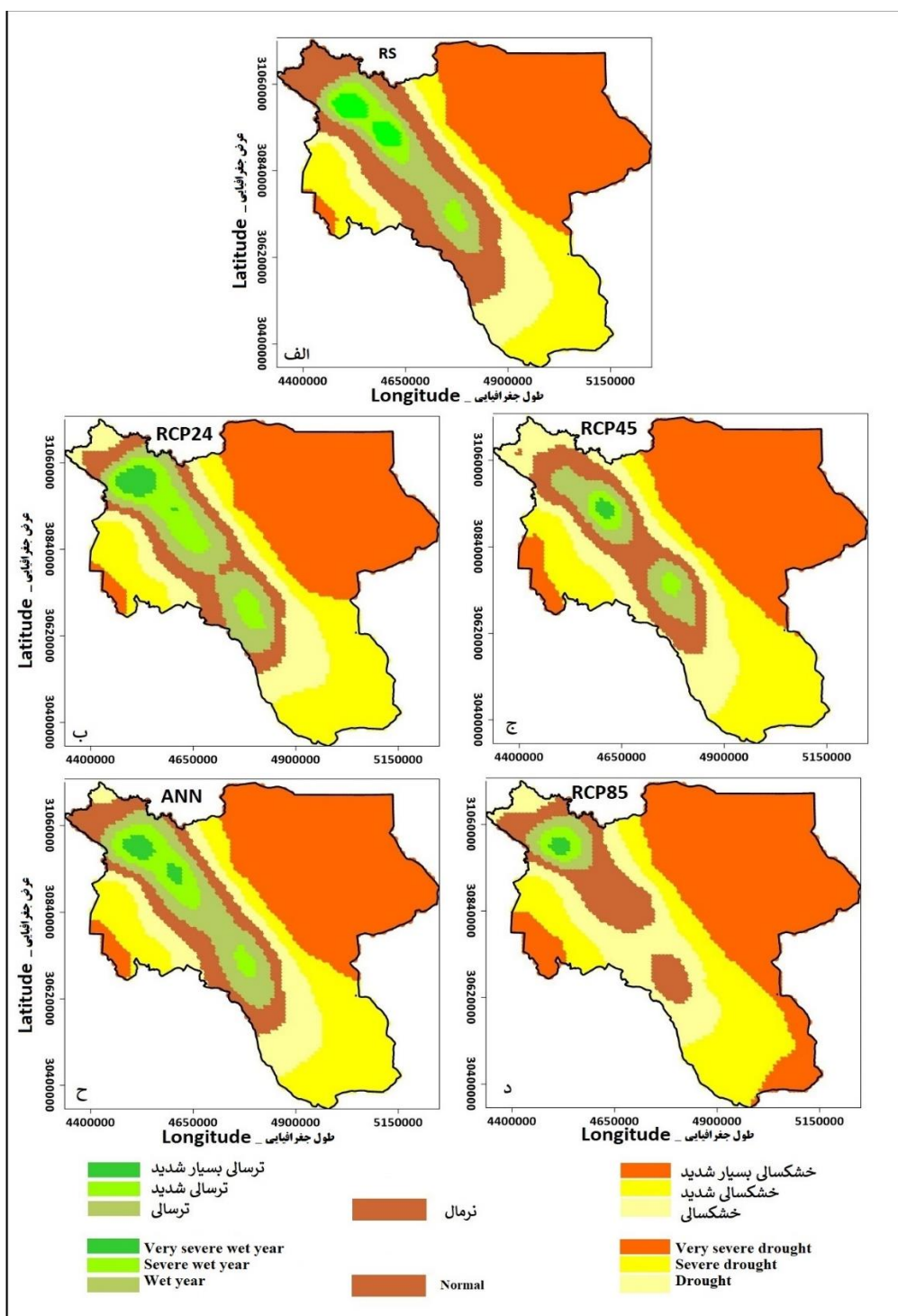
است. بر اساس این سناریو نواحی با خشک‌سالی بسیار شدید نسبت به وضعیت موجود کاهش مساحت داشته است. این کاهش مساحت در خوزستان و نیز جنوب شرق منطقه کاملاً مشهود است. در شمال شرقی منطقه نیز کاهش سطح ناحیه خشک‌سالی بسیار شدید دیده می‌شود. البته سطح ناحیه خشک‌سالی شدید نیز قدری کاهش داشته است (جدول ۲). بر اساس سناریوی RCP 4.5 نیز نواحی ترسالی بسیار شدید و ترسالی شدید و ترسالی بر ناهمواری‌های زاگرس منطبق هستند. با این تفاوت که بر اساس این سناریو سطح نواحی مذکور نسبت به سناریوی RCP 2.4 کمتر است. نکته قابل توجه دیگر انفعال بین ۲ هسته ترسالی است که بر اساس این سناریوی رخ می‌دهد و نواحی ترسالی را به ۲ هسته‌ی جدا از هم تقسیم می‌کند. ترسالی بسیار شدید در هسته شمالی‌تر خواهد بود. اطراف این ۲ هسته ترسالی شدید را ناحیه وضعیت نرمال به صورت پیوسته احاطه کرده است. موقعیت نواحی ترسالی بسیار شدید و شدید تقریباً مشابه وضعیت موجود می‌باشد. با اندکی دقت می‌توان دریافت که شباهت بسیار زیادی میان نقشه حاصل از این سناریو و نقشه وضعیت موجود وجود دارد. تنها تفاوت موجود در جنوب شرق منطقه می‌باشد که در وضعیت موجود دچار خشک‌سالی بسیار شدید بوده و در این سناریو خشک‌سالی شدید را تجربه می‌کند. شمال شرق و جنوب غربی منطقه مورد مطالعه بر اساس این سناریو نیز درگیر خشک‌سالی بسیار شدید هستند. مساحت نواحی مختلف در این سناریو متفاوت از وضعیت موجود است. برای نمونه، نواحی خشک‌سالی بسیار شدید و ترسالی بسیار شدید سطح کمتری نسبت به وضعیت موجود دارند (جدول ۲). جنوب شرق منطقه مورد مطالعه و در اطراف ناحیه‌ی با وضعیت نرمال را نیز نواحی خشک‌سالی شدید و خشک‌سالی فراگرفته‌اند.

