

ارزیابی خسارت خشکسالی با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای خشکسالی و فاکتورهای آسیب‌پذیری (مطالعه موردی: استان ایلام)

زاهده حیدری‌زادی^۱، مجید اوتق^{۲*} و چوقی بایرام کمکی^۳

۱- دانشجوی دکترای بیابان‌زدایی، دانشکده آبخیزداری و مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- نویسنده مسئول، استاد، دانشکده آبخیزداری و مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

پست الکترونیک: mownegh@yahoo.com

۳- استادیار، دانشکده آبخیزداری و مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۳

چکیده

خشکسالی یک پدیده اقلیمی ناخوشایند است که به‌طور مستقیم بر ابعاد مختلف جوامع انسانی تأثیر می‌گذارد. به‌منظور آگاهی و انتخاب تصمیم مدیریتی مناسب، طراحی و توسعه یک رویکرد یکپارچه برای کنترل مؤثرتر این پدیده و ارائه هشدارهای اولیه ضروریست. در این مطالعه، دوازده شاخص مختلف سنجش از دور از ماهواره مودیس (MODIS) و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) برای پایش خشکسالی در طول فصل رشد برای سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۲۰ استفاده گردید. شاخص استاندارد شده بارش (SPI) با مقیاس زمانی یک تا ۱۲ ماه به‌عنوان داده مرجع استفاده شد. سپس روابط بین ۱۳ شاخص و SPI با مقیاس‌های زمانی مختلف با استفاده از رویکرد یادگیری ماشین و تکنیک جنگل تصادفی مدل‌سازی استفاده شد. از داده‌های رطوبت نسبی خاک، شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) و داده‌های عملکرد محصول برای اعتبارسنجی مدل استفاده گردید. نتایج نشان داد که جنگل تصادفی کارکرد خوبی ($R^2=0/88$) برای شبیه‌سازی SPI دارد. در مرحله بعد با استفاده از مدل خشکسالی که در مرحله قبل ساخته شد، شاخص خطر خشکسالی (DHI) بر اساس احتمال وقوع خشکسالی محاسبه شد. شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی (DVI) نیز با استفاده از هفت شاخص اجتماعی و اقتصادی محاسبه گردید. در نهایت، شاخص خسارت خشکسالی (DRI) با تلفیق شاخص خطر خشکسالی و شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی برای استان ایلام به‌دست آمد. نتایج نقشه خسارت نشان داد که دو شهرستان در معرض خسارت خشکسالی خیلی شدید، چهار شهرستان در معرض خسارت زیاد و چهار شهرستان در معرض خطر خشکسالی متوسط و کم قرار دارند. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه یک روش جامع برای ارزیابی خشکسالی منطقه‌ای ارائه می‌دهد. همچنین بر اساس این مدل، می‌توان شهرستان‌های با آسیب‌پذیری بالا را شناسایی کرد تا با ارائه برنامه‌های مدیریتی به‌موقع به بهبود وضعیت کمک کند.

واژه‌های کلیدی: استان ایلام، جنگل تصادفی، خسارت خشکسالی، SPI.

مقدمه

برای کاهش اثرهای منفی رویدادهای خشکسالی مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های پایش سنتی هواشناسی و روش‌های پایش سنجش از دوری مهم‌ترین روش‌های پایش

پایش و پیش‌بینی خشکسالی به‌عنوان یک راهبرد مناسب از سوی سیاست‌گذاران محلی، منطقه‌ای و بین‌المللی

خشکسالی هستند (Dai, 2004; Wang and Qu, 2007). شاخص‌های رایج برای پایش خشکسالی هواشناسی سنتی عبارت است از: شاخص استاندارد بارش (SPI) (McKee) (Vicente-Serrano et al., 1993; Paulo et al., 2012) شده تبخیر و تعرق بارش (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010). این شاخص‌ها خشکسالی را با استفاده از داده‌های بارش در هر ایستگاه هواشناسی بررسی می‌کنند و ممکن است عدم قطعیت بالایی ایجاد کنند، زیرا این داده‌ها نقطه‌ای هستند، منطقه وسیعی را پوشش نمی‌دهند و توزیع ایستگاه‌های هواشناسی در برخی مناطق مناسب نیست. علاوه بر این، تصاویر ماهواره‌ای و محصولات آن یکی از ابزارهای اصلی در مطالعه و پایش خشکسالی هستند که عمدتاً عوامل منفرد مانند پوشش گیاهی را پایش می‌کنند (Shen et al., 2019). این محصولات مرتبط با خشکسالی عبارت است از: دمای سطح زمین (LST)، شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و شاخص تبخیر و تعرق واقعی (Vicente-Serrano et al., 2012). ET تصاویر ماهواره‌ای برخلاف روش‌های سنتی منطقه وسیعی را پوشش می‌دهند که می‌تواند در پایش خشکسالی مؤثر باشد. به طور کلی بیشتر شاخص‌های خشکسالی تنها بر اساس یک متغیر اقلیمی که بیشترین ارتباط را با خشکسالی دارد، ایجاد شده‌اند. برای نمونه، بیشتر شاخص‌های خشکسالی بر پایه یک متغیر آب و هوایی مانند بارندگی یا رطوبت خاک توسعه یافته‌اند (Waseem et al., 2015). در حالی که رویداد خشکسالی ارتباط مستقیمی با عوامل متعدد دارد. بنابراین طراحی و توسعه شاخص خشکسالی بر اساس چندین شاخص می‌تواند مؤثرتر از شاخص منفرد باشد. همچنین با استفاده از شاخص خشکسالی چند متغیره (شاخص خشکسالی چندگانه) به دلیل در نظر گرفتن متغیرهای زیاد، می‌توان خشکسالی را با دقت بیشتری پایش بینی کرد. در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی برای ادغام عوامل مختلف برای ایجاد یک شاخص/مدل خشکسالی چندمتغیره انجام شده است (AghaKouchak et al., 2015; Park et al., 2016; Yin et al., 2018; Shen et al.,

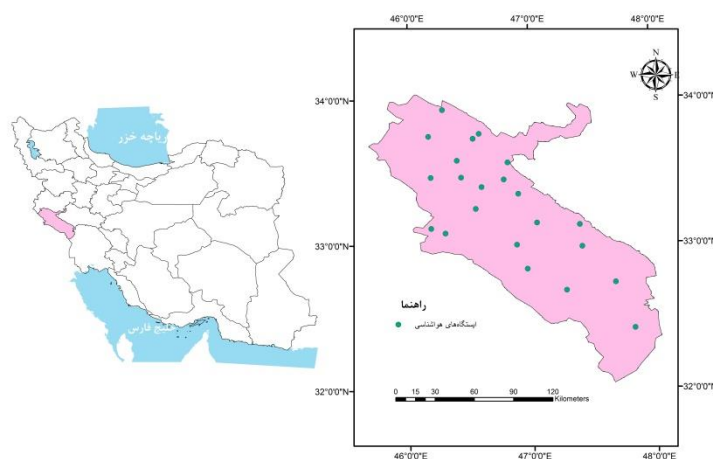
یکی از روش‌های ادغام شاخص‌ها و ساخت مدل خشکسالی، رگرسیون خطی است. در این روش تعیین وزن برای ساخت مدل ضروریست. ترکیبات خطی با رویکردهای وزن‌دهی یکسان عموماً به دلیل سادگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Rhee et al., 2010; Zhang & Jia, 2013). با این حال، رویکردهای وزن‌دهی پیشرفته‌تر و سازگارتر باید برای ترکیب عوامل متعدد برای نظارت بهتر خشکسالی بررسی شوند (Park et al., 2016). رویکردهای یادگیری ماشین یکی از این رویکردهای پیشرفته است که در این مطالعه استفاده شده است. علاوه بر ارزیابی خطر خشکسالی با شاخص چندمتغیره، هدف دیگر این مطالعه ارزیابی خسارت خشکسالی است. ارزیابی خسارت خشکسالی می‌تواند راه‌حلهایی برای کاهش پیامدهای ناخوشایند خشکسالی ارائه دهد و اثرهای نامطلوب خشکسالی را کاهش دهد. اهمیت خسارت خشکسالی از طریق تلفیق خطر خشکسالی و آسیب‌پذیری در بسیاری از مطالعات اخیر مورد توجه قرار گرفته است (Shahid & Behrawan, 2008; Dabanli, 2018; Nasrollahi, 2018; Khoshnazar et al., 2021; lin et al., 2021; Sahana et al., 2021) و آن را به‌عنوان روشی مناسب برای ارزیابی خسارت خشکسالی معرفی کرده‌اند (Lin et al., 2011; Rajsekhar et al., 2015). بر اساس آنچه که در پیشینه مطرح شد، ارزیابی و پایش خشکسالی بر اساس متغیرهای چندگانه و از طریق تلفیق آنها نسبت به شاخص تک متغیره قابل اعتمادتر است و استفاده از رویکردهای ترکیبی در مدل‌سازی، پایش، پیش‌بینی و ارزیابی اثرهای خشکسالی نقش مهمی دارد. از سویی توسعه شاخص‌های چند متغیره خشکسالی نیازمند انتخاب و اصلاح شاخص‌ها بر اساس نوع خشکسالی، منطقه مورد مطالعه، در دسترس بودن داده‌ها و رژیم‌های اقلیمی است. استفاده از یک شاخص چند متغیره منجر به تهیه نقشه خطر و خسارت خشکسالی می‌شود که می‌تواند در مدیریت خشکسالی از جمله پاسخ‌های کوتاه‌مدت و راهبردهای بلندمدت بسیار امیدوارکننده باشد. استان ایلام یکی از استان

با استفاده از تکنیک یادگیری ماشین و بعد ارزیابی خشکسالی در یک بازه زمانی خاص با استفاده از شاخص جامع از جنبه‌های نوآوری این پژوهش می‌باشد. تهیه نقشه خطر خشکسالی و نقشه خسارت به‌طور همزمان از دیگر جنبه‌های نوآوری این تحقیق محسوب می‌شود.

