



معرفی سیستم هشدار سریع خشکسالی کشاورزی و افت ذخیره آب زیرزمینی با استفاده از شاخص eRDI

مهدی سلیمانی مطلق^۱، مجتبی سلیمانی ساردو^۲، الهام داودی^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۷/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۲

مقاله پژوهشی

چکیده

ارتقاء کیفیت شاخص‌های خشکسالی، نقش مؤثری در بهبود سیستم مدیریت منابع آب ایفا می‌نماید. در این پژوهش از شاخص شناسایی خشکسالی مؤثر (eRDI)، به منظور شناسایی و اعلام هشدار سریع خشکسالی کشاورزی در دشت جیرفت استفاده شد و عملکرد آن با استفاده از شاخص NDVI مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت نسبت به تحلیل ارتباط این شاخص با تغییرات ذخیره آبخوان مبادرت شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که اثر شاخص در مدل کردن خشکسالی کشاورزی در مراحل مختلف رشد گیاه تقریباً مشابه بوده اما شدت برآورد شده در دوره بحرانی رشد گیاه بیشتر بوده است، لذا این دوره به عنوان مبنایی برای تحلیل مکانی خشکسالی کشاورزی مدنظر قرار گرفت. نتایج تحلیل مکانی نشان داد که وقوع دوره‌های نرمال، خشک و تر با دسترسی یا کمبود بارش مؤثر برای گیاهان منطقه، متناسب است. همچنین نتایج بیانگر وجود همبستگی معنی‌دار در سطح ۵ درصد ($r = 0/87$) بین شاخص‌های eRDI و NDVI در اراضی تنک منطقه، به واسطه دخالت تنها عامل بارش مؤثر در شاخص eRDI می‌باشد، در حالی که در اراضی آبی، عکس این قضیه به دلیل پمپاژ از آب زیرزمینی و احتمالاً بهره‌برداری از سد جیرفت اتفاق افتاده است. به طور کلی، نتایج مبین معرفی شاخص eRDI سه ماهه و eRDI هفت ماهه، به ترتیب برای هشدار سریع خشکسالی کشاورزی و افت ذخیره آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه است.

واژه‌های کلیدی: بارش مؤثر، دشت جیرفت، خشکسالی کشاورزی، eRDI، NDVI

۱. استادیار، گروه آموزشی مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران،

ایمیل: soleimani.m@lu.ac.ir (نویسنده مسئول).

۲. استادیار، گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران،

ایمیل: mojtaba.soleimani@ujiroft.ac.ir

۳. دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران،

ایمیل: elhamdavoodi90@yahoo.com

مقدمه

پیش‌بینی به موقع خشکسالی‌ها می‌تواند در بهبود سیستم مدیریت خشکسالی کمک نموده و با ارتقاء کیفیت شاخص‌های مختلف، راهکارهایی جهت کاهش اثرات و پیامدهای آن ارائه نماید. از این رو، شاخص‌های متعددی برای ارزیابی، پایش و پیش‌بینی خشکسالی‌ها ارائه شده است. که از مهمترین آنها می‌توان به شاخص‌های SPI^1 و RDI^2 اشاره نمود که در مقیاس‌های بلندمدت، قابلیت ارزیابی خشکسالی آب زیرزمینی را دارا می‌باشند (Nohegar and Heydarzadeh., 2016). در خصوص خشکسالی کشاورزی که در نتیجه کمبود رطوبت خاک حاصل می‌شود، شاخص‌هایی مانند شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI³)، شاخص کسری رطوبت خاک (SMDI⁴) معرفی شده است. در همین خصوص، Pablos et al. (2017) کارایی دو شاخص $SMADI^5$ و $SWDI^6$ را نسبت به سایر شاخص‌ها (CMI^7 و AWD^8) در پایش خشکسالی‌ها گزارش نمودند. با این حال، نیاز به داده‌ها و هزینه برداشت داده‌های زمینی جهت اعتبارسنجی این‌گونه شاخص‌ها همواره از محدودیت‌های کاربرد آنها بوده است. از این رو، شاخص‌های مبتنی بر داده‌های سنجش از دور با قابلیت تفکیک زمانی - مکانی بالا مانند شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی $NDVI^9$ ، VCI^{10} و VHI^{11} برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی مورد استفاده محققین بسیاری قرار گرفته است (دماوندی و همکاران، ۱۳۹۵). این شاخص‌ها خود نیز دارای یکسری محدودیت‌هایی هستند به‌طور مثال شاخص $NDVI$ شاخصی است که به‌تنهایی قابلیت شناسایی خشکسالی را ندارد (Rimkus et al., 2017). در واقع این شاخص، اثر سبزی‌نگی گیاهی را نمایش داده و اطلاعاتی از میزان آب در خاک را نشان نمی‌دهد (دماوندی و همکاران،

۱۳۹۵). مضاف بر شاخص‌های مزبور، شاخص‌های اقلیم مبنا نظیر SPI ، $SPEI$ و RDI علاوه بر بررسی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی، در ارزیابی خشکسالی‌های کشاورزی نیز کاربرد دارند. در این بین، شاخص SPI را شاید بتوان به‌عنوان سریع‌ترین شاخص به‌علت تنها در نظر گرفتن داده‌های بارش برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی مورد توجه قرار داد اما از آنجا که دو شاخص $SPEI$ و RDI علاوه بر بارش، تبخیر و تعرق را در نظر می‌گیرند، در ارزیابی خشکسالی‌های کشاورزی از جامعیت بیشتری برخوردارند (Tian et al., 2018).

مقایسه RDI و $SPEI$ نشان می‌دهد که برای محاسبه تبخیر و تعرق در شاخص $SPEI$ از روش پنمن - مانیتث که نیاز به داده‌های زیادی دارد، استفاده شده است، در صورتی که در شاخص RDI روش‌های دما مبنا با داده‌های کم مورد نیاز است (Tigkas et al., 2017). همچنین (Tigkas et al., 2017) اظهار داشتند که این شاخص با جایگزینی بارش کل به‌وسیله بارش مؤثر، خشکسالی کشاورزی را با دقت بیشتری برآورد نموده و در دوره‌های مرجع کوتاه مدت رشد گیاهان برای پایش و پیش‌بینی سریع اثرات خشکسالی روی پوشش‌های کشاورزی مناسب است.