خشک‌سالی بسیار شدید ۴۵/۳ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد. ترسالی بسیار شدید نیز کمترین مساحت (۰/۷ درصد) از منطقه را داشته است (جدول ۲).

شکل ۴ وضعیت خشک‌سالی ۲۰ سال آینده (۲۰۲۰ تا ۲۰۳۹) را بر اساس سناریوهای RCP و نیز روش‌های سنجش‌ازدور و شبکه عصبی نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد نواحی ترسالی بسیار شدید و ترسالی شدید منطبق بر ارتفاعات زاگرس هستند. نواحی مذکور در مسیر توده‌های مرطوب آب‌وهوایی (بادهای غربی) قرار دارند و به دلیل جهت ناهمواری‌های زاگرس و نقش آن به صورت ایجاد مانع در برابر مسیر توده‌های مرطوب و ریزش رطوبت جوی از بارش مطلوبی برخوردار هستند. مطالعه علیجانی (۲۰۰۸) نیز در رابطه با تأثیر زاگرس بر بارش نشان می‌دهد که بیشینه بارش در فصل سرد در دامنه غربی زاگرس، نسبتاً پایین‌تر از قله واقع شده است.

در این پژوهش به منظور بررسی و تحلیل دقیق‌تر، وضعیت خشک‌سالی‌های ۲۰ سال آینده (۲۰۲۰ تا ۲۰۳۹) بر اساس سناریوهای RCP 2.4، RCP 4.5 و RCP 8.5 پیش‌بینی شده است (شکل ۴). سناریوی RCP 2.4 خوش‌بینانه‌ترین و RCP 8.5 بدبینانه‌ترین سناریو در میان سناریوهای RCP هستند.

بر اساس سناریوی RCP 2.4 وضعیت خشک‌سالی همانند وضعیت موجود می‌باشد و نواحی با ترسالی بسیار شدید و ترسالی شدید و ترسالی منطبق بر ناهمواری‌های زاگرس است. البته سطح نواحی ترسالی بسیار شدید و ترسالی شدید بر اساس سناریوی RCP 2.4 طی ۲۰ سال آینده قدری بیشتر از وضعیت موجود خواهد بود. منطقه‌ی با ترسالی بسیار شدید بر اساس این سناریو نسبت به وضعیت موجود تغییر محل داشته و به ناحیه شمال غربی منطقه جابجا شده و نیز سطح بزرگ‌تری را اشغال کرده



شکل ۴- پیش‌بینی شاخص خشک‌سالی بر اساس مدل‌های گردش عمومی جو و شبکه عصبی به کمک شاخص‌های سنجش‌ازدور
 Figure 4. Prediction of drought index based on atmospheric general circulation models and neural network by using of remote sensing indices

جدول ۲- مساحت وضعیت‌های خشک‌سالی و ترسالی بر اساس روش‌های مختلف

Table 2. Area of drought and wet year conditions based on different methods

وضعیت Condition	RS	SPI	ANN	RCP24	RCP45	RCP85
خشک‌سالی بسیار شدید severe drought Very	36.3	45.3	38.2	37.1	40.3	45.2
خشک‌سالی شدید Severe drought	20.1	22.8	22.6	23.1	24.3	23.5
خشک‌سالی Drought	12.8	12.5	12.4	13.2	15.9	15.9
وضعیت نرمال Normal state	18.2	8.9	11.3	10.1	11.6	11.5
ترسالی Wet year	7.5	7.3	9.8	9.4	6.01	2.3
ترسالی شدید Severe wet year	3.8	2.5	4.5	5.5	1.5	1.2
ترسالی بسیار شدید Very severe wet year	1.3	0.7	1.2	1.4	0.4	0.4

پیش‌بینی خشک‌سالی‌های ناحیه زاگرس بر اساس روش‌های سنجش‌ازدور (RS) در (شکل ۴- الف) دیده می‌شود. مانند وضعیت موجود، بر اساس این دسته از روش‌ها نیز نواحی ترسالی منطبق بر نواحی مرتفع زاگرس هستند. برخلاف وضعیت موجود نواحی ترسالی بسیار شدید به صورت ۲ هسته در شمال غربی محدوده مورد مطالعه و ناحیه ترسالی شدید به صورت ۲ هسته جدا در میانی و نیز شمال‌غربی آن دیده می‌شود. شمال‌شرق و جنوب‌غرب (به صورت محدود) منطقه مورد مطالعه درگیر خشک‌سالی بسیار شدید خواهند بود. در جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی نیز خشک‌سالی شدید حاکم است. ناحیه نرمال بر اساس این روش مساحت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. نکته قابل توجه در این روش کاهش مساحت نواحی خشک‌سالی بسیار شدید و خشک‌سالی شدید نسبت به وضعیت موجود است. به طوری که در خوزستان سطح ناحیه خشک‌سالی بسیار شدید بسیار محدود شده و در جنوب‌شرق منطقه نیز با وضعیت خشک‌سالی شدید جایگزین شده است. برخلاف نواحی خشک‌سالی، قسمت‌های ترسالی نسبت به وضعیت