مواد و روش

روش این تحقیق شامل محاسبه شاخص خطر خشکسالی (DHI) از طریق ترکیب دوازده شاخص ماهواره‌ای خشکسالی و یک شاخص محیطی (مدل رقومی ارتفاع) با استفاده از جنگل تصادفی است. سپس شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی (DVI) از طریق ادغام هفت شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی که شامل شاخص‌های اجتماعی و اقتصادی هستند، محاسبه می‌شود و در نهایت ارزیابی خسارت خشکسالی با تلفیق و ضرب شاخص خطر خشکسالی (DHI) در شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی (DVI) انجام می‌گردد. چارچوب کلی اتخاذ شده در این مقاله در شکل ۲ نشان داده شده است.

های غربی ایران است و به دلیل شرایط خشک و نیمه‌خشک آن، بیشتر با پدیده خشکسالی مواجه است. همچنین در بیشتر نقاط ایران تعداد ایستگاه‌های هواشناسی ناکافی بوده و دوره آماری مناسبی را پوشش نمی‌دهند. این موضوع در نواحی غربی ایران محسوس‌تر است که در آن توپوگرافی شدید منجر به ایجاد چندین منطقه اقلیمی با ویژگی‌های متفاوت در خاک، پوشش گیاهی و شرایط اقلیمی شده است. روش مرسوم ارزیابی خشکسالی در ایران بیشتر بر اساس شاخص‌های SPI و SPEI است. در حالی که داده‌های سنجش از دور می‌توانند به عنوان داده‌های هواشناسی جایگزین یا مکمل برای پیش‌بینی و ارزیابی خطر خشکسالی استفاده شوند. همچنین تحقیقات بسیار کمی برای سنجش خطر خشکسالی بر اساس شاخص چند متغیره در ایران به‌ویژه استان ایلام انجام شده است. بیشتر این مطالعات در استان ایلام تنها بر اساس یک عامل مانند بارش بوده است. از آنجایی که تاکنون تحقیقات زیادی با استفاده از شاخص جامع خشکسالی با توجه به وضعیت سلامت پوشش گیاهی، دما و وضعیت جغرافیایی استان انجام نشده است، از این‌رو استفاده از شاخص‌های مختلف و ترکیب آنها



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Geographical location of the study area

منطقه مورد مطالعه

استان ایلام حدود یک درصد از مساحت کل ایران را شامل می‌شود. این استان در جنوب غربی ایران قرار دارد (شکل ۱). استان ایلام به‌عنوان منطقه مورد مطالعه مانند بیشتر مناطق ایران از نظر بارندگی سالانه، فصلی و ماهانه از ضریب تغییرات بالایی برخوردار است، به طوری که طی دوره‌های گذشته این استان دائماً با خشکسالی مواجه بوده است. گندم و جو مهمترین محصولات کشاورزی هستند و تقریباً ۷۵/۹ درصد از اراضی کشاورزی دیم می‌باشد، بنابراین کشاورزی به شدت به بارندگی سالانه وابسته است (Azizi & Safarkhani, 2010).

ارزیابی خطر خشکسالی

داده‌ها

داده‌های سنجش از دور

در این مطالعه، از ۱۲ شاخص ماهواره‌ای مبتنی بر خشکسالی از سنجنده MODIS تصحیح شده جوی در سکوی Terra طی سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۰۰ استفاده شد. MOD13A3 و MOD11A2 LST، MOD16A2 ET و NDVI با تفکیک مکانی یک کیلومتر و بازتاب سطحی MOD09A1 با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر در دسترس هستند. این داده‌ها برای فصل رشد (مارس تا ژوئن) محاسبه شدند. MOD09A1 و MOD11A2 داده‌های ترکیبی هشت روزه ارائه می‌دهند، از این‌رو ابتدا به داده‌های ماهانه تبدیل شدند. عوامل خشکسالی مبتنی بر سنجش از دور عبارت است از (جدول ۱): دمای سطح زمین (LST)، شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) (Rouse, 1974)، شاخص تفاضل خشکسالی (NDDI) (Gu et al., 2007)، شاخص نرمال شده آب (NDWI) (Gao, 1996)، شاخص نرمال شده چند بانده خشکسالی (NMDI) (Wang & Qu,)

(2007)، شاخص پوشش گیاهی تنظیم خاک (SAVI) (Huete et al., 1984)، شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته (EVI) (Huete et al., 1984) و ET واقعی از MODIS. همچنین در این تحقیق از نقشه رقومی ارتفاع (DEM) به‌عنوان یک لایه کمکی استفاده شد. داده‌های مربوط به ماه‌های فصل رشد از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ با استفاده از روش حداکثر-حداقل از صفر تا یک مقیاس بندی شدند (Kogan, 1993). سپس مجموعه داده‌ها به دو گروه آموزش (۷۰٪) و اعتبارسنجی (۳۰٪) تقسیم گردید.

داده‌های مرجع

شاخص بارش استاندارد شده

این شاخص بر مبنای تبدیل قابلیت بارندگی ماهانه تجمعی به یک متغیر طبیعی استاندارد است و توسط سازمان جهانی هواشناسی به‌عنوان استاندارد برای توصیف خشکسالی‌های هواشناسی توصیه می‌شود (McKee et al., 1993; Dutra et al., 2013). در این مطالعه از SPI به‌عنوان داده مرجع برای پایش خشکسالی استفاده شد. برای محاسبه شاخص SPI، نباید داده‌های گذشته در مجموعه‌های زمانی وجود داشته باشد و دوره آماری باید حداقل ۳۰ ساله باشد (Svoboda, 2000). برای محاسبه SPI از داده‌های بارش ماهانه حاصل از ایستگاه‌های موجود در منطقه (از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸) استفاده شد. این شاخص به‌عنوان یک داده مرجع در نظر گرفته شد. در این مطالعه شاخص SPI با استفاده از نرم افزار DrinC محاسبه شد. از آنجا که تأخیر زمانی بین رویداد بارش و خشکسالی وجود دارد، از این‌رو از مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص SPI (به‌عنوان مثال، داده‌های یک، سه، شش، نه و ۱۲ ماهه) استفاده شد (Park et al., 2016). مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- محاسبه شاخص‌های مختلف ماهواره‌ای (Park et al., 2016)

Table 1- Calculation of various satellite indexe

شاخص Index	فرمول Formula	توضیحات Description
NDVI	$(NIR-RED)/(NIR+RED)$	NIR بازتاب در باند مادون قرمز نزدیک و RED بازتاب در محدوده باند قرمز
NMDI	$(NIR - (SWIR2 - SWIR3))/(NIR + (SWIR2 - SWIR3))$	NIR بازتاب در باند مادون قرمز نزدیک و RED بازتاب در محدوده باند قرمز است. SWIR2 باند شش و SWIR3 باند هفت ماهواره مودیس است. فاکتور تعدیل کننده خاک، C1 و C2 به طور معمول، G=2.5، C1=6، C2=7.5 است.
EVI	$G \times \frac{P_{NIR} - P_{RED}}{P_{NIR} + C_1 \times P_{RED} - C_2 \times P_{BLUE} + L}$	L عامل تصحیح خاک، NIR بازتاب در باند مادون قرمز نزدیک (باند چهارم) و RED بازتاب در باند طیفی قرمز (باند سه) می باشد.
SAVI	$\frac{(NIR - RED)(1 + L)}{(NIR + RED + L)}$	از باندهای دو، پنج و شش ماهواره مودیس استفاده می شود.
NDWI5, 6 & 7 NDDI5, 6 & 7	$(\rho_{band2} - \rho_{band5(or\ 6\ or\ 7)}) / (\rho_{band2} + \rho_{band5\ (or\ 6\ or\ 7)})$ $(NDVI - NDWI) / (NDVI + NDWI)$	با استفاده از شاخص NDVI و NDWI ساخته می شود.