در مجموع بررسی سوابق تحقیق نشان می‌دهد که برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی، شاخصی که به پیچیدگی و داده کمتری نیاز دارد و سریع‌تر و با دقت بیشتری بتواند کسری منابع آب را در یک منطقه نشان دهد، همواره مدنظر محققین بوده است. با توجه به اهمیت دشت جیرفت از نظر کشاورزی، در این مقاله سعی شده تا از شاخص $erDI^{12}$ مبتنی بر بارش مؤثر برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی استفاده شود. نوآوری دیگر تحقیق بررسی افت ذخیره آب زیرزمینی و ارتباط

8 Atmospheric Water Deficit

9. Normalised Difference Vegetation Index

10. Vegetation Condition Index

11. Vegetation Health Index

12 Effective Reconnaissance Drought Index

1 Standardized Precipitation Index

2 Reconnaissance drought index

3. Palmer Drought Severity Index

4. Soil Moisture Deficit Index

5 Soil Moisture Agricultural Drought Index

6 Soil Water Deficit Index

7 Crop Moisture Index



۱۳۹۰)، در شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعه، پراکنش چاه‌های مشاهده‌ای به همراه موقعیت سد جیرفت و ایستگاه هیدرومتری خروجی از سد نشان داده شده است.

داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق از آمار بارش و دمای ماهانه میلادی (۱۹۹۱-۹۲ تا ۲۰۱۵-۱۶) ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان (کرمان، جیرفت، سیرجان، کهنوج، بم، شهر بابک) جهت برآورد شاخص خشکسالی کشاورزی (eRDI) استفاده شد. همچنین از آمار سطح آب در ۳۵ چاه مشاهده‌ای و اطلاعات مربوط به چاه‌های بهره‌برداری به منظور بررسی وضعیت هیدروژئولوژیکی آبخوان استفاده شد. علاوه بر این، برای ارزیابی پوشش گیاهی با استفاده از شاخص NDVI، از اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ منطبق بر دوره رشد گیاهان منطقه در نیمه دوم آوریل سال‌های ۱۹۹۳، ۱۹۹۶، ۲۰۰۰، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۶ استفاده گردید. این تصاویر در پایگاه اینترنتی <https://earthexplorer.usgs.gov> قابل دانلود هستند.

روش تحقیق

الف- شاخص شناسایی خشکسالی مؤثر (eRDI)
هدف از ایجاد این شاخص افزایش توانایی ارزیابی خشکسالی کشاورزی و اعلام هشدار برای افت آب‌زیرزمینی است. جنبه اصلی اصلاح شاخص RDI، جایگزینی کل بارش (P) با استفاده از بارش مؤثر (P_e) است. بارش مؤثر از دیدگاه هر متخصص می‌تواند تعریف و تفسیر مختلفی داشته باشد برای مثال بارش مؤثر به‌عنوان مقدار بارشی است که وارد مخزن می‌شود، یا درصد بارشی که در تغذیه آب زیرزمینی مشارکت می‌نماید و یا مقدار آبی که به‌وسیله سیستم توسعه ریشه برای تولید و رشد گیاه مورد استفاده قرار می‌گیرد و غیره (Tigkas et al., 2017). بارش مؤثر را با استفاده از تکنیک‌های تغییر رطوبت خاک، لایسیمترها یا مدل‌های جامع بیلان آب می‌توان برآورد کرد. البته این‌گونه روش‌ها پیچیده و به امکانات و داده‌های لازم

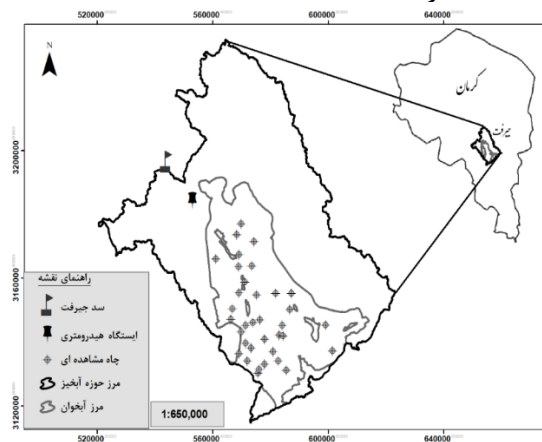
آن با شاخص مذکور است که می‌تواند به‌عنوان ابزار هشدار دهنده افت ذخیره آب زیرزمینی عمل نماید.

معرفی منطقه مطالعه

منطقه مطالعاتی جیرفت در جنوب استان کرمان و از لحاظ جغرافیایی بین طول‌های شرقی $۱۲^{\circ} ۵۷'$ و $۱۵^{\circ} ۵۸'$ و عرض‌های شمالی $۹^{\circ} ۲۸'$ و $۱۴^{\circ} ۲۹'$ واقع شده است. اقلیم این ناحیه بر اساس روش دومارتن جزو مناطق خشک محسوب می‌شود، و میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۱۷۰ میلی‌متر برآورد شده است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان ۱۳۹۲). مساحت آبخوان دشت جیرفت بر اساس مرز با کد ۴۵۰۳ مدیریت منابع آب ایران تقریباً $۱۷۸۰/۷$ کیلومتر مربع می‌باشد. ضریب ذخیره متوسط براساس گزارش شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان (۱۳۹۴)، $۰/۰۳۴$ برآورد شده است. دشت جیرفت از لحاظ مرفولوژیکی تحت تأثیر گسل‌های جوان (سبزواران، کهنوج، دوساری و به‌ویژه گسل اصلی جیرفت) و رودخانه هلیل‌رود می‌باشد. از لحاظ هیدروژئولوژیکی، گسل‌های سبزواران و جیرفت به‌دلیل نقش آنها در انتقال آب‌های زیرزمینی از مناطق کوهستانی به سمت دشت حائز اهمیت هستند (جعفری و همکاران، ۱۳۹۰). بر اساس مطالعات صورت گرفته و گزارشات موجود ضخامت آبخوان از شمال به جنوب کاهش می‌یابد. بخش میانی دشت جیرفت دارای یک لایه ضخیم ناتراوا و شامل لایه‌های نیمه تحت فشار، تحت فشار و آرتزین است. در این بخش، فشار آرتزین به دلیل افزایش تعداد چاه‌ها و بهره‌برداری آب زیرزمینی دشت، کاهش یافته و تخلیه سالانه چاه‌های آرتزین حدود صفر است (جعفری و همکاران، ۱۳۹۰). مطالعات کمی نشان می‌دهد که افت سطح ایستابی آبخوان جیرفت طی دوره ۷ ساله از ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۷ حدود $۱/۳۲$ متر بوده است (پورسیدی و کشکولی، ۱۳۹۱). همچنین مطالعات کیفی نشان می‌دهد که کیفیت آبخوان دشت جیرفت دارای نوسانات زیادی است بطوری‌که نتایج مبین افزایش شوری از شمال به سمت جنوب دشت است (جعفری و همکاران،