بر اساس سناریوی RCP 8.5 ناحیه خشک‌سالی بسیار شدید نسبت به سناریوهای قبلی پیش روی فزاینده‌ای داشته و علاوه بر افزایش مساحت در شمال‌شرق و جنوب‌غرب به جنوب‌شرق نیز گسترش پیدا کرده است. علاوه بر افزایش سطح خشک‌سالی بسیار شدید، کاهش سطح نواحی ترسالی نسبت به وضعیت موجود نیز به چشم می‌خورد. این کاهش مساحت به گونه‌ای است که نواحی ترسالی به یک هسته در شمال‌غربی منطقه مورد مطالعه محدود شده‌اند. این کاهش مساحت در ناحیه ترسالی چشمگیرتر بوده است. البته در مقایسه با وضعیت نرمال می‌توان گفت که سطح ناحیه خشک‌سالی بسیار شدید بر اساس این سناریو مشابه وضعیت نرمال می‌باشد. سطح نواحی ترسالی نسبت به وضعیت موجود کاهش خواهد داشت. بر اساس این سناریو ناحیه وضعیت نرمال تبدیل به ۲ بخش جدا از هم شده است که ناحیه خشک‌سالی میان آن‌ها قرار گرفته است. نواحی خشک‌سالی شدید و خشک‌سالی نسبت به سناریوهای قبلی جابجایی مکانی داشته‌اند. به عبارت دیگر، این نواحی به سمت نواحی ترسالی پیش روی خواهند کرد.

نرمال افزایش مساحت را تجربه می‌کنند (جدول ۲).

بر اساس روش شبکه عصبی (شکل ۴-ح) همانند سایر روش‌ها نواحی ترسالی منطبق بر ارتفاعات زاگرس هستند. مانند روش RS دو هسته ترسالی بسیار شدید در قسمت شمال‌غربی از این منطقه زاگرس دیده می‌شود که اطراف آن را ترسالی شدید احاطه کرده است. در قسمت‌های میانی آن نیز هسته‌های کوچکی با وضعیت ترسالی شدید دیده می‌شود. وضعیت ترسالی به صورت پیوسته در اطراف هسته‌های مذکور دیده می‌شود. خشک‌سالی بسیار شدید در شمال‌شرق و جنوب‌غرب (به صورت محدود) به چشم می‌خورد. جنوب‌شرقی منطقه نیز درگیر خشک‌سالی شدید خواهد بود. محل قرارگیری نواحی خشک‌سالی و ترسالی بر اساس این روش مشابه وضعیت موجود می‌باشد. برخلاف وضعیت موجود، در این روش ناحیه ترسالی بسیار شدید ۲ هسته‌ی جدا دارد. در خوزستان سطح ناحیه خشک‌سالی بسیار شدید نسبت به وضعیت موجود کوچک‌تر است. در جنوب‌شرق نیز خشک‌سالی بسیار شدید دیده نمی‌شود. در این روش نیز نواحی خشک‌سالی نسبت به وضعیت موجود کاهش مساحت و نواحی ترسالی نسبت به وضعیت موجود افزایش مساحت را تجربه می‌کنند (جدول ۲).

بررسی الگوی فضایی شاخص خشک‌سالی با شاخص‌های سنجش‌ازدور

شکل ۵ نقشه‌های الگوی فضایی خشک‌سالی با شاخص‌های سنجش‌ازدور DDI، EVI، NDVI و NDWI را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود نواحی آبی‌رنگ الگوی خودهمبستگی فضایی منفی و نواحی قرمز رنگ الگوی خودهمبستگی فضایی مثبت است. نواحی بدون رنگ نیز قسمت‌های فاقد الگو هستند. هر ۴ شاخص الگوی فضایی پراکنده دارند. بدین‌صورت که الگوی مثبت و منفی در تمامی قسمت‌های منطقه مورد مطالعه به صورت لکه‌های جدا پراکنده بوده و فاقد الگوی منظم هستند.

خودهمبستگی فضایی مثبت به این معناست که پدیده مورد مطالعه با پدیده‌های مشابه خود محاصره شده است و

