



پایش خشکسالی با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس (MODIS) در مناطق خشک مطالعه موردی مراتع استان اصفهان

لیلا فاضل دهکردی: فارغ‌التحصیل دکتری تخصصی مرتعداری، دانشگاه تهران، تهران، ایران

طیبه السادات سهرابی: دانشجوی دکتری تخصصی بیابانزدایی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران*

محمد حسین فناویزباف: فارغ‌التحصیل کارشناسی زبان، تهران، ایران

رضا قضاوی: دانشیار گروه مرتع و آبخیز، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

وصول: ۱۳۹۴/۴/۲۱ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۲، صص ۱۹۰-۱۷۷

چکیده

خشکسالی پدیده‌ای طبیعی و اقلیمی است که همه‌ساله گریبان‌گیر مناطق وسیعی در سراسر دنیا می‌شود و وقوع آن امری اجتناب‌ناپذیر است. این پدیده موجب اختلال در زیست‌بوم (اکوسیستم) می‌شود. زیست‌بوم‌های مرتعی مناطق خشک که بخش چشمگیری از سرزمین ما نیز در قلمرو آن قرار دارد، در مجموع نظام‌های شکننده‌ای هستند که در برابر تغییرات اقلیمی به‌سادگی در معرض انهدام قرار می‌گیرند؛ بنابراین، شناخت و پایش خشکسالی با شاخص‌های معتبر، اولین قدم به‌منظور مدیریت این پدیده محسوب می‌شود. پایش خشکسالی همان ارائه اطلاعات به‌نگام از دوام، شدت و توسعه جغرافیایی خشکسالی در یک ناحیه است که با استفاده از سیستم‌های سنتی مرسوم دشوار است. فن‌آوری سنجنش از دور، با وجود عمر کوتاه خود، به‌همراه سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، توانایی خود را در ارائه اطلاعات سودمند و به‌موقع درباره پدیده خشکسالی نشان داده است. پژوهش حاضر در مراتع استان اصفهان و به‌منظور پایش خشکسالی انجام شده است. در این پژوهش سعی شده است از شاخص‌های NDVI، EVI، NMDI، LST و TCI مستخرج از اطلاعات سنجنده مودیس و اطلاعات بارندگی ایستگاه‌های هواشناسی محدوده استفاده شود. نظر به مقایسه رابطه بین شاخص‌های ماهواره‌ای و شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین کارایی شاخص‌های ماهواره‌ای، به‌منظور برآورد شاخص اقلیمی SPI، آمار بارندگی ماهانه نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی به تیپ‌های مرتعی مورد مطالعه در دوره زمانی ۲۰۰۸-۲۰۰۰ به‌کار گرفته شد. برای استخراج شاخص‌های ماهواره‌ای تصاویر سنجنده مودیس با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر، فاصله زمانی برداشت ۸ روز برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ و در ماه‌های فوریه تا سپتامبر یعنی ماه‌های رشد، قبل و بعد از آن تهیه شد. با توجه به متفاوت بودن بازه زمانی اطلاعات بارندگی و تصاویر ماهواره‌ای، بازه مشترک مقایسه شاخص سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۰ در نظر گرفته شد. اطلاعات سایر سال‌ها به‌منظور بررسی صحت نتایج به‌کار رفت. نتایج شاخص خشکسالی SPI در سایت‌های مرتعی استان اصفهان طی دوره زمانی ۲۰۰۷-۲۰۰۰ با در نظر گرفتن اطلاعات بارندگی ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در بازه زمانی مختلف نشان داد سال ۲۰۰۰ خشکسالی شدید، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ ترسالی در محدوده‌های مورد مطالعه رخ داده است. بررسی شاخص در بازه‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه نشان داد نوسانات خشکسالی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت در مقایسه با بازه‌های زمانی بلندمدت بیشتر است؛ اما از تداوم کمی برخوردارند. به‌همین دلیل، در بازه زمانی کوتاه‌مدت تعداد وقوع خشکسالی در ماه بیشتر از سایر بازه‌های زمانی است. با توجه به ارتباط خشکسالی و بارندگی، بررسی نتایج شاخص خشکسالی هواشناسی و مقادیر بارندگی نشان داد شاخص خشکسالی در بازه زمانی سه و نه‌ماهه با مقادیر بارندگی در سطح یک درصد همبستگی معنادار دارند. به‌عبارت دیگر، تغییرات مقادیر بارش ماهانه بر روند تغییرات شاخص SPI در بازه زمانی کوتاه‌مدت مؤثر است. مقایسه آماری بین نتایج به‌دست‌آمده از محاسبه شاخص‌های ماهواره‌ای با شاخص خشکسالی هواشناسی نشان داد شاخص SPI در بازه کوتاه‌مدت با شاخص‌های حرارتی و شاخص NMDI در سطح یک‌درصد بیشترین همبستگی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پایش خشکسالی، سنجنده مودیس، مراتع استان اصفهان، شاخص اقلیمی

مقدمه

شاخص‌ها به اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی وابسته‌اند و ایستگاه‌ها اغلب با فاصله مکانی زیادی از هم توزیع شده‌اند، این مسئله بر قابلیت اعتماد این شاخص‌ها تأثیر منفی خواهد داشت. از این‌رو، شاخص‌های ماهواره‌ای نظر به دارا بودن قدرت مکانی و زمانی بالا و امکان بررسی شرایط مختلف استفاده شده‌اند.