کلاس‌های بارندگی به جزءهای ۲۵/۴ میلی‌متری تقسیم می‌شوند و بر اساس جدول (۱) با توجه به اینکه هر یک از اجزاء در چه محدوده‌ای از بارندگی قرار دارند، بارش مؤثر آن محاسبه شده است. بر اساس جدول (۱) برای هر یک از محدوده‌های افزایش بارش دو حد بالا و پایین، درصد تعیین شده است. این درصدها در ۲۵/۴ ضرب شده و حاصل آن به حدود بالا و پایین محدوده تجمعی بارش قبل اضافه گردیده است.

نیاز دارند. در این تحقیق بر روش‌های تجربی برآورد بارش مؤثر تأکید شده است که از جمله روش‌های برآورد بارش مؤثر می‌توان به روش‌های درصد ثابت بارندگی، فانو، USDA - SCS و USBR^۱ اشاره نمود (Tigkas et al., 2017). در این مقاله روش USBR که مناسب اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک است (Tigkas et al., 2017) به سبب سازگاری با اقلیم منطقه و ساختار ساده آن مورد استفاده قرار گرفت. این روش که توسط Stamm. (1967) ارائه شده،



شکل (۱): موقعیت منطقه مطالعه، پراکنش چاه‌های مشاهده‌ای همراه موقعیت سد جیرفت و ایستگاه هیدرومتری خروجی از سد

با برآورد مقدار بارش مؤثر ماهانه به روش USBR، شکل اصلاح شده شاخص (α_e) بر مبنای رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\alpha_e = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} P_{ej}}{\sum_{j=1}^{j=k} PET_j} \quad (1)$$

جدول (۱): باران مؤثر بر مبنای افزایش بارش ماهانه در روش USBR

محدوده تجمعی بارش مؤثر (میلی متر)	درصد	محدوده افزایش بارش (میلی‌متر)
۲۲/۹ - ۲۵/۴	۹۰ - ۱۰۰	۰ - ۲۵/۴
۴۴/۴ - ۴۹/۵	۸۵ - ۹۵	۲۵/۴ - ۵۰/۸
۶۳/۵ - ۷۲/۴	۷۵ - ۹۰	۵۰/۸ - ۷۶/۲
۷۶/۲ - ۹۲/۷	۵۰ - ۸۰	۷۶/۲ - ۱۰۱/۶
۸۳/۸ - ۱۰۷/۹	۳۰ - ۶۰	۱۰۱/۶ - ۱۲۷
۸۶/۴ - ۱۱۸/۱	۱۰ - ۴۰	۱۲۷ - ۱۵۲/۴
۸۶/۴ - ۱۲۰/۶	۰ - ۱۰	۱۵۲/۴

¹ U.S. Bureau of Reclamation

سال‌های ۱۹۹۳، ۱۹۹۶، ۲۰۰۰، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۶ گردآوری گردید. پیش‌پردازش تصاویر به منظور تصحیح خطاهای رادیومتریک و اتمسفریک در محیط نرم افزار ENVI4.7 انجام شد و سپس شاخص NDVI براساس رابطه (۳) محاسبه گردید. برای برآورد این شاخص از باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک تصاویر لندست ۵ و ۸ استفاده شده است.

$$NDVI = \frac{Band_{infrared} - Band_{red}}{Band_{infrared} + Band_{red}} \quad (3)$$

دامنه اعداد این شاخص بین -۱ و +۱ است. مقادیر منفی در این شاخص مبین عدم حضور پوشش گیاهی و مقادیر مثبت پوشش‌های گیاهی تنک، متوسط و متراکم را نشان می‌دهد^۱.

ج- برآورد تغییرات ذخیره سالانه آبخوان

به‌منظور تحلیل‌های دوبعدی آبخوان، تغییرات حجم مخزن نسبت به تغییرات سطح ایستابی آن با استفاده از رابطه (۴) قابل محاسبه است (Fitts, 2002):

$$dV = -S.A.dh \quad (4)$$

که در آن dV تغییرات حجم مخزن، S آبدهی ویژه یا ضریب ذخیره آبخوان، A سطح آبخوان به کیلومتر مربع و dh تغییرات سطح ایستابی آبخوان به متر می‌باشند. در این رابطه متوسط ضریب ذخیره آبخوان بر اساس مطالعات شرکت آب منطقه‌ای استان کرمان (۱۳۹۴) برابر با ۰/۰۳۴ در نظر گرفته شده است. برای محاسبه تغییرات سطح ایستابی سالانه آبخوان مورد مطالعه، ابتدا با استفاده از روش تیسن مساحت تحت تأثیر هر چاه مشاهداتی محاسبه و مقدار آن در رقوم سطح آب ماهانه هر چاه ضرب شد، سپس مجموع حاصلضرب آنها برای تمام چاه‌های پیژومتری بر کل مساحت آبخوان تقسیم گردید و هیدروگراف واحد آبخوان در مقیاس ماهانه بدست آمد. در نهایت تغییرات سطح ایستابی سالانه آبخوان با تفاضل سطح تراز آب اولین (مهر) و آخرین ماه (شهریور) سال آبی بدست آمد. از آنجا که با کاهش سطح ایستابی آبخوان نسبت به