جدول ۲- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده

Table 2- Geographical location of the used stations

ارتفاع از سطح دریا (متر) Height above sea level (meters)	عرض جغرافیایی latitude	طول جغرافیایی Longitude	نام ایستگاه station
1423	3324	4636	ارکواز Arkavaz
1106	3328	4626	اما Ema
1326	3335	4624	ایلام Ilam
1169	3350	4618	ایوان Ivan
916	3259	4725	آبدانان Abdanan
358	3250	4658	بیشه‌دراز Bishederaz
768	3300	4653	پهله Pahle
1080	3309	4703	تختان Takhtan
1100	3327	4647	چنارباشی Chenarbashi
946	3345	4610	چنان Chenan

ارتفاع از سطح دریا (متر) Height above sea level (meters)	عرض جغرافیایی latitude	طول جغرافیایی Longitude	نام ایستگاه station
1338	3356	4617	چهارمله Chaharmele
630	3308	4724	دره شهر Dareshahr
175	325	4750	دشت عباس Dashteabbas
232	3241	4717	دهلران Dehloran
1052	3346	4635	سرابله Sarableh
623	3328	4611	صالح آباد Salehabad
1262	3344	4632	کارزان Karezan
926	3321	4654	کلم Kolm
903	3315	4633	گنبد Gonbad
789	3334	4649	لومار Lumar
524	3244	4741	مورموری Mormori
145	3305	4611	مهران Mehran

داده‌های اعتبارسنجی

داده‌های عملکرد محصول

یکی از اثرهای خشکسالی بر کشاورزی، کاهش محصول است. بنابراین عملکرد محصول می‌تواند به‌عنوان داده مرجع برای اعتبارسنجی مدل خشکسالی استفاده شود. در این تحقیق، داده‌های عملکرد کل محصول شامل گندم و جو از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۷ برای هر شهرستان در استان ایلام از سازمان جهاد کشاورزی استان ایلام اخذ و به‌عنوان داده‌های مرجع پایش خشکسالی استفاده شد.

کاهش رطوبت نسبی خاک است (Shen *et al.*, 2019). رطوبت نسبی خاک در عمق ۱۰ سانتی‌متری از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ با مطالعات متعددی که قبلاً در منطقه مورد مطالعه انجام شده بود قابل دسترسی بود (Madadi *et al.*, 2016). داده‌های رطوبت نسبی ماهانه خاک با عمق ۱۰ سانتی‌متر به‌عنوان داده‌های مرجع دیگر برای اعتبارسنجی مدل خشکسالی استفاده شد.

شاخص استاندارد بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

SPEI یک شاخص چند متغیره است که در آن داده‌های بارش و دما ترکیب می‌شوند (Vicente-Serrano *et al.*,

داده‌های رطوبت خاک

یکی از معیارهای مهم تأثیر خشکسالی بر کشاورزی،

های هر ماه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ با استفاده از روش حداقل-حداکثر از صفر تا یک مقیاس‌بندی شدند و برای بررسی رابطه بین شاخص‌ها و شرایط خشکسالی از جنگل تصادفی (RF) استفاده شد. ۷۰ درصد نمونه‌ها به صورت تصادفی به عنوان داده‌های آموزشی و ۳۰ درصد بقیه برای اعتبارسنجی استفاده شدند.

جنگل تصادفی (RF)

مدل RF یک روش ناپارامتریک مناسب برای مدل‌سازی داده‌های پیوسته و گسسته است و یک روش درخت تصمیم است که در این مطالعه برای بررسی رابطه بین عوامل مؤثر در وقوع خشکسالی و شرایط خشکسالی (برای نمونه، SPI و عملکرد محصول) استفاده شد. RF تکنیکی برای توسعه یک مدل رگرسیون بین مجموعه‌ای از ورودی‌ها و خروجی مورد نظر است. مدل RF همچنین اهمیت نسبی هر متغیر را با استفاده از تحلیل حساسیت فراهم می‌کند (Kim et al., 2016; Park et al., 2015). در این مطالعه ۱۳ متغیر به عنوان ورودی و SPI به عنوان داده مرجع معرفی شدند.

شاخص خطر خشکسالی (DHI)

خطر خشکسالی حاصلضرب ویژگی‌های خشکسالی (شامل فراوانی و بزرگی) است. روش محاسبه خطر خشکسالی به طور کامل در چندین تحقیق توضیح داده شده است (Kim et al., 2015; Dabanli, 2018; Nasrollahi., 2021; Khoshnazar et al., 2018) اما به صورت مختصر، منطقه آسیب‌پذیر خشکسالی بر اساس درصد احتمال وقوع خشکسالی از طریق نسبت وقوع در گام زمانی به کل وقوع محاسبه می‌شود. در این تحقیق، ابتدا با استفاده از مدل خشکسالی ساخته شده در مرحله قبل، شاخص خشکسالی برای هر سال محاسبه و مقدار شاخص خشکسالی ترکیبی تهیه شد. باید توجه کرد که هر پیکسل تصاویر سنجش از دور در این تحقیق به عنوان یک ایستگاه هواشناسی در نظر گرفته شده است. سپس احتمال وقوع برای هر پیکسل به طور مشابه برای هر شهرستان به دست آمد و پس از آن

این شاخص در مقیاس‌های زمانی مختلف از رابطه ساده بیلان آب یعنی تفاوت بین بارندگی و قابلیت تبخیر و تعرق بر اساس رویکرد تورنوایت استفاده می‌کند و درجه خشکسالی و ترسالی را نشان می‌دهد و بوسیله رابطه ۱ محاسبه می‌شود.
رابطه ۱:

$$SPEI = D = Pi - ET0i$$

که در آن اختلاف مقدار تبخیر ماهانه از مقدار بارندگی، Pi بارندگی ماهانه و $ET0i$ تبخیر و تعرق مرجع ماهانه است (Sebghati et al., 2016). برای اعتبارسنجی مدل ساخته شده از SPEI ۱۲ ماهه (از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸) استفاده شد.

روش‌ها

پایش خشکسالی و ساخت مدل خشکسالی

خطر موقعیتی است که می‌تواند به سانحه و یا حادثه منجر شود. هدف از شناسایی خطر، فراهم کردن موقعیتی برای ارزیابی، کاهش و در بهترین حالت حذف خطر است. برای ارزیابی خطر خشکسالی، باید مدل خشکسالی ساخته شود. مبنای نظری ترکیب شاخص‌ها برای پایش خشکسالی این است که استفاده از یک شاخص خشکسالی چند متغیره به دلیل مشارکت متغیرهای زیادی که نه تنها به بارندگی مربوط می‌شوند، بلکه به عوامل تأثیرگذار دیگر نیز مرتبط هستند، می‌تواند خشکسالی را با دقت بیشتری پایش کند. زیرا هر یک از عوامل خشکسالی می‌توانند خشکسالی را از جنبه‌های مختلف منعکس کنند. از آنجا که ارتفاع نیز تأثیر مهمی بر خشکسالی منطقه‌ای دارد در مدل‌سازی خشکسالی باید در نظر گرفته شود. شاخص NDVI نشان‌دهنده سلامت نسبی پوشش گیاهیست. وقوع خشکسالی نیز با LST مرتبط است. در این مطالعه در مجموع از ۱۳ متغیر به عنوان متغیر ورودی استفاده شد (متغیرهای ورودی شامل: NDVI, NDDI5, 6, EVI, NDWI5, 6, 7, LST, SAVI, NMDI و 7 DEM هستند که در جدول ۱ ذکر شده است) که بر اساس مطالعات قبلی برای مدل‌سازی خشکسالی مرتبط و مهم هستند (Park et al., 2016; Shen et al., 2019). داده

ندارد، هر کلاس خشکسالی برای ایجاد نقشه DHI وزن‌دهی می‌گردد. امتیازات وزن (W) و رتبه (R) به هر دسته بر اساس شدت و احتمال وقوع اختصاص داده می‌شود. احتمال وقوع با استفاده از روش شکست طبیعی به چهار درجه طبقه بندی می‌شود (Poortaheri *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2015). شدت و احتمال وقوع وزن (Dw) و رتبه (Dr) برای هر مورد در جدول ۳ نشان داده شده است.

فراوانی طبقات خشکسالی محاسبه می‌شود و با تقسیم فراوانی وقوع خشکسالی در هر طبقه خشکسالی در تمامی موارد احتمالی خشکسالی، احتمال وقوع به دست می‌آید. با استفاده از سیستم وزن‌دهی، رویدادهای خشکسالی به چهار طبقه کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H) و خیلی زیاد (VH) طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۳). از آنجایی که وقوع شدت‌های مختلف خشکسالی در تعیین خطر یک منطقه ارزش یکسانی

جدول ۳- وزن و رتبه اعمال شده به طبقات شدت خشکسالی (Dabanli, 2018)

Table 3- Weight and rate assigned to drought category

شاخص خشکسالی Drought index value	طبقه Category	وزن Weight (DW)	احتمال وقوع Occurrence Probability	درجه Rating (Dr)
0.75-1	Very High (VH)	4	Very high	4
			High	3
			Low	2
			Very low	1
0.50-0.75	High (H)	3	Very high	4
			High	3
			Low	2
			Very low	1
0.25-0.50	Moderate (M)	2	Very high	4
			High	3
			Low	2
			Very low	1
0-0.25	Low (L)	1	Very high	4
			High	3
			Low	2
			Very low	1

در نهایت، DHI بوسیله رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$DHI = LD_r \times LD_w + MD_r \times MD_w + HD_r \times HD_w + VHD_r \times VHD_w \quad (\text{رابطه ۲})$$

خیلی زیاد اختصاص داده شده‌اند. مقادیر DHI از طریق روش حداقل-حداکثر نرمال‌سازی می‌شوند که همه مقادیر را بین صفر و یک قرار می‌دهد.