شروع استفاده از فن‌آوری سنجنش از دور برای پایش خشکسالی به کاربرد آن در استخراج اطلاعات از پوشش گیاهی زمین باز می‌گردد. یک‌مرتبه کالیبره کردن اطلاعات ماهواره‌ای با واقعیت زمینی، امکان استفاده از داده‌ای ماهواره‌ای برای پایش شروع خشکسالی، واکنش پوشش گیاهی به خشکسالی و بهبود پس از استرس را فراهم می‌کند (Unganai & Kogn, 1998). در دهه‌های اخیر مدل‌های زیادی در رابطه با پایش خشکسالی ارائه شده است که عموماً بر پایه شاخص‌های گیاهی، دمای سطح زمین، محتوای آب گیاه و وضعیت گیاه است. برخی از مدل‌ها عبارت‌اند از: شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)^۱

شاخص VCI و NDVI (Gileston, 1998),^۲

شاخص نسبت LST به NDVI (et al., 1998),^۳

شاخص NDWI (Bayarjargal et al., 2006),^۴

شاخص NDVI، NDWI، LST/NDVI و

VTCI (پرویز و همکاران، ۱۳۹۰).^۵

خشکسالی عمده‌ترین مشکل مناطق خشک و نیمه‌خشک است و تنوع بسیار زیاد در زمان و مکان وقوع خشکسالی، کار تشخیص دقیق وقوع آن را بر اساس مشاهدات مکانی سخت و پیچیده می‌کند (Lin et al., 2011). خشکسالی حادثه‌ای طبیعی است که بر اقتصاد، کشاورزی و جنبه‌های اجتماعی جامعه اثر می‌گذارد. این پدیده تدریجی است، به‌گونه‌ای که آغاز و پایان آن معلوم نیست. تداوم آن ممکن است از چندین ماه تا چندین سال طول بکشد و مساحت تحت پوشش آن در طول زمان تغییر کند، به‌همین دلیل نیاز به پایش آن بیشتر احساس می‌شود (Bhuiyan, 2004). منظور از پایش خشکسالی ارائه اطلاعات بهنگام از دوام، شدت و توسعه جغرافیایی خشکسالی در یک ناحیه به‌منظور اتخاذ اقدامات مناسب برای مقابله با آثار زیانبار خشکسالی است. در دهه‌های گذشته معمولاً تحلیل خشکسالی به‌صورت توصیفی انجام می‌گرفت و کمتر به تحلیل کمی پرداخته می‌شد (Karel et al., 1984). اصولاً برای تحلیل کمی خشکسالی، وجود یک شاخص مشخص برای تعیین دقیق دوره‌های مرطوب و خشک بسیار ضروری است (Silva, 2003). شروع استفاده از شاخص‌های جامع را می‌توان با شاخص‌هایی که پالمر در سال ۱۹۶۵ معرفی کرد، دانست. شاخص‌های هواشناسی با در نظر گرفتن پارامترهای هواشناسی مانند میزان بارش، رطوبت و دما، خشکسالی تعریف می‌کنند (Seiler et al., 1998). نظر به اینکه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی تنها برای یک محل معتبر هستند و قدرت تفکیک مکانی لازم را برای ارزیابی خشکسالی ندارند، همچنین این

¹ Vegetation Condition Index

² Normalized Difference Vegetation Index

³ Land Surface Temperature

⁴ Normalized Difference Water Index

⁵ Vegetation Temperature Condition Index

سنجنده مودیس به منظور ارزیابی خشکسالی در محدوده مراتع استان اصفهان و مقایسه آن با شاخص خشکسالی اقلیمی پرداخته است.