در رابطه (۱) P_{ej} بارندگی مؤثر ماهانه ماه Z ام. مقادیر α_k از توزیع گاما و نرمال در دامنه گسترده‌ای از مناطق مختلف پیروی می‌کند. با فرض اینکه توزیع لوگ نرمال استفاده شود معادله زیر می‌تواند برای محاسبه eRDI استاندارد استفاده شود:

$$eRDI_{st} = \frac{y_k - \bar{y}_k}{\sigma_k} \quad (2)$$

که در آن y_k برابر است با $\ln \alpha_k$ و \bar{y}_k و σ_k میانگین حسابی و انحراف معیار آن است. طبقات خشکسالی مقادیر eRDI استاندارد شده مطابق با RDI_{st} است (Tigkas et al., 2017). قابل توجه است که مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) به روش تورنت وایت با نرم‌افزار Drin C برآورد شده است. با فراخوانی این داده‌ها و مقادیر بارش ماهانه مؤثر، شاخص شناسایی خشکسالی مؤثر برای دوره‌های مرجع ۳ تا ۷ ماهه مطابق مراحل توسعه ریشه و رشد اندام‌های گیاهان غالب منطقه (۴ ماهه از نوامبر تا فوریه، ۵ ماهه از نوامبر تا مارس و ۶ ماهه از نوامبر تا آوریل نشان‌دهنده تکامل دوره رشد، ۷ ماهه از نوامبر تا می نشان‌دهنده مرحله رشد و همچنین ۳ ماهه از فوریه تا آوریل مبین مرحله بحرانی رشد گیاهان غالب در منطقه) و ۱۲ ماهه از اکتبر تا سپتامبر مطابق با سال هیدرولوژیکی محاسبه و تحلیل شد. پهنه‌بندی خشکسالی کشاورزی با استفاده از شاخص eRDI بر مبنای روش IDW به‌واسطه مدل کردن تغییرات مکانی بهتر خشکسالی‌ها نسبت به روش‌های دیگر (صابری و سلطانی‌گرد فرامرزی، ۱۳۹۵) در محیط نرم افزار ArcGIS انجام گرفت و به تحلیل نقشه‌ها پرداخته شد.

ب- بررسی و تحلیل وضعیت پوشش گیاهی

به منظور اطمینان به شاخص eRDI، وضعیت پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه با استفاده از شاخص NDVI برای زمان‌های نرمال، مرطوب و خشک تحلیل شد. برای این منظور تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ منطبق بر دوره رشد گیاهان منطقه در نیمه دوم آوریل

¹ -<https://eos.com/ndvi/>

و بروز خشکسالی کشاورزی طی مراحل تکامل رشد (۶ ماهه)، توسعه (۷ ماهه) و رشد بحرانی (۳ ماهه) گیاه به‌همدیگر نزدیکتر است. علاوه بر این بررسی نمودارها نشان می‌دهد که شدت خشکسالی کشاورزی و کاهش تولید پوشش گیاهی در مرحله رشد بحرانی (دوره مرجع ۳ ماهه) با توجه به نمودار 3m-eRDI، طی سال‌های مذکور بیشتر و این مبین اثر کمبود بارندگی‌ها طی ماه‌های فوریه تا آوریل است. این موضوع با نتایج Tigkas et al. (2017) مطابقت دارد به طوری که آنها دوره‌های رشد کوتاه مدت گیاهان را برای پایش و پیش‌بینی سریع خشکسالی کشاورزی پیشنهاد داده‌اند. با شناسایی خشکسالی کشاورزی توسط eRDI ۳ ماهه، می‌توان اراضی کشاورزی را به نحو صحیح مدیریت نمود و به افزایش عملکرد محصولات نائل شد. به‌واسطه نمایش بهتر شدت خشکسالی کشاورزی با شاخص eRDI در دوره مرجع ۳ ماهه (فوریه تا آوریل)، گستره مکانی آن در سال‌های نرمال، تر و خشک ترسیم شد (شکل ۴). بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که در ابتدای دوره مطالعه در دوره سه ماهه فوریه تا آوریل سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۶، دسترسی پوشش گیاهی به رطوبت خاک به واسطه دریافت بالای بارش مؤثر در تمام اراضی دشت زیاد بوده و خشکسالی کشاورزی رخ نداده است. در همین دوره مرجع، رشد گیاهان طی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۸ با مشکل کمبود رطوبت مواجه شده و در اکثر محدوده دشت مطابق با شاخص eRDI، خشکسالی متوسط و شدید کشاورزی روی داده است. در سال ۲۰۱۶ درصد بارش مؤثر به واسطه بارندگی نرمال برای رشد گیاه مناسب بوده و تا حدودی مانع از بروز تنش خشکی متوسط تا شدید در گیاهان شده است.

حالت اولیه، مقدار افت مثبت است لذا با منفی نمودن رابطه مذکور، کسری حجم ذخیره بیلان مشخص می‌شود. در این تحقیق تغییرات حجم ذخیره سالانه بر اساس رابطه فوق از سال آبی ۲۰۰۴-۰۵ تا سال آبی ۲۰۱۵-۱۶ محاسبه شده است.