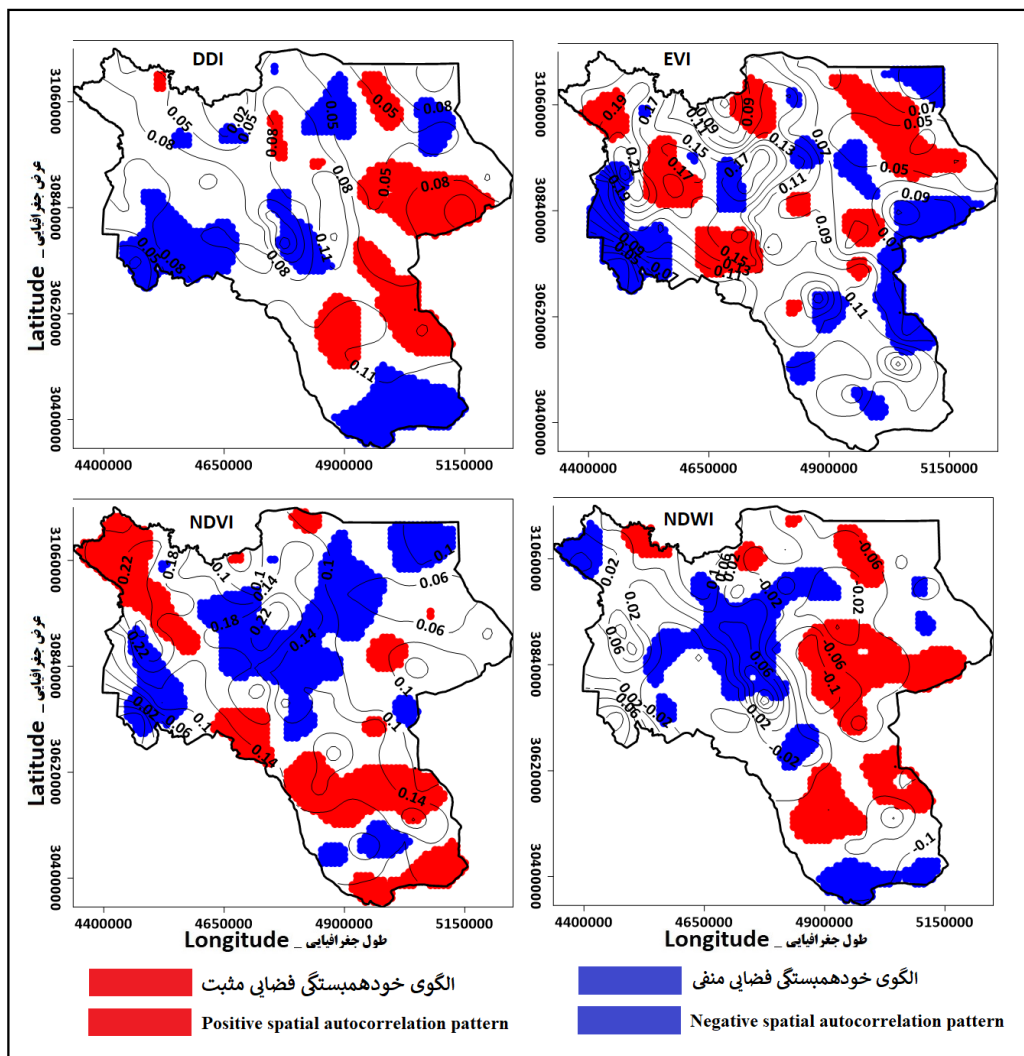
خودهمبستگی فضایی منفی به این معناست که پدیده موردنظر با پدیده‌هایی محاصره‌شده که هیچ تشابهی با پدیده مورد نظر ندارد. در شاخص DDI در قسمت‌های شرقی منطقه مورد مطالعه بیشتر الگوی خودهمبستگی مثبت به شکل لکه‌های پراکنده دیده می‌شود. این قسمت از منطقه مورد مطالعه بیشتر درگیر خشک‌سالی بوده و خودهمبستگی فضایی مثبت در این قسمت نشان می‌دهد که نواحی مورد نظر همگی درگیر خشک‌سالی بوده‌اند. در قسمت‌های جنوب‌شرقی، جنوب غربی و مرکز منطقه به صورت هسته‌های جدا از هم خودهمبستگی فضایی منفی دیده می‌شود. قسمت‌های مذکور، نواحی‌ای هستند که به تناوب دچار ترسالی و خشک‌سالی بوده و یا نواحی خشک‌سالی و ترسالی در همسایگی یکدیگر بوده‌اند. به همین دلیل همسایه بودن نواحی ترسالی و خشک‌سالی موجب شکل‌گیری خودهمبستگی فضایی منفی در این نواحی شده است. سایر قسمت‌های منطقه فاقد الگوی خودهمبستگی فضایی بوده‌اند. در این شاخص ۱۸/۹ درصد از سطح منطقه الگوی خودهمبستگی فضایی منفی و ۱۵/۷ درصد از سطح منطقه الگوی خودهمبستگی فضایی مثبت داشته است (جدول ۳).

در شاخص EVI نیز نواحی خودهمبستگی فضایی مثبت و منفی، الگویی نامنظم دارند. زیرا نواحی خودهمبستگی فضایی مثبت و منفی به صورت هسته‌های جدا از هم در تمامی منطقه پراکنده شده‌اند. قسمت‌های شرقی، جنوب‌شرق، جنوب‌غرب و بخش‌هایی از مرکز منطقه مورد مطالعه الگوی خودهمبستگی فضایی منفی و نیمه شمالی منطقه به شکل پراکنده و هسته‌های جدا از هم الگوی خودهمبستگی فضایی مثبت داشته‌اند. در این شاخص سطح الگوی خودهمبستگی فضایی منفی نسبت به شاخص DDI کمتر و سطح الگوی خودهمبستگی فضایی مثبت نسبت به شاخص DDI بیشتر بوده است.

در شاخص NDVI (شکل ۵) پراکنش نواحی خودهمبستگی فضایی مثبت و منفی، اندکی منظم‌تر از ۲ شاخص پیشین است. به طوری که هسته‌های خودهمبستگی فضایی منفی به صورت سطوح وسیع‌تری و در جهت شمال‌شرق - جنوب‌غرب ظاهر شده‌اند. البته در بخش

و منفی در عین پراکندگی در تمامی منطقه مورد مطالعه، اندکی منظم شده‌اند. به طوری که الگوی خودهمبستگی فضایی مثبت به صورت هسته‌هایی در شرق منطقه مستقر شده‌اند. البته در شمال منطقه نیز به صورت لکه‌های کوچکی الگوی خودهمبستگی فضایی مثبت به چشم می‌خورد. الگوی خودهمبستگی فضایی منفی به صورت یک سطح بزرگ در مرکز منطقه و نیز به صورت پراکنده در شمال غرب و جنوب شرق منطقه دیده می‌شود. در این شاخص ۱۶/۸ درصد از منطقه الگوی خودهمبستگی فضایی منفی و ۱۸/۱ درصد الگوی خودهمبستگی فضایی مثبت داشته‌اند (جدول ۳).

جنوبی منطقه نیز چند هسته خودهمبستگی فضایی منفی دیده می‌شود. خودهمبستگی فضایی مثبت نیز در جنوب و شمال غرب منطقه مورد مطالعه، سطح وسیع‌تری را پوشش می‌دهند. در این شاخص الگوی خودهمبستگی فضایی منفی ۲۲/۸ درصد و خودهمبستگی فضایی مثبت ۲۰/۵ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه را فراگرفته‌اند که نسبت به شاخص‌های پیشین بیشتر بوده (جدول ۳) و نشان می‌دهد که این شاخص نسبت به ۲ شاخص قبلی می‌تواند الگوی مناسب‌تری از خشک‌سالی‌ها را ارائه دهد. در شاخص NDWI الگوهای خودهمبستگی فضایی مثبت