که LD_r و MD_r، HD_r و VHD_r به ترتیب رتبه اعمال شده به طبقه خشکسالی کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد هستند. LD_w و MD_w، HD_w و VHD_w به ترتیب وزن‌دهی هستند که به طبقه خشکسالی کم، متوسط، زیاد و

شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی (DVI)

داده‌ها

هفت شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی در این مطالعه بر اساس منطقه مورد مطالعه و خطر خشکسالی انتخاب شده است (UNDP, 2004). آسیب‌پذیری عمدتاً به شرایط اجتماعی-اقتصادی یک منطقه مربوط می‌شود. شاخص‌های اجتماعی-اقتصادی استفاده شده در این تحقیق شامل: نسبت جمعیت روستایی به شهری (Rr)، اراضی آبی (IL)، شغل کشاورزی (AO)، کل اراضی کشاورزی (TAL)، تراکم جمعیت (PD)، آب شهری (MW) و تولید غذا (FP) هستند.

روش‌ها

برای تهیه نقشه DVI به هر کلاس از عوامل مورد استفاده با توجه به مقادیرشان یک رتبه در مقیاس ۱-۴ اختصاص داده شد و DVI بر اساس رابطه ۳ محاسبه شد.

(رابطه ۳)

$$DVI = (Rrn + ILn + TALn + PDn + MWn + FPn) / 7$$

جایی که Rrn، ILn، TALn، PDn، MWn و FPn مقادیر نرمال شده هستند که به ترتیب نسبت جمعیت روستایی به شهری، اراضی آبی، شغل کشاورزی، کل اراضی کشاورزی، تراکم جمعیت، آب شهری و تولید غذا می‌باشند. در مرحله بعد DVI به چهار دسته طبقه‌بندی می‌شود: آسیب‌پذیری کم ($0 < DVI < 0.25$)، متوسط ($0.25 < DVI < 0.50$)، زیاد ($0.50 < DVI < 0.75$) و بسیار زیاد ($0.75 < DVI < 1$) (Dabanli, 2018).

شاخص خسارت خشکسالی (DRI)

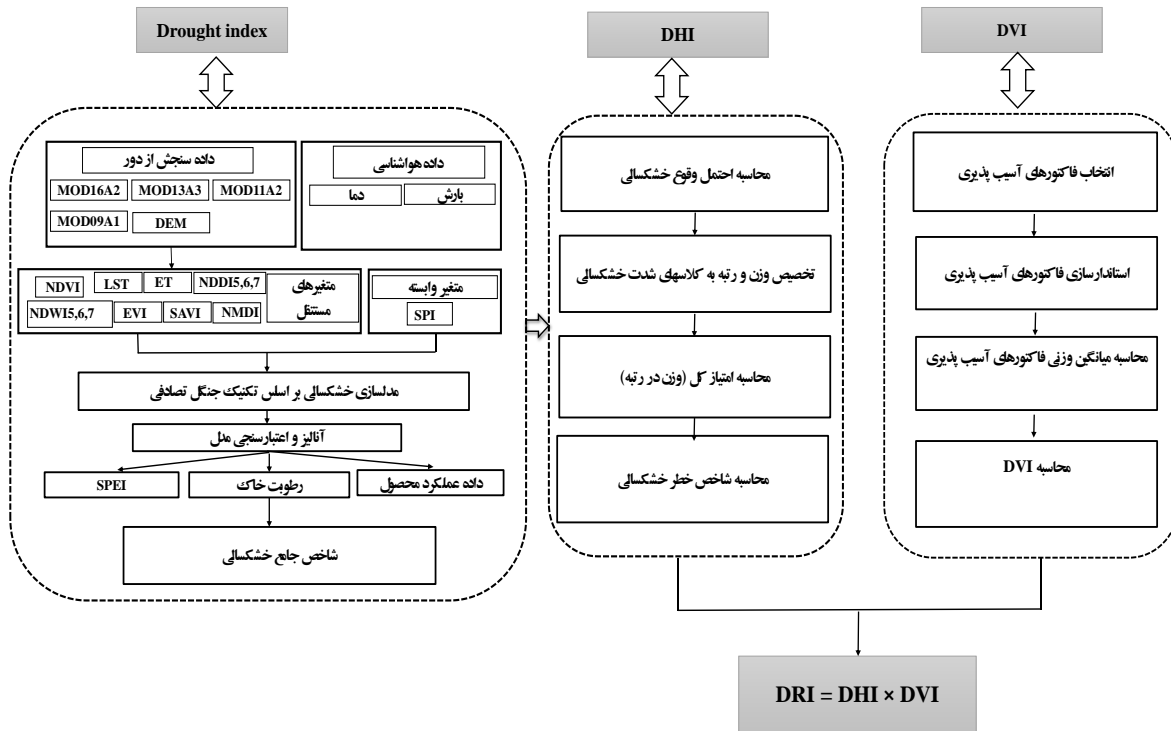
خطر احتمال پیامدهای منفی خطر است (خوش‌نظر و همکاران، ۲۰۱۲). شاخص خطر خشکسالی (DRI) ضرب شاخص خطر خشکسالی (DHI) و شاخص آسیب‌پذیری

خشکسالی (DVI) است (Shahid & Behrawan, 2008). خطر خشکسالی به‌عنوان تابعی از خطر و آسیب‌پذیری تعیین می‌شود، بنابراین DRI به‌صورت $DRI = DHI \times DVI$ محاسبه می‌شود. اگر یکی از شاخص‌های DVI یا DHI برابر با صفر باشد، امتیاز DRI نیز صفر می‌شود، به این معنی که خسارت خشکسالی وجود ندارد. به‌طور کلی DVI و DHI سهم مهمی در ارزیابی DRI دارند و امتیاز DRI به‌طور مستقیم به DVI و DHI بستگی دارد. DRI به چهار دسته مشابه DVI طبقه‌بندی می‌شود: کم ($0 < DRI < 0.25$)، متوسط ($0.25 < DRI < 0.50$)، زیاد ($0.50 < DRI < 0.75$) و بسیار زیاد ($0.75 < DRI < 1$) (Danbanli, 2018).