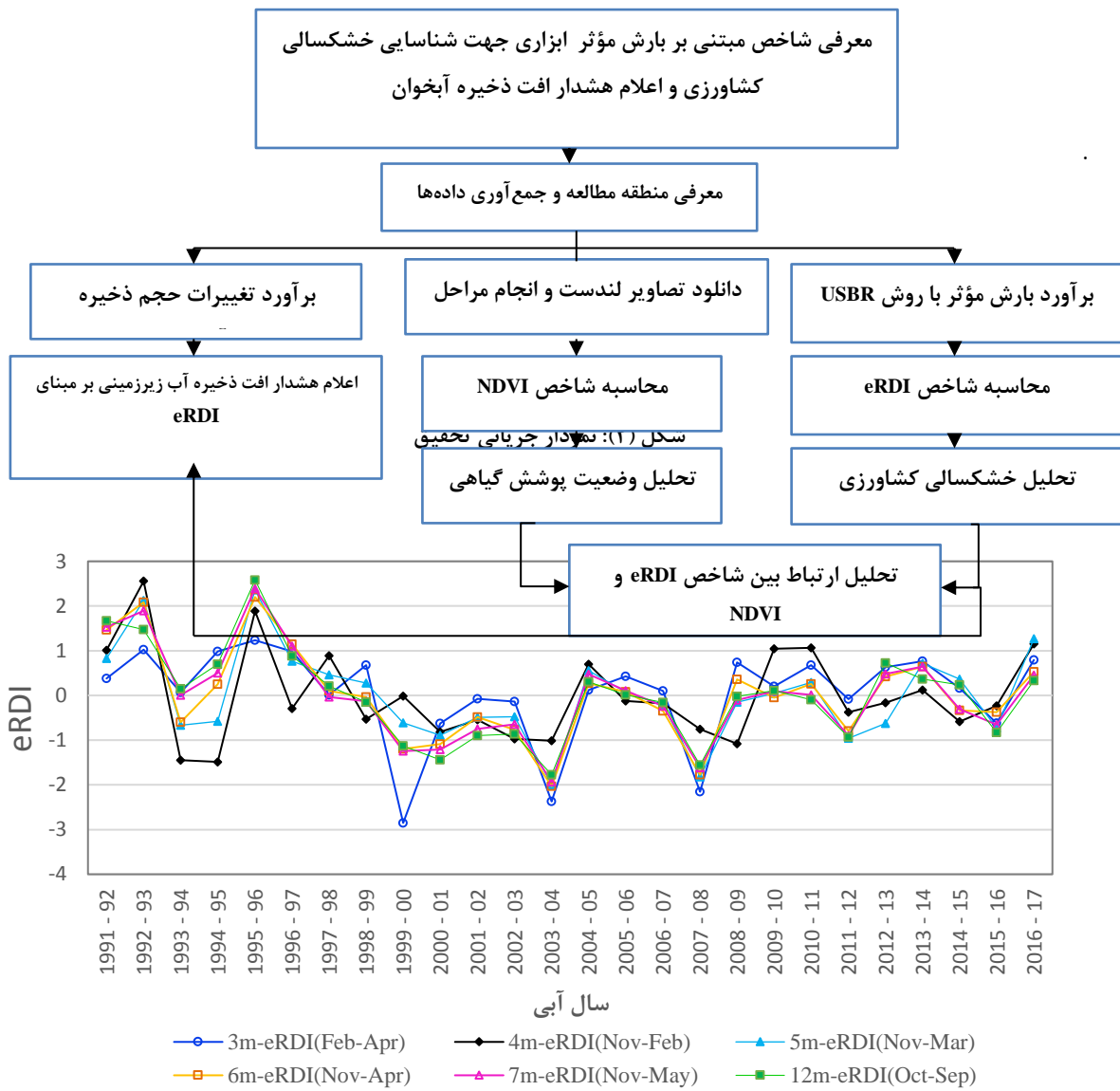
د-اعلام هشدار افت ذخیره آب زیرزمینی بر مبنای eRDI

بررسی خشکسالی کشاورزی امکان هشدار افت ذخیره آب زیرزمینی را فراهم می‌نماید. به‌این منظور ارتباط بین شاخص eRDI در دوره‌های مرجع (۳ تا ۷ ماهه مطابق مراحل رشد گیاه و ۱۲ ماهه مطابق با سال هیدرولوژیکی) با تغییرات حجم ذخیره آبخوان بررسی شد، سپس بهترین رابطه بین این دو با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون در سطح احتمال ۹۵ درصد مورد تحلیل قرار گرفت. مراحل انجام پژوهش به طور خلاصه در نمودار جریانی زیر نشان داده شده است (شکل ۲).