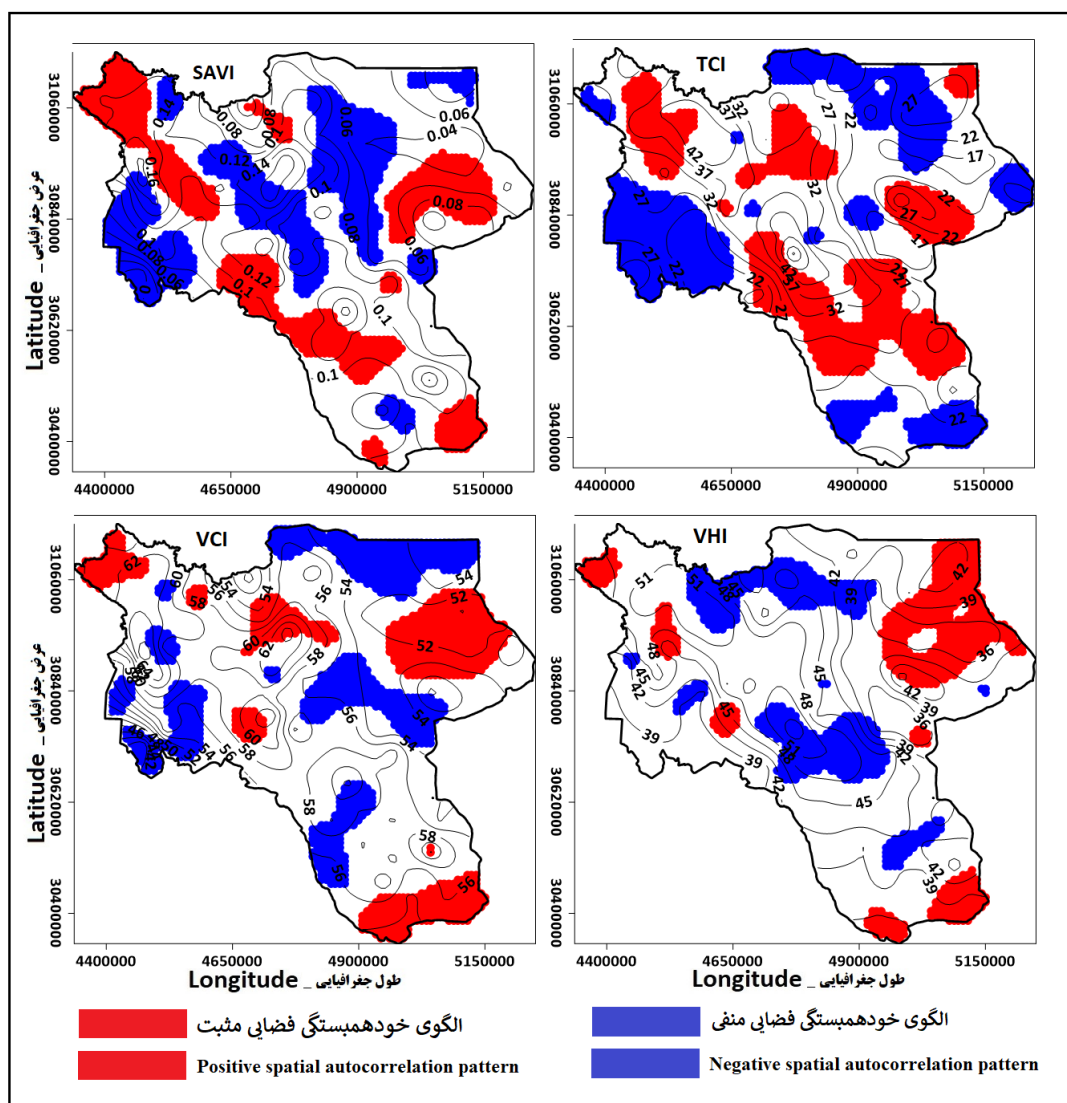


شکل ۵- الگوی فضایی شاخص خشک‌سالی با شاخص‌های سنجش از دور

Figure 5. Spatial pattern of drought index with remote sensing indices

فارس (زاگرس چین‌خورده) کشیده شده است که نشان‌دهنده همسایگی نواحی همگون در این امتداد می‌باشد. همچنین یک هسته نسبتاً بزرگ خودهمبستگی فضایی مثبت در شمال‌شرق منطقه دیده می‌شود. نواحی با الگوی خودهمبستگی فضایی منفی نیز به صورت هسته‌های با سطح بزرگ از خوزستان و در جهت جنوب‌غرب - شمال‌شرق واقع شده‌اند. در این شاخص ۲۲/۶ درصد از سطح منطقه الگوی خودهمبستگی فضایی منفی و ۲۰/۶ درصد الگوی خودهمبستگی فضایی مثبت داشته‌اند که از جمله مساحت‌های بیشینه در میان شاخص‌های سنجش‌ازدور محسوب می‌شود (جدول ۳).

شکل ۶ نقشه‌های الگوی فضایی خشک‌سالی با شاخص‌های سنجش‌ازدور SAVI, TCI, VCI و VHI را نشان می‌دهد. همانند ۴ شاخص پیشین در این شاخص‌ها نیز پراکندگی و بی‌نظمی حاکم است. در شاخص SAVI در عین پراکندگی الگوهای خودهمبستگی فضایی مثبت و منفی، هسته‌های دارای الگوی مثبت و منفی مساحت‌های بزرگی دارند و هسته‌های با سطح کوچک فراوانی کمتری دارند. نکته قابل توجه در این شاخص، جهت پراکنش الگوهای خودهمبستگی فضایی مثبت و منفی است. الگوی مثبت از شمال‌غرب منطقه در جهت ناهمواری‌های زاگرس تا استان



شکل ۶- الگوی فضایی شاخص خشک‌سالی با شاخص‌های سنجش‌ازدور
Figure 6. Spatial pattern of drought index with remote sensing indices