نتایج

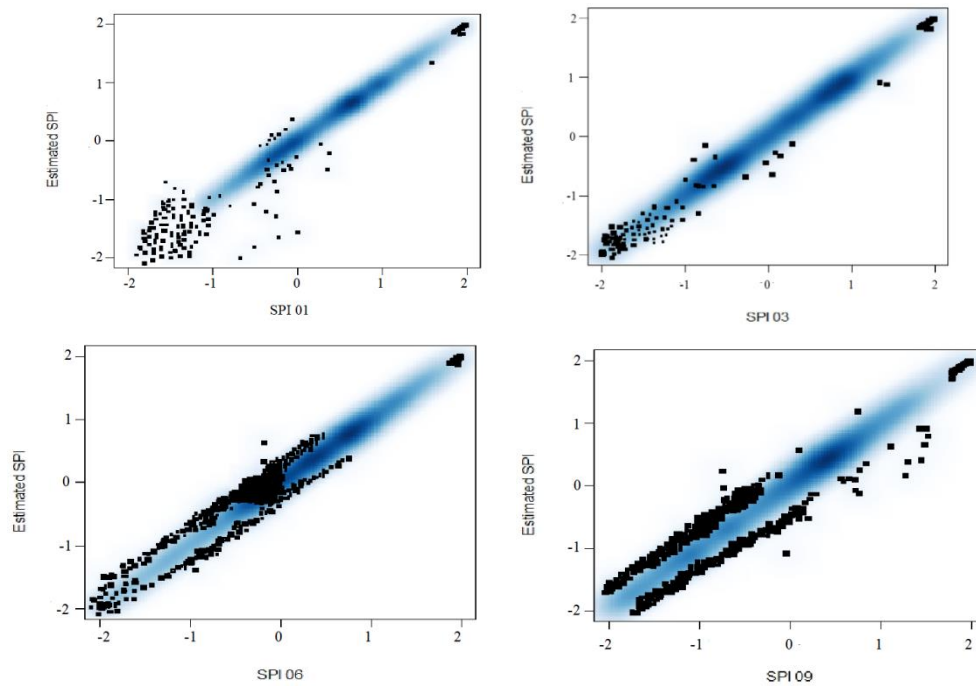
ساخت مدل و پایش خشکسالی هواشناسی

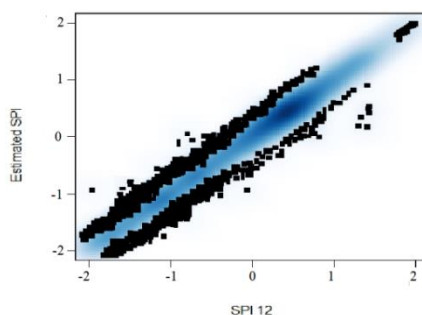
در مجموع ۱۳ متغیر و داده SPI با مقیاس‌های زمانی مختلف (یک، سه، شش، نه و ۱۲ ماهه) به‌ترتیب به‌عنوان متغیرهای مستقل و وابسته برای مدل‌سازی با استفاده از تکنیک RF استفاده شد. عملکرد مدل از طریق ضریب تعیین (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) ارزیابی شد. محاسبات مدل RF در محیط نرم‌افزار R4.1.0 با استفاده از بسته "randomForest" انجام شد (Liaw & Wiener, 2002). برای انتخاب مناسب‌ترین خط برازش، متغیر اندازه گره (تعداد برگ‌های هر شاخه را نشان می‌دهد) با آزمون و خطا تعیین شد. پس از معرفی متغیرهای مستقل به مدل، SPI با دوره‌های زمانی مختلف شبیه‌سازی شد. سپس ۷۰ درصد داده‌ها به‌عنوان مجموعه آموزشی به مدل معرفی شد و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای ارزیابی مدل استفاده شد. شکل ۳ نمودارهای به دست آمده از شبیه‌سازی مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمودار جریان محاسبه شاخص خطر خشکسالی (DRI)

Figure 2- Scheme of the methodology for calculating Drought Risk Index (DRI)





شکل ۳- نمودارهای بین SPI پیش‌بینی شده و داده واقعی با دوره‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه با استفاده از مدل RF

Figure 3- Scatter plots between predicted SPI with periods 1, 3, 6, 9 and 12 using the RF model.

وضوح مقادیر SPI را کمتر نشان می‌دهد. بیشترین مقدار R^2 مربوط به SPI شش ماهه (۰/۸۸) است.

همان‌طور که در شکل بالا نشان داده شده است، مدل جنگل تصادفی دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی شاخص SPI با مقیاس‌های زمانی مختلف دارد، به جز SPI یک ماهه که به

جدول ۴- عملکرد مدل جنگل تصادفی برای SPIهای یک، سه، شش، نه و ۱۲ ماهه

Table 4-Model performance of random forest for 1- 3- 6- 9- and 12-month SPIs

شاخص Index	RSME	MAE	R^2
SPI1	0.29	0.11	0.66
SPI3	0.32	0.09	0.74
SPI6	0.41	0.009	0.88
SPI9	0.36	0.01	0.79
SPI12	0.38	0.08	0.83

همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، SPI شش ماهه بهترین عملکرد را در بین سایر SPIها دارد. بالاترین R^2 بعدی مربوط به SPI ۱۲ ماهه است. به‌طورکلی، مدل عملکرد خوبی برای SPI با دوره‌های مختلف دارد. برای نمونه، محدوده SPI پیش‌بینی شده شش ماهه از RF با دامنه SPI واقعی شش ماهه مشابه است، به جز SPI یک ماهه که محدوده SPI پیش‌بینی شده یک ماهه از RF بسیار کمتر از محدوده یک واقعی است. جنگل تصادفی از یک رویکرد برای جلوگیری از مشکل بیش‌برازش استفاده می‌کند (Prasad *et al.*, 2006). از آنجایی که عوامل خشکسالی تمایل دارند اثر کمبود بلندمدت بارش را نشان دهند

همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، SPI شش ماهه بهترین عملکرد را در بین سایر SPIها دارد. بالاترین R^2 بعدی مربوط به SPI ۱۲ ماهه است. به‌طورکلی، مدل عملکرد خوبی برای SPI با دوره‌های مختلف دارد. برای نمونه، محدوده SPI پیش‌بینی شده شش ماهه از RF با دامنه SPI واقعی شش ماهه مشابه است، به جز SPI یک ماهه که محدوده SPI پیش‌بینی شده یک ماهه از RF بسیار کمتر از محدوده یک واقعی است. جنگل تصادفی از یک رویکرد برای جلوگیری از مشکل بیش‌برازش استفاده می‌کند (Prasad *et al.*, 2006). از آنجایی که عوامل خشکسالی تمایل دارند اثر کمبود بلندمدت بارش را نشان دهند

می‌گردد، اگر این جایگزینی بر خطای اندازه‌گیری تأثیری نداشته باشد اهمیت چندانی ندارد و اگر مقدار خطای اندازه‌گیری افزایش یابد، متغیر مهم است. برای انتخاب نتایج داده‌کاوی، مناسب‌ترین متغیرهای محیطی برای مدل‌سازی بر اساس تحلیل عوامل واریانس در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس این عامل، از بین ۱۳ متغیری که در این پژوهش استفاده شده است، شش متغیر به‌عنوان متغیرهای مهم انتخاب شدند. اهمیت نسبی متغیرها با استفاده از داده‌های نوزده ساله (۲۰۱۸-۲۰۰۰) تعیین شد.

متقابل تفاوت معنی‌داری نداشتند، اما کمی بالاتر از نتایج اعتبارسنجی و از دقت قابل قبولی برخوردار بودند.

تعیین اهمیت نسبی متغیرهای مبتنی بر خشکسالی تکنیک جنگل تصادفی اهمیت متغیرها را در مدل‌سازی با استفاده از تحلیل حساسیت تعیین می‌کند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، روش میانگین کاهش حداقل (MDA) قادر است اهمیت متغیرهای مورد استفاده در فرایند مدل‌سازی را تعیین کند. در MDA مقادیر صحیح متغیرها با مقادیری که به صورت تصادفی برای هر درخت ایجاد می‌شود جایگزین

جدول ۵- اهمیت نسبی (%) شش شاخص مهم برای SPI با استفاده از RF

Table 5- The relative importance (%) of the most important six indices for 1-, 3-, 6-, 9-, and 12-month SPI using RF

رتبه Rank	SPI 1	SPI 3	SPI 6	SPI 9	SPI 12
1	ET(100)	SAVI(100)	NDWI7(96)	NDWI6(98)	NDWI6(88)
2	LST(96)	NDWI6(98)	NDVI(95.2)	NDVI(88)	NMDI(81)
3	DEM(61)	NDVI(93)	NDWI6(87.4)	DEM(77)	NDVI(76)
4	NDWI7 (43.2)	NDDI6(91)	SAVI(86.2)	ET(66)	DEM(68)
5	NDVI(11.2)	EVI(74)	ET(72.7)	NMDI(69)	ET(65)
6	NDDI6 (3.5)	DEM(63)	DEM(64)	NDDI6(12)	SAVI(11)

تجزیه و تحلیل نتایج پایش مدل داده‌های عملکرد محصول، رطوبت نسبی خاک و شاخص استاندارد SPEI برای اعتبارسنجی شاخص خشکسالی استفاده شد. SPEI در مقیاس زمانی سالانه برای ۲۲ ایستگاه هواشناسی در استان ایلام از سال ۲۰۱۸-۲۰۰۰ محاسبه شد. علاوه بر این، از رطوبت نسبی خاک برای مدت مشابه با SPEI استفاده شد. داده‌های عملکرد محصول از سال ۲۰۰۵ در دسترس بود. تجزیه و تحلیل عملکرد شاخص جامع ساخته شده با استفاده از تجزیه و تحلیل همبستگی پیرسون بین این شاخص و داده‌های اعتبارسنجی در مقیاس ۱۲ ماهه در نرم‌افزار R انجام گردید. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل همبستگی در جدول ۶ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج ذکر شده، در دوره‌های کوتاه خشکسالی، اهمیت شاخص‌هایی که بیشتر به شرایط سطح زمین مربوط می‌شوند مانند دمای سطح زمین و تبخیر و تعرق بیشتر است. کمبود بارندگی و وقوع خشکسالی نیز به صورت آنی با ارتفاعات منطقه مورد مطالعه مرتبط است. هر سه کانال MODIS SWIR (یعنی باندهای پنج، شش و هفت) برای محاسبه NDWI و NDDI استفاده شدند. در حالی که NDWI6 و NDWI7 از NDWI5 مهمتر هستند، NDDI6 از NDWI5 و NDDI7 با اهمیت تر است. شاخص SAVI در دوره‌های کوتاه خشکسالی از اهمیت بیشتری برخوردار است. از آنجایی که NDDI با استفاده از NDWI و NDVI محاسبه شد (جدول ۲) اهمیت نسبی NDDI کمتر از NDWI و NDVI بود.