مواد و روش‌ها

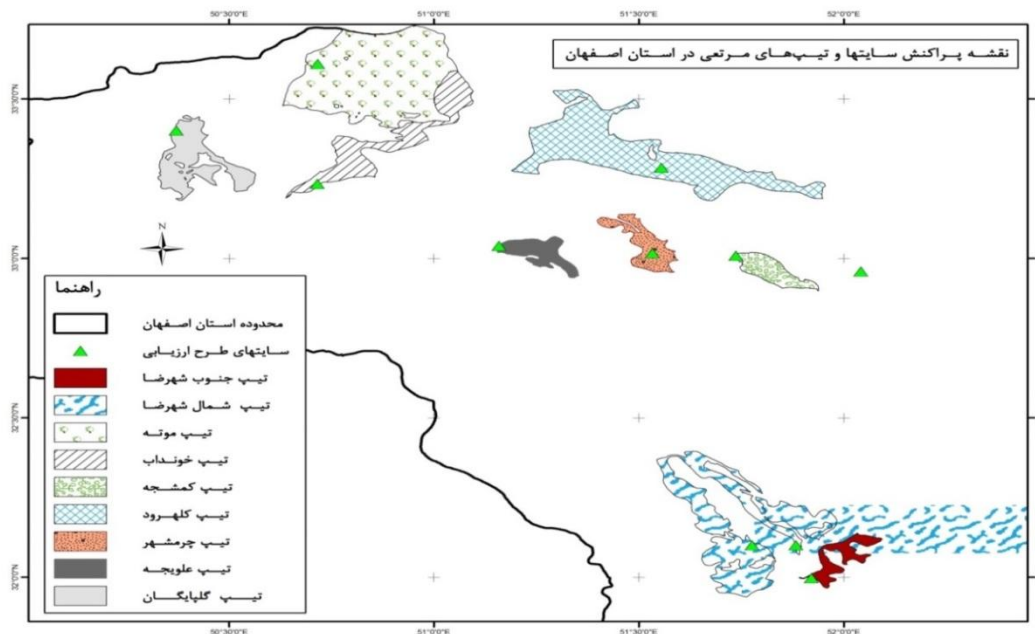
محدوده مورد مطالعه

از بیش از ۱۰ میلیون هکتار وسعت استان اصفهان، حدود ۶۳ میلیون هکتار را مراتع تشکیل می‌دهد که به طور عمده از سه منطقه رویشی نیمه‌بیابانی با وسعت ۴۹۶۶۰۰۰ هکتار (۴۹٪ سطح استان)، منطقه رویشی استپی با وسعت ۳۷۸۰۰۰۰ (۳۷٪) و منطقه رویشی نیمه‌استپی با وسعت ۱۳۸۶۰۰۰ هکتار (۱۴٪ سطح استان) تشکیل شده است. منطقه استپی دومین رویشگاه عمده استان است و از این رو تیپ‌های مرتعی مورد مطالعه در محدوده مراتع استپی انتخاب شده‌اند. محدوده مورد مطالعه در ۵۰ درجه و ۲۲ دقیقه و ۱۶ ثانیه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۳۶ دقیقه و ۳۴ ثانیه عرض شمالی واقع است. متوسط ارتفاع آن ۱۷۴۸ متر است. شکل (۱) پراکنش تیپ‌های مرتعی در استان اصفهان را نشان می‌دهد. با توجه به اهمیت تیپ از نظر پوششی و تولید و وسعت، تیپ‌های عمده بازدید و در مجموع تعداد ۱۰ تیپ عمده انتخاب شد. در کل استان اصفهان، ۱۱ سایت مرتعی به منظور جمع‌آوری اطلاعات با هدف بررسی علل روند تغییرات در طرح ارزیابی انتخاب و آماربرداری در آن‌ها طی سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۴ صورت گرفت. زمان آماربرداری فصل رشد و طی ماه‌های اردیبهشت تا تیر (آوریل - ژوئیه) در نظر گرفته شده بود و اطلاعات پوشش گیاهی بر اساس گونه‌های مرتعی و فرم رویشی و همچنین تولید علوفه در هر سال برداشت می‌شد. فصل رشد براساس عرض

از آنجایی که امروزه سنجنده‌های متعددی در مطالعات پایش خشکسالی به کار می‌روند، در مطالعه حاضر از اطلاعات سنجنده مودیس استفاده شد، زیرا در مقایسه با سنجنده‌های دیگر، سنجنده مودیس با داشتن باندهای مختلف و طیف الکترومغناطیسی بالقوه برای نظارت بر خشکسالی مناسب‌تر است (Ceccato, Gao, 1996, et al., 2001). از این‌رو، از سال ۲۰۰۰ پس از کسب اولین داده‌های ماهواره‌ای از این سنجنده، استفاده از اطلاعات آن به منظور ارزیابی و پایش خشکسالی مد نظر قرار گرفت. دامنه وسیعی از شاخص‌های مبتنی بر داده‌های مودیس برای نظارت بر خشکسالی در مناطق کشاورزی و نیمه‌خشک تاکنون ارائه شده است (Caccamo et al., 2011).

(Huete et al., 2002), Justice et al., (2002), Park, Gu et al., (2007), Thenkabail et al (2004), et al., (2008), Rahimzadeh et al., (2009), et al., (2011), Sehgal (2010) & Chakraborty et al., (2012), Murad یگانه و خواجه‌الدین (۱۳۹۰) و (2012) Alwesabi، همگی با استفاده از شاخص‌های متعدد محاسبه شده حاصل از تصاویر سنجنده مودیس اقدام به ارزیابی و پایش خشکسالی کردند و نتایج پژوهش‌های آنها نشان داده است که اطلاعات این سنجنده برای تعیین خشکسالی مناسب است. با در نظر داشتن نتایج مطالعات صورت گرفته تاکنون و همچنین با توجه به حساسیت و شکنندگی اقلیم مناطق خشک و نیمه‌خشک و اهمیت ارزیابی خشکسالی در این اقلیم، با علم به نبود اطلاعات هواشناسی در کلیه مناطق با توزیع زمانی مناسب، پژوهش حاضر به بررسی شاخص‌های NDVI، NDMI، EVI، LST و TCI مستخرج از اطلاعات

جغرافیایی منطقه، ویژگی‌های آب و هوایی و نیز نوع پوشش گیاهی تعیین می‌شود. (طرح ملی ارزیابی مراتع)



شکل ۱. پراکنش سایت‌ها و تیپ‌های مرتعی استان اصفهان

ترسیم‌کنندگان: نویسندگان

تاجی، تراکم، تولید، زادآوری و پوشش سطح خاک در زمان آمادگی مرتع در طول چهار ترانسکت ۴۰۰ متری در ۶۰ پلات دو مترمربعی اندازه‌گیری شد. جدول (۱) خلاصه اطلاعات سایت‌های مرتعی مورد مطالعه در استان اصفهان را نشان می‌دهد.

پراکنش سایت‌های مرتعی با توجه به تیپ‌های مرتعی استان و عمدتاً در نواحی شمال غرب و غرب آن به چشم می‌خورد. با توجه به نحوه پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی از بین سایت‌های استان، هفت سایت انتخاب و هر ساله عوامل مربوط به پوشش

جدول ۱. اطلاعات سایت‌های مورد مطالعه استان اصفهان

نام سایت	ارتفاع (m)	اقلیم (دومارتن)	پوشش (%)	تولید (Kg/ha)	تیپ گیاهی
علویجه	۱۶۰۰	خشک سرد	۵/۴۱	۵۸/۶	Artemisia sieberi- Anabasis aphylla
خونداب	۱۹۹۵	نیمه خشک	۱۸/۰۲	۱۶۰/۴	Artemisia sieberi
گلپایگان	۱۷۳۵	نیمه خشک	۷/۶۳	۱۸۳/۶	Lactuca orientalis- Cousinia cylindrica
موته	۱۷۴۰	خشک	۱۰/۱۷	۱۶۴/۴	Artemisia sieberi
کلهرود	۱۸۹۵	خشک	۱۰/۹۹	۱۳/۹	Artemisia sieberi- Lactuca orientalis
کمشچه	۱۵۵۰	خشک	۲/۵	۱۲۳/۳	Noaea mucronata- Cousinia cylindrica
غرب شهرضا	۱۷۲۰	خشک سرد	۵/۸۸	۷۰/۷	Cousinia cylindrica- Lactuca orientalis

اطلاعات مورد استفاده

منابع مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل نقشه توپوگرافی، پوشش گیاهی، اطلاعات ماهواره‌ای سنجنده مودیس و اطلاعات بارندگی ایستگاه‌های هواشناسی محدوده است.