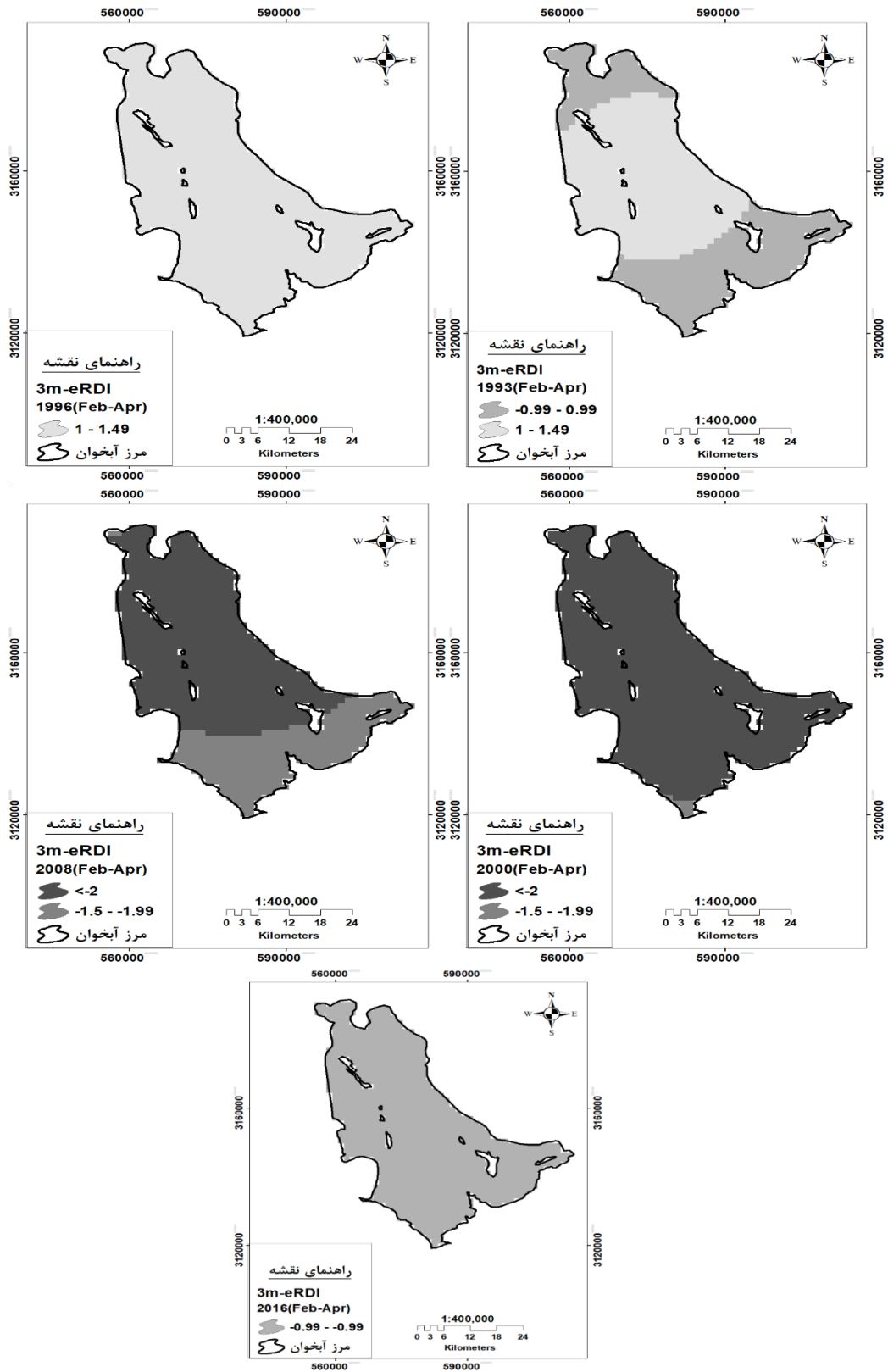
نتایج و بحث

پایش و تحلیل زمانی-مکانی خشکسالی کشاورزی

نتایج شاخص شناسایی خشکسالی مؤثر در مراحل مختلف رشد گیاه در محدوده آبخوان دشت جیرفت در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات شاخص مذکور طی مراحل مختلف رشد گیاهان یکسان بوده البته شدت و ضعف آن متفاوت است. بر اساس این شکل، خشکسالی متوسط تا شدید طی سال‌های آبی (۹۴-۱۹۹۳، ۹۵-۱۹۹۴، ۰۰-۱۹۹۹، ۰۴-۲۰۰۳ و ۰۹-۲۰۰۸) اتفاق افتاده است. رفتار این شاخص در کاهش پوشش گیاهی



شکل (۳): مقادیر eRDI در دوره‌های مرجع رشد گیاه



شکل (۴): شدت خشکسالی کشاورزی در محدوده مطالعه طی سال‌های نرمال، تر و خشک با شاخص eRDI