جدول ۶- همبستگی شاخص ساخته شده به وسیله مدل و داده‌های مرجع

Table 6- Correlation of the index made by the model and reference data

شاخص	شاخص جامع خشکسالی	SPI	SPEI	عملکرد محصول	رطوبت خاک
Index	Comorehensive drought index			Crop yeild	Soil moisture
شاخص جامع خشکسالی	1				
Comorehensive drought index		1			
SPI	0.85				
SPEI	0.88	0.78			
عملکرد محصول	0.77	0.64	0.69	1	
Crop yeild					
رطوبت خاک	0.98	0.52	0.59	0.72	1
Soil moisture					

طبقات خشکسالی نیز محاسبه شد. نقشه خطر DHI با استفاده از روش کریجینگ تولید شد (شکل ۴). مقدار DHI بین صفر تا یک نرمال شده است. استان ایلام بر اساس DHI به چهار طبقه خشکسالی طبقه‌بندی شد که عبارت است از: «کم» بین ۰ تا ۰/۲۵، «متوسط» بین ۰/۲۵ تا ۰/۵۰، «بالا» بین ۰/۵۰ تا ۰/۷۵ و «بسیار بالا» بین ۰/۷۵ تا ۱ (Dabanli, 2018). نقشه DHI شدت بیشتری را در شهرستان‌های جنوب و جنوب‌غربی ایلام نشان می‌دهد. این شهرستان‌ها ارتفاع کمتری دارند و همین ویژگی باعث گرم‌تر شدن این شهرستان‌ها نسبت به سایر نقاط استان می‌شود.

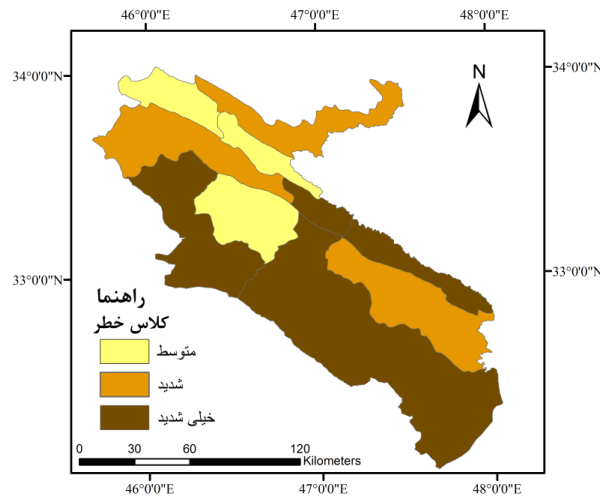
نقشه آسیب‌پذیری خشکسالی

آسیب‌پذیری خشکسالی با استفاده از هفت پارامتر اجتماعی-اقتصادی بر اساس رابطه ۳ محاسبه شد. نقشه آسیب‌پذیری در شکل ۵ ارائه شده است. بر اساس نتایج، شهرستان‌های چرداول و دره‌شهر به دلیل برخورداری از زمین‌های کشاورزی وسیع، آسیب‌پذیری بسیار بالایی در برابر رویدادهای خشکسالی دارند. شهرستان ایلام به دلیل تراکم جمعیت آسیب‌پذیری بالایی دارد. ویژگی مشترک شهرستان‌های با آسیب‌پذیری کم تا متوسط را می‌توان به زمین‌های کشاورزی و تولید محصولات کشاورزی نسبت داد.

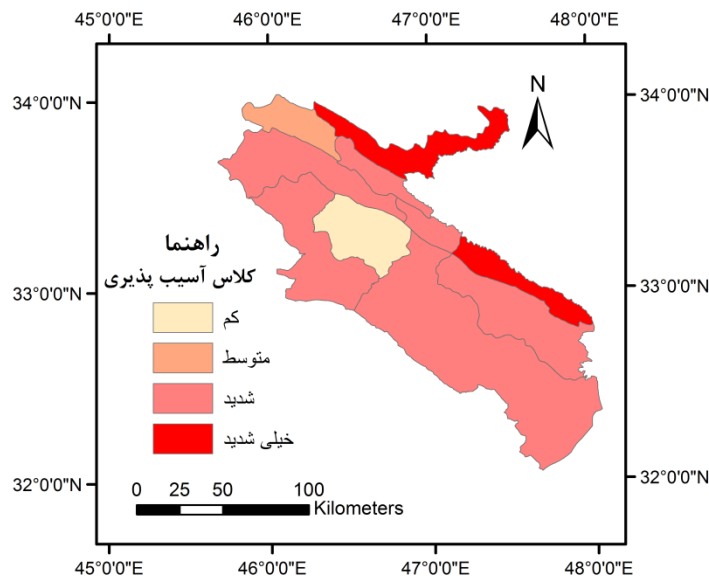
همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده است، رگرسیون بین داده‌های ۱۲ ماهه SPI، SPEI، رطوبت خاک و عملکرد محصول مقایسه شده است. با توجه به جدول ۶، بین شاخص جامع خشکسالی و شاخص SPEI که یکی از داده‌های مرجع می‌باشد، همبستگی ۰/۸۸ برقرار است. بین داده‌های عملکرد محصول سالانه و شاخص جامع خشکسالی همبستگی ۰/۶۸ وجود دارد که بیشتر از میزان همبستگی بین عملکرد محصول و شاخص SPI و حتی شاخص SPEI می‌باشد. در مورد ارتباط بین داده‌های رطوبت خاک و شاخص جامع خشکسالی نیز بیشترین همبستگی بین شاخص جامع خشکسالی و رطوبت خاک برقرار است و این میزان همبستگی بیشتر از شاخص SPI و SPEI می‌باشد. به‌طور کلی نتایج همبستگی نشان می‌دهد که بالاترین همبستگی بین شاخص جامع خشکسالی و داده‌های مرجع است.

نقشه خطر خشکسالی

وزن‌دهی به شش متغیر با اهمیت نسبی بیشتر (SAVI، ET، DEM، NDVI، NMDI، NDWI6) با استفاده از RF تعیین شد. شاخص مورد نظر برای پایش خشکسالی محاسبه و نقشه خشکسالی ۱۲ ماهه هر دوره معین برای هر سال تهیه شد. سپس برای محاسبه DHI، احتمال وقوع برای هر شهرستان به دست آمد و فراوانی



شکل ۴- نقشه DHI استان ایلام
 Figure 4- DHI map of Ilam province



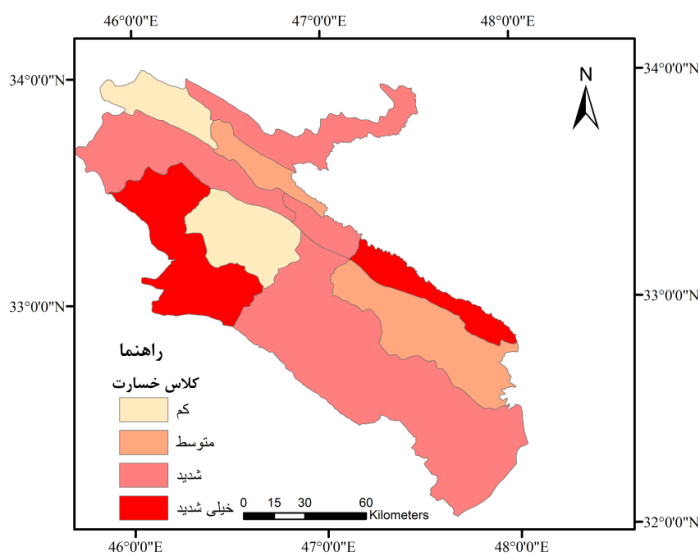
شکل ۵- نقشه شاخص آسیب پذیری خشکسالی استان ایلام
 Figure 5- Map of drought vulnerability index of Ilam province

تقسیم شده است. نتایج نشان داد که شهرستان‌های مهران و دره‌شهر دارای خطر بسیار بالایی هستند. این شهرستان‌ها به دلیل داشتن زمین‌های کشاورزی وسیع، منطقه اصلی تولید مواد غذایی هستند و نسبت به سایر شهرستان‌ها هوای گرم‌تری دارند. همچنین نسبت جمعیت روستایی به شهری

نقشه خسارت خشکسالی
 DRI با ضرب شاخص خطر خشکسالی (DHI) و شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی (DVI) به دست آمد. نقشه DRI در شکل ۶ نشان داده شده است. استان ایلام از نظر خسارت خشکسالی به چهار طبقه مشابه DHI و DVI

توان مربوط به تولید کم غذا و نسبت پایین جمعیت روستایی به شهری دانست و از دلایل پایین بودن خطر خشکسالی شهرستان ملکشاهی وسعت کم اراضی کشاورزی و تولید غذاست.