هستند. در هر ۲ شاخص هسته‌های الگوی خودهمبستگی فضایی مثبت و منفی به صورت مساحت‌های کوچک و بزرگ در تمامی منطقه پراکنده شده‌اند. در نیمه غربی منطقه مساحت هسته‌های خودهمبستگی فضایی مثبت و منفی کوچک‌تر و در شرق منطقه بزرگ‌تر است. علاوه بر نامنظم بودن پراکنش الگوهای خودهمبستگی فضایی مثبت و منفی در هر ۲ شاخص، مساحت قسمت‌های دارای الگوی خودهمبستگی فضایی مثبت و منفی نسبت به شاخص TCI کوچک‌تر بوده است (جدول ۳) که نشان‌دهنده عدم توانایی این ۲ شاخص در به تصویر کشیدن رفتار خشک‌سالی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

در شاخص TCI پراکنش الگوهای خودهمبستگی فضایی مثبت و منفی نسبت به SAVI متفاوت است. از شمال‌غرب تا بخشی از جنوب‌شرق منطقه مورد مطالعه، الگوهای خودهمبستگی فضایی مثبت به صورت پراکنده در شکل ۳ دیده می‌شوند. در مرکز منطقه نیز چند هسته کوچک با الگوی خودهمبستگی فضایی منفی به چشم می‌خورد. این شاخص بیشترین مساحت نواحی دارای الگوی خودهمبستگی فضایی مثبت و منفی را در میان تمام شاخص‌ها دارد. به طوری که الگوی خودهمبستگی فضایی منفی ۲۴/۲ و الگوی خودهمبستگی فضایی مثبت ۲۳/۱ درصد از سطح منطقه را پوشش می‌دهند (جدول ۳). شاخص‌های VCI و VHI نیز هر ۲ فاقد الگوی منظم

جدول ۳- مساحت الگوی خودهمبستگی مثبت و منفی بر اساس شاخص‌های مختلف سنجش‌ازدور

Table 3. Area of positive and negative spatial autocorrelation pattern based on different remote sensing indicators

	DDI	EVI	NDVI	NDWI	SAVI	TCI	VCI	VHI
الگوی خودهمبستگی فضایی منفی Negative spatial autocorrelation pattern	18.9	18.1	22.8	16.8	22.6	24.2	19.4	13.6
الگوی خودهمبستگی فضایی مثبت Positive spatial autocorrelation pattern	15.7	16.3	20.5	18.1	20.6	23.1	16.6	14.3

بحث

در منطقه شرق و شمال‌شرق تغییرات بارش نوسانی و کاهش-نوسانی و تغییرات دما افزایشی-نوسانی است. در منطقه سواحل شمالی، تغییرات بارش کاهش و افزایشی-نوسانی و دما افزایشی و افزایشی-نوسانی و منطقه جنوب البرز و مرکز ایران نیز دارای تغییرات کاهش، نوسانی، افزایشی-نوسانی بارش، و تغییرات افزایشی دما خواهند بود (Karimi et al., 2018).

وضعیت خشک‌سالی‌های رخ داده در محدوده مورد مطالعه به صورت ۲ دوره ۲۰ ساله بر اساس روش SPI برای ۲۰ سال وضعیت موجود (۲۰۱۹ - ۲۰۰۰) و بر اساس سناریوهای RCP و روش‌های سنجش‌ازدور و شبکه‌های

بررسی تغییرات متغیرهایی که در تعدیل خسارت یا سازگاری با پدیده تغییر اقلیم مؤثر هستند از اهمیت خاصی برخوردار است. با توجه به تفاوت‌های اقلیمی جغرافیایی سرزمین ایران، مشخص شده است که در منطبق شمال‌غرب تغییرات بارش کاهش، کاهش-نوسانی، و کاهش-انتقالی و دما افزایشی و در منطقه غرب و جنوب‌غرب تغییرات بارش کاهش، کاهش-نوسانی، و افزایشی و تغییرات دما افزایشی پیش‌بینی شده است. منطقه جنوب و جنوب‌شرق دارای تغییرات کاهش، کاهش-نوسانی، نوسانی، و افزایشی-نوسانی بارش و تغییرات افزایشی دما خواهد بود.

این در حالی است که نتایج پژوهش Pardel و همکاران (۲۰۱۷) که با استفاده از شاخص‌های سنجش‌ازدور اقدام به استخراج پوشش گیاهی مناطق خشک در استان چهارمحال و بختیاری کردند حکایت از ارتباط قوی شاخص‌های گیاهی حاصل از لندست ۸ با تاج پوشش سبز و تولید گیاهی دارد و پوشش گیاهی مناطق خشک با دقت نسبتاً بالایی می‌تواند به‌وسیله شاخص‌های گیاهی مستخرج از این تصاویر برآورد گردد (Pardel et al., 2017).

همچنین بررسی تغییرات پوشش جنگلی زاگرس (جنگل درود در استان لرستان) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای که با استفاده از ۱۶ شاخص پوشش گیاهی زوال بلوط‌های زاگرس متأثر از خشک‌سالی را طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶ مورد مطالعه قرارداد نیز نشان از همبستگی بین شاخص و پارامترهای اقلیمی و بارش داشته است. به‌نحوی که SAVI با بارندگی سالانه، بیش از ۸۰٪ همبستگی نشان داد (Goodarzi et al., 2019).

به دلیل پراکندگی الگوهای مثبت و منفی در تمامی سطح منطقه و فقدان الگوی منظم در شاخص‌ها، این پژوهش بر نظم تقریبی الگوی حاصل تأکید دارد. بدین معنی که این شاخص‌ها به تنهایی نمی‌توانند الگویی دقیق از رفتار خشک‌سالی‌های منطقه ارائه دهند و عوامل دیگری نیز در شناسایی و تبیین این رفتار دخیل بوده و برای به دست آوردن الگوی منظم باید تمامی (یا بخش بزرگی از) عوامل مؤثر در وقوع خشک‌سالی مورد بررسی قرار گرفته و در تحلیل فضایی دخالت داده شوند.