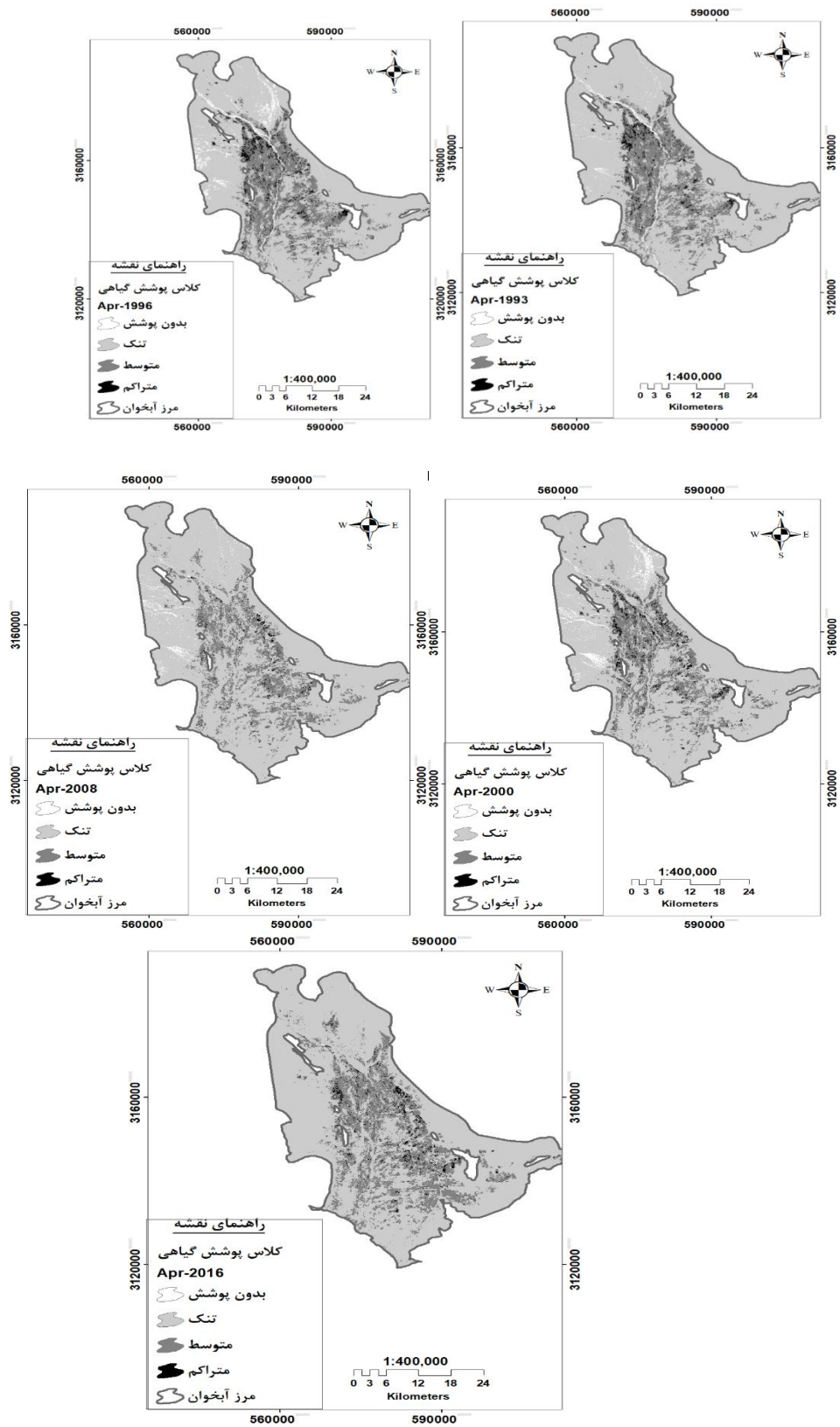


محدوده کل اراضی دشت، اراضی تنک، و اراضی آبی در جدول (۳) نشان داده است. مطابق با این جدول مشاهده می‌شود که در هر سه محدوده، شاخص eRDI در زمان‌های مورد بررسی تقریباً شدت‌های یکسانی داشته و بالعکس مقادیر میانگین NDVI در سه محدوده متفاوت بوده است. بیشترین مقادیر NDVI به اراضی آبی و کمترین آن به اراضی تنک اختصاص دارد. ناهمگونی در ارتباط بین شاخص eRDI و NDVI به‌ویژه در محدوده اراضی آبی مبین نقش عامل ثانویه‌ای است که فراتر از بارش مؤثر (پارامتر اصلی شاخص eRDI) عمل می‌کند. این عامل سبب همبستگی پایین (۰/۳۱) بین دو شاخص در محدوده مذکور شده است. با بررسی اراضی آبی دشت جیرفت و منبع تأمین آب آنها مشخص شد که بخش اعظم این اراضی از آب زیرزمینی و بخش محدودی از سد جیرفت آبیاری می‌شوند و درصد بسیار کمی از بارش تغذیه می‌شوند. طبق گزارش شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کرمان (۱۳۹۴) متوسط برداشت آب زیرزمینی بر اساس آماربرداری سراسری منابع آب حدود ۶۵۵ میلیون متر مکعب طی سه بار آماربرداری سال‌های ۱۹۹۰، ۱۹۹۷ و ۲۰۱۲ می‌باشد. همچنین طبق آمار دبی خروجی از ایستگاه هیدرومتری حسین‌آباد در پایین دست سد جیرفت، متوسط بهره‌برداری سالانه با نادیده گرفتن حقبه پایین دست حدود ۲۷۰ میلیون مترمکعب طی دوره آماری مورد بررسی بوده است که این مقدار از سال آبی ۲۰۰۱-۲۰۰۲ به بعد به کمتر از ۱۰۰ میلیون مترمکعب است. بنابراین می‌توان گفت که عامل آبیاری اراضی در شاخص eRDI برای محدوده‌های تحت کشت آبی می‌تواند سبب نتایج عکس شود. گرچه تا حدودی Tigkas et al. (2017) نیز به این امر اشاره کرده‌اند که این شاخص برای اراضی تحت تغذیه ناشی از بارندگی کارایی دارد. از طرف دیگر نتایج همبستگی معنی‌دار بالای (۰/۸۷) بین میانگین دو شاخص مذکور در محدوده اراضی تنک مبین شبیه‌سازی مناسب خشکسالی کشاورزی و مؤید نتایج Tigkas et al. (2017) است.

به منظور اعتماد به این شاخص، وضعیت پوشش گیاهی ماه آوریل با شاخص NDVI در سال‌های مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت. این شاخص اثر سبزیگی گیاهی را به خوبی نمایش می‌دهد (دماوندی و همکاران، ۱۳۹۵) و به‌واسطه مدل کردن اثر تنش آبی گیاهان به‌وسیله شاخص eRDI می‌تواند مکمل مناسبی برای نمایش خشکسالی کشاورزی باشد. در شکل (۵) ملاحظه می‌گردد که گرچه تغییرات برجسته‌ای قابل مشاهده نمی‌باشد اما تا حدودی می‌توان به ارتباط اثر شاخص eRDI و وضعیت پوشش گیاهی با استفاده از NDVI پی برد. در ماه‌های آوریل ۱۹۹۳ و ۱۹۹۶ با وجود شرایط نرمال و تر در منطقه، پوشش گیاهی وضعیت مناسبی داشته و تراکم آن به‌ویژه در سال ۱۹۹۶ قابل ملاحظه است. در سال‌های مواجه با خشکسالی متوسط تا شدید کشاورزی (۲۰۰۰ و ۲۰۰۸) از سطح پوشش گیاهی (وضعیت متوسط و متراکم) ماه آوریل نسبت به سال‌های (۱۹۹۳ و ۱۹۹۶) کاسته شده است. به‌طوری‌که مجموعاً مقدار این تغییر برای ماه‌های آوریل سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۸ در قیاس با همین ماه در سال ۱۹۹۶ تغییرات چشمگیری را نشان داده است. البته مجموع درصد کاهش مساحت این دو کلاس پوشش گیاهی در ماه آوریل سال ۲۰۱۶ (وضعیت نرمال) نسبت به مشابه آن در سال ۱۹۹۶ (وضعیت مرطوب) به مراتب کمتر و حدود ۳۶ درصد بوده است (جدول ۲). بنابراین با این تفاسیر در مجموع می‌توان گفت که شاخص eRDI تا حدودی با تغییرات پوشش گیاهی مدل شده با NDVI تطابق دارد.

جهت اطمینان بیشتر، نکته قابل توجه اینکه گرچه مجموع درصد تغییرات سطوح پوشش گیاهی به‌ویژه طی زمان‌های خشک نسبت به شرایط مرطوب بالا بوده، اما بخش اعظم آن مربوط به وضعیت بدون پوشش یا متراکم است که مساحت ناچیزی دارند. با نادیده گرفتن این موارد، مشاهده می‌شود که تغییر چندانی در سایر کلاس‌های پوشش گیاهی وجود ندارد.

در گام بعد، برای بررسی بهتر عملکرد شاخص eRDI، ارتباط آن با مقادیر میانگین NDVI برای سه



شکل (۵) طبقه بندی وضعیت پوشش گیاهی بر مبنای شاخص NDVI

جدول (۲): مساحت کلاس پوشش گیاهی ماه آوریل بر مبنای NDVI و درصد تغییر آن نسبت به وضعیت مرطوب

درصد تغییر نسبت به سال ۱۹۹۶	کلاس پوشش گیاهی بر مبنای NDVI						
	۲۰۱۶	۲۰۰۸	۲۰۰۰	۱۹۹۶	۱۹۹۳	بدون پوشش تنک متوسط متراکم	
۲۰۱۶	۲۰۰۸	۲۰۰۰	۲۰۱۶	۲۰۰۸	۲۰۰۰	۱۹۹۶	۱۹۹۳
-۹۸	-۵۸	-۱۹	۰/۹	۲۲/۵	۴۳/۵	۵۳/۹	۲۳/۷
۶	۱۳	۷	۱۳۷۰/۷	۱۴۵۲/۱	۱۳۸۴/۶	۱۲۸۹	۱۳۴۲/۹
-۴	-۲۵	-۱۸	۳۷۸/۱	۲۹۴	۳۲۰/۵	۳۹۲/۳	۳۸۰/۳
-۳۲	-۷۴	-۲۹	۳۱	۱۲/۲	۳۲/۱	۴۵/۶	۳۳/۸

بهره‌برداری از سد جیرفت باعث این قضیه شده است. این عامل با تأثیرگذاری روی توسعه و تراکم پوشش گیاهی (مقادیر بالای شاخص NDVI) در اراضی آبی توانسته است سبب عدم معنی‌داری رابطه بین eRDI و NDVI در کل محدوده شود. بنابراین نیاز به تدوین یک شاخصی فراتر از شاخص eRDI است که علاوه بر بارش مؤثر ناشی از بارندگی، برداشت آب زیرزمینی یا بهره‌برداری از سد را نیز در نظر بگیرد