بالاست. شهرستان‌های سیروان و آبدانان دارای خطر متوسط هستند. شهرستان ایلام از خطر بالایی برخوردار است، تراکم جمعیت در این شهرستان زیاد است اما تولید مواد غذایی در مقایسه با شهرستان دهلران کمتر است. شهرستان‌های ایوان و ملکشاهی دارای خطر پایینی هستند. خطر پایین ایوان را می



شکل ۶- نقشه DRI استان ایلام
Figure 6- DRI map of Ilam province

بحث

به‌عنوان داده‌های مرجع برای اعتبارسنجی شاخص جامع خشکسالی استفاده شد. نتایج نشان داد که جنگل تصادفی کارکرد خوبی ($R^2=0/88$) برای شبیه‌سازی SPI دارد. این نتایج با نتایج حاصل از مطالعه Park و همکاران (۲۰۱۶) که تکنیک RF را تکنیک مناسبی برای مدل‌سازی خطر خشکسالی معرفی کردند، همخوانی دارد. از دلایل کارایی قابل قبول مدل RF مبتنی بر مقایسه نتایج، می‌توان به قابلیت خودارزیابی و خوداصلاحی مدل در طی ساخت درخت‌های متعدد اشاره کرد (Kournejadi & Poorqashemi, 2019). نتایج اعتبارسنجی مدل نشان داد که مدل خشکسالی توانسته است رویداد خشکسالی را بهتر از شاخص‌های SPEI و SPI نشان دهد. در واقع مدل ساخته شده برای خشکسالی شرایط واقعی‌تری از خشکسالی را در منطقه نشان می‌دهد. همچنین این نتایج با یافته‌های حاصل از تحقیقات Mizell

خشکسالی پدیده‌ای پیچیده است و هیچ شاخص واحدی وجود ندارد که بتواند پیچیدگی و تنوع خشکسالی را به‌طور کامل توضیح دهد، زیرا با عوامل متعددی در ارتباط است. بنابراین ترکیبی از عوامل مختلف برای پیش‌خشکسالی مفید است (Hayes et al., 2005; Wardlow et al., 2012). با توجه به تعدد شاخص‌های خشکسالی، لازم است در هر منطقه، شاخص‌های مهم و مؤثرتری انتخاب شود تا با تلفیق آنها مدل مناسبی برای پیش‌ارزیابی خشکسالی ارائه شود. بدین منظور در این پژوهش ۱۳ شاخص که طبق تحقیقات قبلی به‌عنوان شاخص‌های کارایی معرفی شده بودند، استفاده شد و از طریق روش جنگل تصادفی تجزیه و تحلیل گردید. SPI با مقیاس‌های زمانی مختلف به‌عنوان شاخص هدف و رطوبت خاک، عملکرد محصول و SPEI

و بارش را مناسب‌تر از شاخص‌هایی مانند SPI می‌دانند. در مرحله بعد، با استفاده از معادلات DVI و DHI، نقشه خسارت برای دوره معین از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ تولید شد. متغیرهای آسیب‌پذیری نیز در منطقه شناسایی و نقشه خسارت با استفاده از DHI و DVI به دست آمد. نتایج نقشه خسارت نشان داد که دو شهرستان در معرض خسارت خشکسالی خیلی‌شدید، چهار شهرستان در معرض خسارت زیاد و چهار شهرستان در معرض خطر خشکسالی متوسط و کم قرار دارند. در مجموع نتایج حاصل از ارزیابی خطر خشکسالی هواشناسی نشان داد که در استان ایلام ۲۶ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در کلاس خطر شدید خشکسالی و ۴۵ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در کلاس خیلی‌شدید خطر خشکسالی قرار دارد. مدل خطر خشکسالی که مبتنی بر متغیرهای اجتماعی-اقتصادی است می‌تواند به کاهش اثرهای خشکسالی در استان ایلام و سایر مناطق با شرایط مشابه کمک کند. همچنین بر اساس این مدل می‌توان شهرستان‌های با آسیب‌پذیری بالا را شناسایی کرد تا برنامه‌های مدیریتی به‌موقع برای بهبود وضعیت ارائه شود. همچنین در این تحقیق مشخص شد که تصاویر ماهواره‌ای با دقت بالا می‌توانند نقش بسیار مهمی در پیش، ارزیابی و مدل‌سازی خشکسالی ایفا کنند. با این حال، در این مطالعه محدودیت‌هایی وجود دارد که باید در آینده بهبود یابد، از جمله اینکه دوره آماری نمونه‌های عملکرد محصول محدود بود و ارزیابی خطر خشکسالی، تغییرات آب و هوایی را در نظر نگرفت. مطالعات آینده می‌تواند بر چگونگی تأثیر تغییرات آب و هوایی بر خطر خشکسالی، آسیب‌پذیری یا خطر خشکسالی تمرکز کند. در این مطالعه از تکنیک جنگل تصادفی استفاده شد، اما در کارهای آینده می‌توان مقایسه‌ای بین جنگل تصادفی و سایر مدل‌ها مانند درختان تصمیم‌گیری کرد.

(۲۰۰۸)، Wardlow و همکاران (۲۰۱۲)، Park و همکاران (۲۰۱۶)، Luetkemeier و همکاران (۲۰۱۷) و Sahana و همکاران (۲۰۲۱) با ادغام شاخص‌های مختلف و مدل‌سازی خشکسالی بیان کردند که ترکیب شاخص‌ها در ارزیابی و پیش‌بینی خشکسالی کارایی بهتری نسبت به شاخص‌های منفرد دارد.

نتایج حاصل از ارزیابی اهمیت نسبی متغیرهای مورد استفاده از طریق جنگل تصادفی، در مجموع شش شاخص را به‌عنوان شاخص‌های مهم معرفی کرد. شاخص‌های LST و ET در دوره‌های کوتاه‌تر خشکسالی اهمیت بیشتری داشتند که با مطالعه Jia و Zhang (۲۰۱۳) مطابقت دارد. همچنین در مطالعات Rhee و همکاران (۲۰۱۰) و مطالعات Park و همکاران (۲۰۱۶) نیز شاخص LST یکی از شاخص‌های مؤثر در ارزیابی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت معرفی شده است. مهمترین دلیل ارتباط بالای خشکسالی کوتاه‌مدت و شاخص‌هایی مانند LST و ET تغییر سریع شرایط سطح زمین است، بعد از رویداد خشکسالی دمای سطح زمین و تبخیر و تعرق نسبت به شاخص‌های مربوط به پوشش گیاهی سریع‌تر واکنش نشان می‌دهند. مهمترین دلیل همبستگی زیاد بین خشکسالی کوتاه‌مدت و شاخص‌هایی مانند LST و ET تغییر سریع شرایط سطح زمین است. شرایط سطح زمین پس از رویداد خشکسالی، دمای سطح زمین و تبخیر و تعرق واکنش سریع‌تری نسبت به شاخص‌های پوشش گیاهی نشان می‌دهند، از سوی دیگر، شاخص‌های پوشش گیاهی مانند NDVI با افزایش دوره خشکسالی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند که با نتایج Gessner و همکاران (۲۰۱۳)، Piao و همکاران (۲۰۰۳) و Park و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی دارد. همچنین مشاهده شد که یکی از عوامل مؤثر دیگر در شدت خشکسالی در منطقه مورد مطالعه، ارتفاع از سطح دریاست. در ارتفاعات، بارندگی بیشتر و خشکسالی کمتر بود. تأثیر ارتفاع بر میزان خشکسالی نیز در مطالعه Shen و همکاران (۲۰۱۹) تأیید شده است و آنان بیان کردند که مدل ترکیبی ساخته شده از فاکتورها و پارامترهای مختلف مانند پوشش گیاهی، ارتفاع