منابع مورد استفاده

- Ahmadian, M., Mantsari, M., 2021. Evaluation of general circulation models and their ranking for hydrological simulation. Science of water and soil. Science of Agriculture, 31(4): 69-84. Available: <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=595105> (In Persian).
- Alijani, B., 2008. Effect of the Zagros mountains on the spatial distribution of precipitation. Journal of Mountain Science, 5(3): 218-231.
- Alirezaee, Z., Gandomkar, A., Khodagholi, M. and Abasi, A.R., 2019. Spatiotemporal dynamics of oak

عصبی برای ۲۰ سال آینده (۲۰۳۹ - ۲۰۲۰) بررسی شد. به‌طورکلی می‌توان گفت که چه در دوره ۲۰۱۹ - ۲۰۰۰ و چه در دوره ۲۰ سال آینده نواحی مرتفع زاگرس، ترسالی شدید و بسیار شدید داشته و خواهند داشت. این مسئله می‌تواند به دلیل نقش ارتفاعات زاگرس در تقابل با توده‌های هوایی مرطوب باشد. زیرا زاگرس به‌عنوان مانعی در مقابل توده‌های هوایی مرطوب عمل کرده و توده‌های هوا را به صعود واداشته و بارش حاصل از این صعود مرطوب را دریافت می‌دارد. از این‌رو این بخش از منطقه مورد مطالعه همواره بارش بیشینه را دریافت می‌کند. بخش شمال شرقی و جنوب غربی منطقه نیز طی هر ۲ دوره وضعیت خشک‌سالی بسیار شدید داشته و خواهند داشت. این موضوع در رابطه با شمال شرقی منطقه می‌تواند به دلیل دوری این قسمت نسبت به مراکز رطوبتی باشد. زیرا توده‌های مرطوب این قسمت از کشور از سمت غرب و شمال غرب وارد شده و به سمت شرق حرکت کرده و در مسیر خود رطوبت را تخلیه می‌کنند. کمترین میزان رطوبت این توده‌های هوا در نواحی شرقی منطقه ریزش می‌کند. از این‌رو این ناحیه همواره با کمبود بارش روبرو است. قسمت جنوب غربی منطقه (خوزستان) با وجود هم‌جواری با منبع رطوبتی خلیج فارس، درگیر خشک‌سالی بسیار شدید است. این مسئله ناشی از دمای بسیار بالای این ناحیه به دلیل عرض جغرافیای پایین می‌باشد. زیرا دمای بالا، گنجایش رطوبتی جو را بالا برده و محیط را مستعد وقوع تبخیر و تعرق می‌کند. همین مسئله موجب بالاتر بودن میزان تبخیر و تعرق نسبت به بارش دریافتی در منطقه شده و زمینه وقوع خشک‌سالی بسیار شدید را فراهم می‌کند.

الگوی فضایی خشک‌سالی بر اساس شاخص‌های سنجش‌ازدور (۸ شاخص) نیز برای منطقه مورد مطالعه بررسی شد. به‌طورکلی می‌توان گفت که تحلیل فضایی خشک‌سالی‌ها و شاخص‌های سنجش‌ازدور الگوی نامنظمی را در همه شاخص‌ها به تصویر کشیده است. تنها در شاخص‌های NDVI و SAVI تحلیل فضایی خشک‌سالی‌ها توانسته است الگوی نسبتاً منظمی را ارائه کند.

- central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34(6).
- Hamzeshpour, M., Kia-daliri, H. and Bordbar, K., 2011. Preliminary study of manna oak (*Quercus brantii* Lindl.) tree decline in Dashte-Barm of Kazeroon, Fars province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 19(2): 363-352.
- Hejazizadeh, Z. and Javizadeh, S., 2010. Introduction to drought and its indexes. *SAMT*, 376p.
- Hejazi zadeh, A., Fatahi, A., Ghaemi, H., 2003. Drought monitoring using standardized precipitation index, Case study of Chaharmahal Bakhtiari province. *Geography Science*, 23-45 (In Persian).
- Huete, A., Justice, C. and Van Leeuwen, W., 1999. MODIS vegetation index (MOD13). Algorithm Theoretical Basis Document, 213(3): 295-309.
- Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3): 295-309.
- IPCC, 2017. 46th Session of the IPCC – Decisions Adopted by the Panel, 6–10 September 2017, Montreal, Canada.
- Jia, L., Li, J. and Menenti, M., 2009, April. Drought monitoring and prediction by time series analysis of greenness and thermal anomalies at large scale. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 9659).
- Karimi, M. Kaki, S and Rafati, S. 2018. Iran's future climate conditions and risks in climate research. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 5(3): 1-22 (In Persian).
- Kogan, F.N., 1997. Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4): 621-636.
- Lloyd-Hughes, B. and Saunders, M.A., 2002. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 22(13): 1571-1592.
- Lu, J., Jia, L. and Zhou, J., 2015, December. Characterization of 2014 summer drought over Henan province using remotely sensed data. *International Conference on Intelligent Earth Observing and Applications*, 9808: 308-316.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993, January. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22): 179-183.
- McKee, T.B., 1995. Drought monitoring with multiple time scales. *Proceedings of 9th Conference on Applied Climatology*, Boston.
- Moghaddasi, M., Morid, S., Ghaemi, H. and Samani, J.M.V., 2005. Daily drought monitoring, Tehran province. *Iranian Journal of Agricultural Science*, 36(1): 51-62 (In Persian).
- forest of Zagros in response to drought case study: Oak forest of Lorestan. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 17(1): 107-123.
- Alley, W.M., 1984. The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23(7): 1100-1109.
- Atarod, P., Sadeghi, S., Taheri Sarteshnizi, F., Saroyi, S., Abbasian, P., Masihpour, M., Kurdestami, F., Darikondi, A., 2014. Effects of climatic factors and evapotranspiration on deterioration of central Zagros forests in Lorestan province. *Research on Support and Protection of Forests and Pastures of Iran*, 13(2): 97-112. Available: <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=282791>.
- Agnew, C. T., 2000. Using the SPI to Identify Drought. *Drought Network News* (1994-2001). 1. University of Nebraska - Lincoln. 12(1): 6-12. <https://digitalcommons.unl.edu/droughtnetnews/1>
- Baguskas, S.A., Peterson, S.H., Bookhagen, B. and Still, C.J., 2014. Evaluating spatial patterns of drought-induced tree mortality in a coastal California pine forest. *Forest Ecology and Management*, 315: 43-53.
- Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G. and Sutera, A., 2003. Spatial variability of drought: an analysis of the SPI in Sicily. *Water Resources Management*, 17(4): 273-296.
- Chen, Y.N., Zilliacus, H., Li, W.H., Zhang, H.F. and Chen, Y.P., 2006. Ground-water level affects plant species diversity along the lower reaches of the Tarim river, Western China. *Journal of Arid Environments*, 66(2): 231-246.
- Demirel, M.C. and Moradkhani, H., 2016. Assessing the impact of CMIP5 climate multi-modeling on estimating the precipitation seasonality and timing. *Climatic Change*, 135(2): 357-372.
- Farajzadeh, M., 2005. Drought from concept to solutions. National Geographical Organization Publication, Tehran (In Persian).
- Foster, D.R., Knight, D.H. and Franklin, J.F., 1998. Landscape patterns and legacies resulting from large, infrequent forest disturbances. *Ecosystems*, 1(6): 497-510.
- Gao, B.C., 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3): 257-266.
- Goodarzi, M., Pourhashemi, M. and Azizi, Z., 2019. Investigation on Zagros forests cover changes under the recent droughts using satellite imagery. *Journal of Forest Science*, 65(1): 9-17.
- Gu, Y., Brown, J.F., Verdin, J.P. and Wardlow, B., 2007. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the