نظر به مقایسه رابطه بین شاخص‌های ماهواره‌ای و شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین کارایی شاخص‌های ماهواره‌ای، به منظور برآورد شاخص اقلیمی SPI آمار بارندگی ماهانه نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی به تیپ‌های مرتعی مورد مطالعه در دوره زمانی ۲۰۰۸-۲۰۰۰ به کار گرفته شد. برای استخراج شاخص‌های ماهواره‌ای تصاویر سنجنده مودیس با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر، فاصله زمانی برداشت ۸ روز برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ و در ماه‌های فوریه تا سپتامبر یعنی ماه‌های رشد، قبل و بعد از آن تهیه شد. با توجه به متفاوت بودن بازه زمانی اطلاعات بارندگی و تصاویر ماهواره‌ای، بازه مشترک مقایسه شاخص سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۰ در نظر گرفته شد. اطلاعات سایر سال‌ها به منظور بررسی صحت نتایج به کار رفت. از آنجا که تصاویر ماهواره‌ای دارای سیستم مختصات سینوسوئیدال هستند، سیستم مختصات آن‌ها به جغرافیایی تغییر داده شد تا همخوانی لازم با نقشه توپوگرافی وجود داشته باشد. سپس با استفاده از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰، محدوده استان اصفهان از کل تصویر جدا و سپس اقدام به محاسبه شاخص‌ها شد. با توجه به اینکه هدف مطالعه محدوده‌های مرتعی منتخب است، از روی نقشه پوشش گیاهی با استفاده از اطلاعات سایت‌های مرتعی طرح ملی ارزیابی به عنوان مناطق

کلید، تیپ‌های مرتعی مرتبط با سایت جدا و به صورت پلی‌گون آماده شدند. سپس بر اساس مرز تیپ‌ها شاخص‌های ماهواره‌ای از کل استان مجزا شدند. کلیه مراحل پردازش تصاویر و جدا کردن شاخص‌ها با نرم‌افزار ENVI و تهیه نقشه‌های مرز استان و تیپ گیاهی با نرم‌افزار Arc Map انجام شد. شاخص‌های محاسبه شده در سه گروه شاخص‌های پوشش گیاهی، شاخص محتوای آب گیاه و شاخص‌های حرارتی دسته‌بندی می‌شوند. شاخص‌های گیاهی ترکیبی از بازتابش سطح در دو یا چند باند هستند که برای برجسته کردن یک خصوصیت گیاه به کار می‌روند. بیش از ۱۵۰ شاخص گیاهی در منابع علمی ذکر شده است، ولی تنها بخش اندکی از آن‌ها دارای اساس بیوفیزیکی هستند. مهم‌ترین این شاخص‌ها، شاخص‌های مبتنی بر باند مادون قرمز و مادون قرمز نزدیک است. در محاسبه این شاخص‌ها از محدوده مادون قرمز در ۸۰۰ نانومتر، باند قرمز در ۶۸۰ نانومتر و باند آبی در ۴۵۰ نانومتر استفاده می‌شود. کاهش غلظت در کلروفیل یا سطح برگ، کاهش در گستره شاخ و برگ و تغییرات در ساختار تاج پوشش می‌تواند به کاهش بازتابش در محدوده مادون قرمز و افزایش بازتابش در محدوده قرمز بینجامد. از میان شاخص‌های این گروه، شاخص NDVI و EVI شناخته شده‌تر از سایرین است. شاخص NDVI را اولین بار توکر در سال ۱۹۷۹ به عنوان شاخص سلامت و تراکم پوشش گیاهی پیشنهاد کرد. Huete در سال ۱۹۹۷، شاخص EVI را به منظور بهبود شاخص NDVI و با هدف کاهش تأثیرات جوئی، از جمله مواد معلق (گرد و

رطوبت خاک و پوشش گیاهی حساس‌اند، (Wang, 2007). برای محاسبه شاخص‌های حرارتی نیز، از رابطه معکوس دمای سطح و شادابی گیاه برای بررسی شرایط گیاه و در نتیجه خشکسالی استفاده می‌شود. دمای سطحی در مناطق با پوشش گیاهی متراکم، کمتر از مناطق بدون پوشش گیاهی است و با افزایش تراکم گیاه، اختلاف دمایی بیشتر می‌شود. دو باند حرارتی ۳۱ و ۳۲ سنجنده مودیس قادر به نشان دادن میزان دمای سطح است، شاخص TCI را برای اولین بار Kogan (1995) و با هدف پایش خشکسالی از طریق باندهای حرارتی معرفی کرد. جدول (۲) نحوه محاسبه شاخص‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

خاک) و مایعات ارائه کرد. برای محاسبه شاخص‌های محتوای آب گیاه نیز از طول موج‌هایی در ناحیه مادون قرمز با طول موج کوتاه SWIR استفاده می‌کنند که باندهای جذب آب با مرکزیت ۱۴۵۰، ۱۵۰۰ و ۱۹۵۰ نانومتر در آن قرار دارند. استفاده از این شاخص‌ها را اولین بار Tucker در سال ۱۹۸۰ انجام داد و آن‌ها را برای محاسبه به‌وسیله باندهای مادون قرمز با طول موج کوتاه MODIS و باند ۵ سنجنده ETM + پیشنهاد داد (Dealwise, 2007); شاخص استفاده‌شده در پژوهش حاضر از این گروه شاخص خشکسالی چندباندی نرمال‌شده یا همان (NMDI) است. شاخص NMDI از تفاوت بین دو باند جذب آب (۱/۶۴ و ۲/۱۳ میکرومتر) محاسبه می‌شود که به

جدول ۲. نحوه محاسبه شاخص‌های ماهواره‌ای

مرجع	فرمول محاسبه شاخص	نام شاخص
1973, Rouse	$NDVI = \frac{B_{NIR} - B_{RED}}{B_{NIR} + B_{RED}}$	NDVI
1997, Huete	$EVI = 2.5 * \left(\frac{B_{NIR} - B_{RED}}{B_{NIR} + 6B_{RED} - 7.5B_{BLUE} + 1} \right)$	EVI
2007, Wang	$NMDI = \frac{B_2 - (B_6 - B_7)}{B_2 + (B_6 - B_7)}$	NMDI
MODIS	به‌دست آمده از محصولات دمای سطحی	LST
1995, Kogan	$TCI_{ijk} = \frac{LST_{ijk} - LST_{i \min}}{LST_{i \max} - LST_{i \min}}$	TCI

شاخص^۱ SPI

شاخص استاندارد بارش یکی از شاخص‌های اساسی در مطالعه خشکسالی به‌شمار می‌آید که

بازتابش BRED، BNIR در محدوده قرمز و مادون قرمز و B3، B1 و B4 باندهای ۱، ۳ و ۴ سنجنده مودیس، LST باندهای ۳۱ و ۳۲.