منابع مورد استفاده

- Basin in The Central American Dry Corridor. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4):386. <https://doi.org/10.3390/jmse9040386>, (In Persian with English summary).
- Kim, H., Park, J., Yoo, J. and Kim, T.W., 2015. Assessment of drought hazard, vulnerability, and risk: a case study for administrative districts in South Korea. *Journal of Hydro-environment Research*, 9(1):28–35. doi:<https://digitalcommons.unl.edu/droughtnetnews/80>.
 - Kogan, F.N., 1993. United States droughts of late 1980's as seen by NOAA polar orbiting satellites. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1:197-199.
 - Liaw, A. and Wiener, M., 2002. "Classification and Regression by randomForest." *R News*, 2(3): 18-22. <https://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>.
 - Lin, M.L., Chu, C.M. and Tsai, B.W., 2011. Drought risk assessment in western Inner-Mongolia. *International Journal of Environmental Research*, 5 (1): 139-148.
 - Jia, H. and Wang, D. P. J., 2016. Risk mapping of integrated natural disasters in China. *Natural Hazards*, 80(3): 2023–2035. <http://doi.org/10.1007/s11069-015-2057-3>.
 - Lin, Y.C., Kuo, E.D. and Chi, W.J., 2021. Analysis of meteorological drought resilience and risk assessment of groundwater using signal analysis method. *Water Resources Management*, 35: 179–197.
 - Luetkemeier, R., Stein, L., Drees, L. and Liehr, S., 2017. Blended drought index: Integrated drought hazard assessment in the Cuvelai-Basin. *Climate*, 5 (3): 51, <https://doi.org/10.3390/cli5030051>.
 - Madadi, G., Mostafavi, A. and Khosravani, F., 2016. Estimation of soil moisture changes in agriculture using GLDAS data, a case study: Ilam Province, 7th National Conference on Sustainable Agriculture and Natural Resources. Tehran, 7 July. 2016. <https://civilica.com/doc/636155>. (In Persian with English summary).
 - McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17 (22): 179-183.
 - Mizell, H., 2008. Improving drought detection in the Carolinas: Evaluation of local, state, and federal drought indicators. Ph.D. thesis, University of South Carolina.
 - Nasrollahi, M., 2018. Assessment of drought hazard, vulnerability and risk (case study: Semnan province). M.Sc. Thesis, Faculty of Natural Resources, University of Tehran (In Persian with English summary).
 - AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F.S., Teixeira, J., Anderson, M.C., Wardlow, B.D. and Hain, C.R., 2015. Remote sensing of drought: progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 53 (2): 452–480 (In Persian with English summary).
 - Azizi, Q. and Safarkhani, E., 2010. Evaluation of drought and its effect on rainfed wheat yield in Ilam province with emphasis on recent droughts (2000-2001). *Space Planning and Arrangement*, 6 (2): 77-61 (In Persian with English summary).
 - Dabanli, I.J.N.H., 2018. Discussions, E.S.S. Drought Risk Assessment by Using Drought Hazard and Vulnerability Indexes. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*. 1–15.
 - Dai, A., 2011. Erratum: drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2 (1): 45–65.
 - Dutra, E., Giuseppe, F.D., Wetterhall, F. and Pappenberger, F., 2013. Seasonal forecasts of droughts in African basins using the Standardized Precipitation Index. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(6): 2359-2373 doi:10.5194/hess-17-2359-2013.
 - 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.
 - Gessner, U., Naeimi, V., Klein, I., Kuenzer, C., Klein, D. and Dech, S., 2013. The relationship between precipitation anomalies and satellite-derived vegetation activity in Central Asia. *Global and Planetary Change*, 110: 74-87, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.09.007>.
 - 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 central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34 (6).
 - Hayes, M., Svoboda, M., Le Comte, D., Redmond, K. T. and Pasteris, P., 2005. Drought monitoring: New tools for the 21st century. *Drought and water crises: Science, technology, and management issues*, 53: 69- 80.
 - Huete, A.R., Post, D.F. and Jackson, R.D., 1984. Soil spectral effects and 4-space vegetation discrimination. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 15 (2):155-165.
 - Khoshnazar, A., Corzo Perez, G.A. and Diaz, V., 2021. Spatiotemporal drought risk assessment considering resilience and heterogeneous vulnerability factors: Lempa Transboundary River

- advancement of retro gradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD. 371.
- Sahana, V., Mondal, A. and Sreekumar, P., 2021. Drought vulnerability and risk assessment in India: Sensitivity analysis and comparison of aggregation techniques. *Journal of Environmental Management*, 299(113689): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113689>
 - Shahid, S. and Behrawan, H., 2008. Drought risk assessment in the western part of Bangladesh. *Natural Hazards* 46: 391-413 (In Persian with English summary).
 - Sebaghti, M., Ahmadi, H. and Moghadam, A. 2016. Calculating the duration and severity of drought by means of modified SPEI index (case study: Tabriz and Urmia cities). *Environment and Water Engineering*, 2(2): 188-195 (In Persian with English summary).
 - Shen, R., Huang, A., Li, B. and Guo, J., 2019. Construction of a drought monitoring model using deep learning based on multi-source remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79: 48-57.
 - Svoboda, M., 2000. An introduction to the drought monitor. *Drought Network News*. 80: 1994-2001.
 - United Nation Development Program., 2004. Reducing disaster risk, A challenge for development. United Nation Development Program/Bureau for Crisis Prevention and Recovery, New York: oxford university press at <http://www.undp.org/bcpr/disred/rdr.htm>.
 - Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. and López-Moreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23 (7): 1696-1718.
 - Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., Gimeno, L., Eklundh, L., Giuliani, G., Weston, D. and Pegram, G.G., 2012. Challenges for drought mitigation in Africa: The potential use of geospatial data and drought information systems. *Applied Geography*, 34: 471-486.
 - Wang, L. and Qu, J.J., 2007. NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters*. 34 (20).
 - Wardlow, B.D., Anderson, M.C. and Verdin, J.P., 2012. Remote sensing of drought: Innovative monitoring approaches. CRC Press.
 - Waseem, M., Ajmal, M. and Kim, T.W., 2015. Development of a new composite drought index for multivariate drought assessment. *Journal of Hydrology*, 527: 30-37. (English summary).
 - Nezlin, N., Kostianoy, A. and Li, B.L., 2005. Inter-annual variability and interaction of remote-sensed vegetation index and atmospheric precipitation in the Aral Sea region. *Journal of Arid Environment*, 62 (4): 677-700.
 - Park, S., Im, J., Jang, E. and Rhee, J., 2016. Drought assessment and monitoring through blending of multi-sensor indices using machine learning approaches for different climate regions. *Agricultural and forest meteorology*, 216: 157-169. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.011>.
 - Paulo, A.A., Rosa, R.D. and Pereira, L.S., 2012. Climate trends and behaviour of drought indices based on precipitation and evapotranspiration in Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 12(5): 1481-1491, doi:10.5194/nhess-12-1481-2012.
 - Piao, S., Fang, J., Zhou, L., Guo, Q., Henderson, M., Ji, W. and Tao, S., 2003. Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D14), Doi:<https://doi.org/10.1029/2002JD002848>.
 - Poortaheri, M., Eftekhari, A. and Kazemi, N., 2013. The role of drought risk management approach in reducing social—economic vulnerability of farmers and rural regions case study: Sulduz Rural District, Azerbaijan Gharbi. *Journal of Rural Research*, 4(1):1-12 (In Persian with English summary).
 - Proodhan, F.A., Jiahua, Z., Fengmei, Y., Lamei, S.H., Til, P., Pangali, S.H., Da, Z.H., Dan, C., Minxuan, Zhe., Naveed, A. and Hasiba, P.M., 2021. Deep learning for monitoring agricultural drought in South Asia using remote sensing data. *Remote Sensing*, 13(9): 1715. <https://doi.org/10.3390/rs13091715>. (In Persian with English summary).
 - Prasad, A.M., Iverson, L.R. and Liaw, A., 2006. Newer classification and regression tree techniques: bagging and random forests for ecological prediction. *Ecosystems*, 9 (2): 181-199.
 - Rajsekhar, D., Singh, V. P. and Mishra, A. K., 2015. Integrated drought causality, hazard, and vulnerability assessment 20 for future socioeconomic scenarios: An information theory perspective. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 120: 6346-6378. <http://doi.org/10.1002/2014JD022670>.
 - Rhee, J., Im, J. and Carbone, G.J., 2010. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor. remote sensing data. *Remote Sensing Environment*, 114 (12): 2875-2887.
 - Rouse, J.W., 1974. Monitoring the vernal

- <https://doi.org/10.1029/2017WR021959>.
- Zhang, A. and Jia, G., 2013. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote Sensing Environment*, 134: 12-23, Doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.023>.
 - Yin, J., Zhan, X., Hain, C.R., Liu, J. and Anderson, M.C., 2018. A method for objectively integrating soil moisture satellite observations and model simulations toward a blended drought index. *Water Resources Research*, 54 (9): 6772-6791, Doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.044>.

Assessment of drought risk using multi-sensor drought indices and vulnerability factors: A case study of Ilam Province

Z. Heidarizadi¹, M. Ownegh^{2*} and CH B. Komaki³

1- Ph.D. Student of Combat Desertification, Faculty of Rangeland and watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2*-Corresponding author, Professor, Faculty of Rangeland and watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: mownegh@yahoo.com

3- Assistant Professor, Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 06/13/2022

Accepted: 08/17/2022

Abstract

Drought is an unpleasant climatic phenomenon that directly affects different dimensions of human societies. It is necessary to design and develop an integrated approach to more effectively control this phenomenon and provide early warnings to know and choose the right management decision. Here, twelve various remotely sensed indices of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and digital elevation model (DEM) were used to monitor drought during the 2000–2018 growing season. The Standardized Precipitation Index (SPI) with time scales of 1 to 12 months was used as reference data. The relations between thirteen indices and SPI with different time scales were modulated using a machine-learning approach. The random forest technique was used to construct a comprehensive drought monitoring model in Ilam Province. Validation data were provided based on relative soil moisture, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), and crop yield data were used to validate the model. It was observed that random forest produced good applicability ($R^2 = 0.88$) for SPI prediction. In the next step, the Drought Hazard Index (DHI) was generated based on the probability occurrences of drought using the comprehensive drought model which was made in the previous step. The Drought Vulnerability Index (DVI) was calculated using seven socioeconomic indices. Finally, the Drought Risk Index (DRI) was obtained by multiplying DHI and DVI for Ilam province. The result of the DRI map showed that two counties are at very high risk of drought, four counties are at high risk, and four counties are at moderate and low risk of drought. Overall, the result of our study provides a comprehensive method for assessing regional drought. Also, based on this model, counties with high vulnerability can be identified to provide timely management programs to help improve the situation.

Keywords: Ilam province, random forest, risk management, SPI.