- of hydrological changes in the water level of Lake Urmia with an approach to different hypothetical plans of global warming in the coming decades. *Quantitative Geomorphology Research*, 1(3): 69-88 (In Persian).
- Stephenson, N.L., 1990. Climatic control of vegetation distribution: the role of the water balance. *The American Naturalist*, 135(5): 649-670.
- Turner, M.G., Baker, W.L., Peterson, C.J. and Peet, R.K., 1998. Factors influencing succession: lessons from large, infrequent natural disturbances. *Ecosystems*, 1(6): 511-523.
- Tsakiris, G. and Vangelis, H., 2004. Towards a drought watch system based on spatial SPI. *Water Resources Management*, 18(1): 1-12.
- Van Lanen, H.A., Wanders, N., Tallaksen, L.M. and Van Loon, A.F., 2013. Hydrological drought across the world: impact of climate and physical catchment structure. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(5): 1715-1732.
- YoosefDoost, A., YoosefDoost, I., Asghari, H. and Sadeghian, M.S., 2018. Comparison of HadCM3, CSIRO Mk3 and GFDL CM2. 1 in prediction the climate change in Taleghan River Basin. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 6(3): 93-100.
- Moran, E., Brondizio, E., Mausel, P. and Lu, D., 2004. Change Detection Techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12): 2365-2407.
- Mosaedi, A. and Ghabaei Sough, M., 2011. Modification of standardized precipitation index (SPI) based on relevant probability distribution function. *Journal of Water and Soil*, 25(5):1206-1216 (In Persian).
- Ord, J.K. and Getis, A., 1995. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical Analysis*, 27(4): 286-306.
- Pardel, F., Ebrahimi, A. and Azizi. Z., 2017. Evaluating of the most suitable vegetation indices of estimating of canopy cover and above-ground phytomass in arid rangelands during different growth periods. *Khokhbom*, 7(2): 57-71 (In Persian with English summary).
- Pourkhosravani, M., Mehrabi, A. and Mousavi, S.H., 2018. Drought spatial analysis of Sirjan basin using remote sensing. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 7(20):13-22.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351(1): 309-317.
- Roshan, G. and Mohammadnejad, V., 2013. Prediction

Investigation and forecasting of the drought situation in the Zagros region based on remote sensing indicators and general circulation models of the 20-year period

S. Mirzapour¹, M. M. Kheirkhah Zarkash^{2*} and Z. Azizi³

- 1- PhD Student, Department of Remote Sensing and GIS, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
- 2- ^{*} Corresponding Author, Associate prof., Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agriculture Research Education and Extension Organization (AREEO), E-mail: kheirkhahzarkesh96@gmail.com
- 3- Assistant prof., Department of Remote Sensing and GIS, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 08.09.2022

Accepted: 08.02.2023

Abstract

Drought in Zagros, which is one of the most important ecosystems in Iran, is a great challenge. Remote sensing has a unique application in diagnosis, monitoring and management of natural resources. The purpose of this study was to investigate and analyze the drought situation in the middle and southern Zagros basin based on atmospheric general circulation models with neural network parametrization in relation to remote sensing indices NDVI, VCI, TCI, VHI, DDI, EVI, NDWI and SAVI. At first the Modis satellite time series images were used in a 20-year period. First the mentioned indicators were produced from MOD021KM products of Terra sensor from 2000 to 2019. Then amount of precipitation was estimated by using of statistical-dynamic model MP5 under RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios and neural network and remote sensing indicators during the period from 2020 to 2039, and then the state of droughts was investigated in 2 periods of 20 years based on the SPI method (2000-2019) and based on RCP scenarios and remote sensing methods and neural networks for the next 20 years (2021-2039). The results showed that both in the period of 2000-2019 and 2020-2039, the high lands of the studied area have and will have severe and very severe wet year. Also, the spatial analysis of droughts and remote sensing indices of the second period has depicted an irregular pattern in all indices, and only in NDVI and SAVI indices, the spatial analysis of droughts was able to present a relatively regular pattern.

Keywords: Atmospheric general circulation model, Dynamic statistical model, Drought, Remote sensing indicators, Zagros.