¹ Standardized Precipitation Index

بارندگی برای تیپ‌های مرتعی از میانگین اطلاعات ایستگاه‌ها باران‌سنجی هم‌تراز تیپ‌ها استفاده شد. جدول (۳) طبقه‌بندی شرایط اقلیمی را بر اساس شاخص SPI نشان می‌دهد.

جدول ۳. طبقه‌بندی دوره‌های خشکسالی و ترسالی براساس شاخص SPI

ترسالی بسیار شدید	۲ و بیشتر
خیلی مرطوب	۱/۵ تا ۱/۹۹
ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹
تقریباً نرمال	۰/۹۹- تا ۰/۹۹
خشکسالی متوسط	-۱ تا -۱/۴۹
خشکسالی شدید	-۱/۵ تا -۱/۹۹
خشکسالی بسیار شدید	-۲ و کمتر

نتایج

نتایج شاخص خشکسالی SPI در سایت‌های مرتعی استان اصفهان طی دوره زمانی ۲۰۰۷-۲۰۰۰ با در نظر گرفتن اطلاعات بارندگی ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در بازه زمانی مختلف در جدول (۴) ارائه شده است. نتایج مندرج در جدول نشان داد سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۵ در عرصه‌های مرتعی مورد مطالعه خشکسالی رخ داده است که بیشترین شدت خشکسالی در سایت مرتعی غرب شهرضا است. مرطوب‌ترین شرایط اقلیمی در سال ۲۰۰۷ مشاهده می‌شود.

محاسبه آن نیازمند داشتن میانگین و انحراف معیار درازمدت مقادیر بارندگی برای دوره‌های مورد مطالعه است (Bonaccorso, 2003). این شاخص اساساً برای تعریف و پایش خشکسالی و ترسالی ارائه شده است (Tsakiris et al., 2004) و به تحلیل‌گر امکان می‌دهد تا تعداد وقایع خشکسالی و ترسالی اتفاق افتاده را برای هر گام زمانی دلخواه تعریف و شناسایی کند (McKee et al., 1993). از آنجا که این شاخص بی‌بعد است، می‌توان به کمک آن اطلاعات مناطق مختلف را با هم مقایسه و نقشه‌های گستره خشکسالی را با دقت بیشتری تولید کرد (Agnew, 2000). رابطه این شاخص به صورت زیر است:

$$SPI_{j,k} = \frac{P_{j,k} - \bar{P}_j}{\sigma P_j} \quad \text{رابطه (۱)}$$

به منظور محاسبه شاخص از نرم افزار DIP استفاده شد. همچنین برای طبقه‌بندی شرایط نرمال، تر و خشک اطلاعات جدول ۳ به کار رفت. محاسبه SPI در دوره‌های زمانی کوتاه مدت (سه ماهه، شش ماهه و نه ماهه) و بلندمدت (۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه) انجام شد. سری‌های زمانی کوتاه مدت برای بررسی خشکسالی‌های کشاورزی و سری‌های بلندمدت برای بررسی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی کاربرد دارند (Hughes et al, 2002). نظر به پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی در مناطق مختلف استان، برای محاسبه شاخص اقلیمی SPI از میانگین بارش ماهانه ایستگاه‌ها بر اساس نوع آن‌ها (کلیماتولوژی و باران‌سنجی) استفاده شد. در رابطه با اطلاعات

جدول ۴. مقادیر سالانه شاخص SPI در تیپ‌های مرتعی استان اصفهان (۲۰۰۷-۲۰۰۰)

سایت	سال	۲۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷
علویجه	SPI	-	-	-	-۰/۱۴	۱/۱۳	-۰/۱۲	۰/۸۷	-۱/۷۲
	طبقات خشکسالی	-	-	-	نرمال	متوسط	نرمال	تقریبا نرمال	خشکسالی شدید
گلپایگان	SPI	-	-	-	۰/۱۷	۰/۹۸	-۱/۶۵	-۰/۵۲	۱/۰۱
	طبقات خشکسالی	-	-	-	نرمال	نرمال	خشکسالی شدید	تقریبا نرمال	ترسالی متوسط
کلهرود	SPI	-	-	-	-۰/۰۱	۰/۲۵	-۱/۲۱	-۰/۷۴	۱/۷۱
	طبقات خشکسالی	-	-	-	نرمال	نرمال	خشکسالی متوسط	تقریبا نرمال	خیلی مرطوب
کشمچه	SPI	-	-	-	۰/۱۴	۰/۱۴	-۱/۸۹	۰/۶۱	۱/۰۲
	طبقات خشکسالی	-	-	-	نرمال	نرمال	خشکسالی شدید	تقریبا نرمال	ترسالی متوسط
خونداب	SPI	-	-	-	۰/۷۲	۰/۰۵	۰/۸۰	-	۰/۹۷
	طبقات خشکسالی	-	-	-	نرمال	نرمال	تقریبا نرمال	-	تقریبا نرمال
موته	SPI	-	-	-	-۰/۳۴	-۰/۱۰	-۱/۰۵	-۰/۴۱	۱/۹۰
	طبقات خشکسالی	-	-	-	نرمال	نرمال	خشکسالی متوسط	تقریبا نرمال	خیلی مرطوب
غرب شهرضا	SPI	-۲/۱۷	-۰/۴۳	۰/۳	-۰/۴۹	۰/۷۵	۰/۱۶	۰/۵۸	۱/۳۷
	طبقات خشکسالی	خشکسالی بسیار شدید	تقریبا نرمال	تقریبا نرمال	تقریبا نرمال	تقریبا نرمال	تقریبا نرمال	تقریبا نرمال	ترسالی متوسط

شاخص خشکسالی در بازه زمانی سه و نه‌ماهه در کلیه تیپ‌های مرتعی و در بازه زمانی ۱۲ و ۱۸ ماهه در تیپ شهرضا با بارندگی ماهانه همبستگی نشان می‌دهد (جدول ۵).

با در نظر داشتن ماهیت آماری شاخص SPI رابطه آن با مقادیر بارندگی در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۷ در سایت مرتعی شهرضا (۲۰۰۷-۲۰۰۰) بررسی و ضریب همبستگی مشخص شد. نتایج نشان داد

جدول ۵. همبستگی بین بارندگی ماهانه و شاخص SPI در سایت‌های مرتعی استان اصفهان

زمان	۳ ماهه	۶ ماهه	۹ ماهه	۱۲ ماهه	۱۸ ماهه	۲۴ ماهه
علویجه	۰/۶۰۲**	۰/۰۱۹	۰/۵۴۹**	۰/۰۲۹	-	-
گلپایگان	۰/۳۹۷*	-۰/۰۸۳	۰/۵۰۴**	۰/۰۳۶	-	-
کلهرود	۰/۳۹۱*	-۰/۰۷۲	۰/۶۵۵**	۰/۰۴۰	-	-
کمشچه	۰/۴۴۱**	۰/۱۳۸	۰/۲۵۹	۰/۳۲۲	-	-
خونداب	۰/۶۰۰**	۰/۲۶۳	۰/۱۸۳	-۰/۲۱۲	-	-
موته	۰/۴۶۰**	۰/۰۱۹	۰/۶۶۳**	۰/۱۸۴	-	-
غرب شهرضا	۰/۵۰۰**	۰/۱۲۲	۰/۳۹۸**	۰/۲۹۷*	۰/۴۵۰**	۰/۱۷۳

*: در سطح پنج درصد

** : در سطح یک درصد

نتایج رابطه معنادار قوی بین شاخص‌ها در بازه زمانی ۱۶ روزه با SPI نشان نداد. از این رو به بررسی دسته‌بندی نتایج در بازه زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماه پرداخته شد. نتایج حاصل از مقایسه شاخص SPI در بازه زمانی سه‌ماهه با شاخص‌های ماهواره‌ای نشان داد این شاخص در بازه کوتاه‌مدت با شاخص‌های حرارتی در سطح یک درصد بیشترین همبستگی را نشان می‌دهد.

از آنجاکه هدف از این مطالعه مقایسه رابطه بین شاخص‌های ماهواره‌ای و شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین کارایی شاخص‌های ماهواره‌ای در پایش خشکسالی است، همبستگی بین متغیرها با شاخص SPI در بازه‌های مختلف بررسی و پس از حذف شاخص‌ها با همبستگی ضعیف، مدل رگرسیونی محاسبه شد. جدول (۶) ضرایب همبستگی بین شاخص‌ها را در بازه زمانی مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۶. همبستگی بین شاخص‌های ماهواره‌ای و شاخص SPI سه‌ماهه در سایت‌های استان اصفهان

نام سایت شاخص	علویجه	گلپایگان	کلهرود	کمشچه	خونداب	موته	شهرضا
EVI(8 days)	۰/۵۰۴**	۰/۵۰۶**	۰/۴۷۳**	-	۰/۵۴۳**	-	-
NDVI(8 days)	-	-	-	-	-	-	۰/۵۱۷**
NMDI	-	-	۰/۳۸۶**	۰/۳۴۳**	-	-	۰/۳۴۹**
LST	۰/۷۱۷**	۰/۷۸۲**	۰/۷۰۹**	۰/۷۷۹**	۰/۶۷۱**	-	-
TCI	۰/۶۹۷**	۰/۷۸۶**	۰/۷۱۱**	۰/۷۷۸**	۰/۶۷۶**	-	۰/۷۱۸**

*: در سطح پنج درصد

** : در سطح یک درصد

خوندا ب حداقل تعداد همبستگی بین شاخص SPI و شاخص‌های ماهواره‌ای را دارند. بیشترین تعداد شاخص با همبستگی در سطح یک درصد در سایت مرتعی شهرضا مشاهده شده است. بالاترین ضریب همبستگی مربوط به شاخص‌های حرارتی است.

با افزایش بازه زمانی، همبستگی بین شاخص خشکسالی هواشناسی با شاخص‌های محتوای آب گیاه و شاخص‌های حرارتی بیشتر می‌شود. نتایج حاصل از بررسی همبستگی شاخص‌ها در بازه زمانی شش ماهه در جدول (۷) آمده است. مقایسه بین تیپ‌های مرتعی نشان می‌دهد تیپ گلپایگان و

جدول ۷. همبستگی بین شاخص‌های ماهواره‌ای و شاخص SPI شش ماهه در سایت‌های استان اصفهان

نام سایت شاخص	علویجه	گلپایگان	کله‌رود	کمشچه	خوندا ب	موته	شهرضا
EVI _(8 days)	-	-	-	۰/۳۵۸ **	-۰/۵۶۷ **	-	-
NDVI _(8 days)	-	-	-	-	-	-	۰/۵۵۷ **
NMDI	-	-	-۰/۴۲۹ **	-۰/۴۵۱ **	-	۰/۳۹۰ **	-۰/۴۵۸ **
LST	-۰/۶۵۹ **	-۰/۶۷۹ **	-۰/۶۸۵ **	-۰/۳۹۴ *	-۰/۵۵۰ **	-	-
TCI	-۰/۶۰۶ **	-۰/۶۹۰ **	-۰/۶۸۷ **	-۰/۵۰۴ *	-۰/۵۵۴ **	-	-۰/۶۹۶ **

** در سطح یک درصد

* در سطح پنج درصد

مرتبط با پوشش گیاهی کشیده شده است. در دو سایت مرتعی مرتبط با سایت کمشچه و شهرضا شاخص SPI در بازه زمانی نه ماهه با شاخص پوشش گیاهی NDVI و EVI (هشت روزه)، همچنین شاخص‌های محتوای آب گیاه ضریب همبستگی بالا در سطح یک درصد نشان داده است.

در ادامه با بررسی شاخص‌ها در بازه زمانی نه ماهه نتایج مندرج در جدول (۸) نشان داد در تیپ‌های مرتعی کله‌رود، خوندا ب و موته تعداد زیادی از شاخص‌های ماهواره‌ای همبستگی قابل توجهی را با شاخص خشکسالی هواشناسی نشان نداده‌اند. در سایر تیپ‌های مرتعی همبستگی به سمت شاخص‌های

جدول ۸. همبستگی بین شاخص‌های ماهواره‌ای و شاخص SPI نه ماهه در سایت‌های استان اصفهان

نام سایت شاخص	علویجه	گلپایگان	کله‌رود	کمشچه	خوندا ب	موته	شهرضا
EVI _(8 days)	۰/۴۵۷ *	-	-	۰/۷۷۰ **	-۰/۶۴۷ **	۰/۵۱۷ **	-
NDVI _(8 days)	-	-	-	۰/۳۷۶ **	-	-	۰/۵۹۶ **
NMDI	-	-	-	-۰/۴۷۶ **	-	۰/۵۵۳ **	-۰/۵۴۳ **
LST	-۰/۶۰۶ **	-۰/۶۵۳ **	-۰/۷۹۵ **	-	-	-	-
TCI	-۰/۵۶۰ **	-۰/۶۴۷ **	-۰/۷۹۶ **	-	-	-	-۰/۵۹۰ **

** در سطح یک درصد

* در سطح پنج درصد

همبستگی بیشتری را با شاخص خشکسالی نشان می‌دهند. در سایت مرتعی شهرضا شاخص SPI با کلیه شاخص‌های ماهواره‌ای (بجز LST) همبستگی معنادار نشان داد. نتایج در جدول (۹) درج شده است.

بررسی رابطه شاخص‌ها در بازه زمانی ۱۲ ماهه نشان داد مشابه با بازه زمانی سه‌ماهه، شاخص‌های حرارتی در تپ‌های مرتعی با شاخص خشکسالی هواشناسی همبستگی دارند. به نظر می‌رسد که در بازه زمانی طولانی مدت شاخص‌های مرتبط با دما

جدول ۹. همبستگی بین شاخص‌های ماهواره‌ای و شاخص SPI ۱۲ ماهه در سایت‌های استان اصفهان

نام سایت شاخص	علویجه	گلپایگان	کله‌رود	کمشچه	خونداب	موته	شهرضا
EVI _(8 days)	-	-	-	-	-۰/۵۸۸ **	-	-۰/۳۳۳ **
NDVI _(8 days)	-	-	-	-	-	۰/۴۰۲ **	۰/۶۴۶ **
NMDI	-	-	-	-۰/۴۴۸ **	-	-	-۰/۵۴۶ **
LST	-۰/۶۸۳ **	-۰/۷۵۱ **	-۰/۴۱۷ *	-۰/۵۹۲ *	-۰/۵۱۱ **	-	-
TCI	-۰/۶۷۸ **	-۰/۷۵۰ **	-۰/۴۱۴ *	-۰/۵۹۹ *	-۰/۴۵۳ **	-	-۰/۷۳۷ **

*: در سطح پنج درصد

** : در سطح یک درصد

زمانی ۱۸ و ۲۴ ماهه صرف نظر از شاخص دمای سطحی (LST) که همبستگی با شاخص SPI نشان نداده است، کلیه شاخص‌ها در سطح یک درصد دارای همبستگی هستند. نتایج نشان داد با طولانی شدن بازه زمانی، همبستگی بین شاخص‌ها قوی تر است. همبستگی مثبت بین شاخص‌های پوشش گیاهی و محتوای آب گیاه با شاخص خشکسالی هواشناسی بیانگر همسبوندی روند تغییرات است.

در بین تپ‌های مرتعی منتخب استان اصفهان تنها سایت مرتعی غرب شهرضا از اطلاعات بارندگی بلندمدت (۲۰۰۷-۲۰۰۰) برخوردار است و داده‌های بارندگی سایر تپ‌ها به سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۰۷ محدود بود. از این رو، امکان بررسی شاخص SPI در بازه زمانی ۱۸ و ۲۴ ماهه برای این سایت مرتعی وجود دارد. جدول (۱۰) نتایج حاصل از بررسی همبستگی شاخص خشکسالی هواشناسی را با شاخص‌های ماهواره‌ای نشان می‌دهد. در بازه

جدول ۱۰. همبستگی بین شاخص‌های ماهواره‌ای و شاخص SPI در بازه زمانی ۱۸ و ۲۴ ماهه - شهرضا

شاخص	بازه زمانی	
	ماه ۱۸	ماه ۲۴
EVI _(8 days)	-۰/۶۹۹ **	-۰/۵۶۶ **
NDVI _(8 days)	۰/۶۸۱ **	۰/۷۵۰ **
NMDI	-۰/۷۸۰ **	-۰/۷۶۱ **
LST	-	-
TCI	-۰/۷۹۳ **	-۰/۷۶۷ **

** : در سطح یک درصد

بحث و نتیجه‌گیری

بلندمدت محاسبه کرد. یزدانی و همکاران (۱۳۹۰) نیز نشان دادند تعداد خشکسالی‌ها در فواصل زمانی کوتاه‌تر بیش از تعداد آن‌ها در فواصل زمانی طولانی‌تر است. با توجه به ارتباط خشکسالی و بارندگی، بررسی نتایج شاخص خشکسالی هواشناسی و مقادیر بارندگی نشان داد در استان اصفهان مقادیر بارش ماهانه با شاخص خشکسالی در بازه زمانی سه و ماهه بیشترین همبستگی را در سطح یک‌درصد دارند و شاخص در بازه زمانی ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه با بارندگی همبستگی قابل توجهی را نشان نمی‌دهد. با توجه به حساسیت بازه‌های کوتاه‌مدت به نوسانات مقادیر بارش، همبستگی قوی بین شاخص خشکسالی و بارش ماهانه مؤید تأثیرپذیر بودن شاخص از تغییرات بارندگی است. جوانمرد و همکاران (۱۳۸۱) بیان کردند SPI کوتاه‌مدت شرایط رطوبت را منعکس می‌کند و قادر به برآورد فصلی بارندگی است.

نتایج حاصل از مقایسه ۵ شاخص ماهواره‌ای محاسبه‌شده با شاخص خشکسالی هواشناسی نشان داد شاخص SPI با شاخص‌های مرتبط به پوشش گیاهی همبستگی معنادار در سطح یک‌درصد دارد. نتیجه بررسی رابطه بین شاخص SPI با گروه شاخص‌های حرارتی نشان داد در سطح یک‌درصد با هم همبستگی دارند و بیشترین ضریب همبستگی مربوط به این گروه از شاخص‌های ماهواره‌ای است. روند همبستگی این متغیرها با یکدیگر معکوس و نتایج حاکی از آن است که با افزایش مقادیر عددی شاخص LST و TCI شاخص خشکسالی هواشناسی به سمت منفی کاهش یافته است و شرایط خشکسالی را نشان می‌دهد. به‌طورکلی، مقایسه نتایج همبستگی بین شاخص خشکسالی هواشناسی و شاخص‌های

با توجه به اینکه شاخص بارش استاندارد شده (SPI) ابزاری قوی در آنالیز داده‌های بارندگی است، به‌منظور مشخص کردن کمیت خشکسالی جاری استفاده می‌شود (آسیائی، ۱۳۸۵). نتایج بررسی محاسبه شاخص SPI در بازه زمانی ۲۰۱۱-۲۰۰۰ در محدوده تیپ‌های مرتعی مورد مطالعه در پژوهش حاضر نشان داد طی سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۷ خشکسالی متوسط تا بسیار شدید رخ داده است. نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر با نتایج حاصل از سایر مطالعات همخوانی دارد. طبق گزارش وزارت نیرو، خشکسالی سال ۱۳۷۹ (سال ۲۰۰۰) بدترین خشکسالی طی ۳۰ تا ۴۵ سال گذشته بوده است. در سال ۱۳۷۹ استان اصفهان که در ۲۹ سال گذشته به‌طور میانگین دارای ۱۲۱ میلی‌متر بارندگی در سال بود، ۳۵ میلی‌متر بارندگی داشت. مرطوب‌ترین سال در دوره زمانی ۲۰۱۱-۲۰۰۰ برای استان‌های اصفهان ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ بوده است. بررسی شاخص SPI در بازه‌های زمانی ۱۶ روزه، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه نشان داد در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت، نوسانات خشکسالی نسبت به بازه‌های زمانی بلندمدت بیشتر و کوتاه‌تر است. بدین ترتیب که کوچک‌ترین تغییر در بارندگی ماهانه در بازه زمانی ۱۶ روزه و سه‌ماهه سبب تغییر شدت خشکسالی می‌شود. از این‌رو، در بازه زمانی کوتاه‌مدت (سه‌ماهه) تعداد وقوع خشکسالی در ماه بیشتر از سایر بازه‌های زمانی است. در بازه‌های زمانی بلندمدت وقوع شرایط خشکسالی از تداوم بیشتری برخوردار است. با توجه به این موضوع، می‌توان تغییرات فصلی بارندگی را از طریق شاخص کوتاه‌مدت و تغییرات سالانه را از طریق شاخص‌های

یزدانی، و.، زارع‌ابیان، ح.، شادمانی، م.، (۱۳۹۰). تحلیل فراوانی و پهنه‌بندی خشکسالی‌های ایران با کاربرد نمایه شاخص استاندارد شده بارش، مجله مهندسی منابع آب، سال چهارم، ۴۳-۳۱.

Agnew, C.T., 2000, *using the SPI to Identify Drought*, Drought Network News, Vol. 12, No. 1, winter 1999-Spring 2000.

Bhuiyan, C., 2004, *various droughts for monitoring drought condition in Aravalli terrain of India*. In Proceedings of the XXth ISPRS Conference. Int. Soc. Photogramm. Remote Sensing, Istanbul.

Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., & Gregoire, J. M., 2001, *Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain*. Remote Sensing of Environment, 77, Pp. 22-33.

Gao, B.C., 1995, *Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space*. Proceedings of SPIE 2480: Pp.225-236.

Gao, B. C., 1996, *NDWI—A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space*. Remote Sensing of Environment, 58, Pp. 257-266.

Kogan, F. N., 2001, *Contribution of Remote Sensing to Drought Early Warning*, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Environmental Satellite Data and Information Services (NESDIS), Washington DC, U.S.A., Pp.86-100.

ماهواره‌ای در استان نشان داد صرف‌نظر از بازه زمانی ۱۸ ماهه که شاخص SPI با شاخص‌های حرارتی همبستگی نشان نداد، سایر بازه‌های زمانی با شاخص LST و TCI در سطح یک‌درصد همبستگی دارند. از بین شاخص‌های پوشش گیاهی، EVI و NDVI در کلیه بازه‌های زمانی با شاخص SPI همبستگی دارند. از بین شاخص‌های محتوای آب گیاه نیز شاخص NMDI در همه بازه‌های زمانی با شاخص خشکسالی هواشناسی همبستگی نشان داد.

منابع

پرویز، ل.، خلقی، م.، ولیزاده، خ.، عراقی‌نژاد، ش.، (۱۳۹۰). بررسی کارایی شاخص‌های منتج از فناوری سنجش از دور در ارزیابی خشکسالی هواشناسی، مطالعه موردی: حوضه آبریز سفیدرود، جغرافیا و توسعه، شماره ۲۲: ۱۶۴-۱۴۷.

جوانمرد، س.، بذاق جمالی، ج.، احمدیان، ج.، قهرمان، ن.، موقر مقدم، ح.، (۱۳۸۰). سیستم مراقبت از شدت وسعت خشکسالی با نمایه شدت خشکسالی پالمر، بولتن مرکز کلی اقلیم‌شناسی، شماره ۴.

فاضل‌دهکردی، لیلا، (۱۳۹۲). هشدار خطر خشکسالی به‌منظور مدیریت بهینه مراتع، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه تهران، تهران، ۲۶۳-۱۰۱.