در جدول (۳) علاوه بر نتایج فوق مشاهده می‌گردد که با وجود ضریب همبستگی بالا (۰/۷۵) در کل محدوده مطالعه، رابطه بین شاخص NDVI و eRDI معنی‌دار نیست. توجه قابل تأمل اینکه ضریب همبستگی بالا همیشه به این معنی نیست که یکی از دو متغیر، دلیل متغیر دیگر است، زیرا احتمال دارد که عامل دیگری نیز در این قضیه دخالت نماید (بی‌همتا و چاهوکی، ۱۳۸۷). لذا این بدین معنی است که عامل دیگری مثل برداشت آب زیرزمینی از آبخوان و احتمالاً

جدول (۳): مقادیر میانگین NDVI و eRDI و ضریب همبستگی پیرسون بین آنها در محدوده‌های مختلف

ضریب همبستگی NDVI و eRDI	NDVI	eRDI	سطح (km ²)	سال	محدوده
	۰/۳۹	۱	۲۱۵/۳	۱۹۹۳	اراضی آبی
	۰/۴	۱/۲۳	۲۲۹/۲	۱۹۹۶	
۰/۳۱	۰/۴۱	-۲/۶۷	۱۵۷/۲	۲۰۰۰	
	۰/۳	-۲/۰۶	۲۷۸/۲	۲۰۰۸	
	۰/۳۳	-۰/۶۱	۳۲۹/۶	۲۰۱۶	
	۰/۱	۰/۹۸	۱۵۶۵	۱۹۹۳	
	۰/۱۲	۱/۲۳	۱۵۵۱	۱۹۹۶	اراضی تنک
۰/۸۷*	۰/۰۸	-۲/۵۵	۱۶۲۳	۲۰۰۰	
	۰/۰۷	-۲/۰۲	۱۵۰۳	۲۰۰۸	
	۰/۱	-۰/۶	۱۴۵۱	۲۰۱۶	
	۰/۱۳	۰/۹۹	۱۷۸۰/۷	۱۹۹۳	
	۰/۱۵	۱/۲۳	۱۷۸۰/۷	۱۹۹۶	
۰/۷۵	۰/۱۱	-۲/۵۷	۱۷۸۰/۷	۲۰۰۰	کل محدوده
	۰/۱	-۲/۰۳	۱۷۸۰/۷	۲۰۰۸	
	۰/۱۵	۰/۶	۱۷۸۰/۷	۲۰۱۶	

* در سطح ۵ درصد معنی‌دار

که تنها عامل برداشت از طریق خشکسالی کشاورزی در افت ذخیره آبخوان جیرفت مؤثر نیست بلکه با توجه به همبستگی ۶۰ درصدی بین eRDI و حجم تغییرات ذخیره، قانداً عامل کاهش تغذیه ناشی از کمبود بارش تأثیرگذار است. از این رو باید اشاره کرد که نتایج این تحقیق با آنچه که در مطالعه (Nohegar and Heydarzadeh., 2016) بدست آمده، تا حدودی سازگار است بطوری که در مطالعه آنها به آثار ناشی از بهره‌برداری در اثر انتشار خشکسالی‌ها به آب زیرزمینی توجه شده است. البته یافته‌های آنها از لحاظ زمان اثر خشکسالی‌ها روی آب زیرزمینی با نتایج مطالعه حاضر تفاوت دارد بطوری که میزان زمان صرف شده برای انتشار خشکسالی‌های هواشناسی در آب زیرزمینی برای اغلب دشت‌های بررسی شده بندرعباس بجز دشت‌های میناب و گابریک (به ترتیب حدود ۳ و ۶ ماه) حدود ۲۴ ماه است. تفاوت خصوصیات هیدروژئولوژیکی دشت‌ها و میزان بهره‌برداری آب زیرزمینی می‌تواند از دلایل اختلاف این نتایج باشد. علاوه بر این در تحقیق حاضر، زمان انتشار خشکسالی کشاورزی در آب زیرزمینی با شاخص مبتنی بر بارش مؤثر eRDI مورد بحث بوده که اصولاً در مدت کمتری نسبت به انتشار خشکسالی‌های هواشناسی اتفاق می‌افتد.

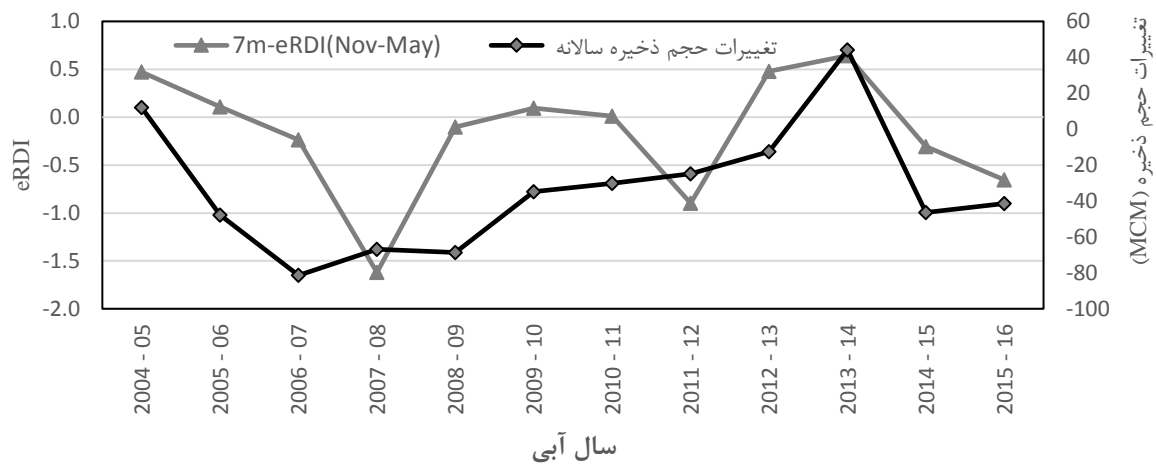
برآورد ذخیره آبخوان و هشدار افت ذخیره بر مبنای eRDI

بر مبنای تحلیل‌های دو بعدی آبخوان، تغییرات ذخیره آب زیرزمینی برآورد گردید (شکل ۶). متوسط افت آبخوان طی ۱۲ سال از (۲۰۰۴ تا ۲۰۱۵) با در نظر گرفتن ضریب ذخیره متوسط ۰/۰۳۴ و مساحت حدود ۱۷۸۰/۷ کیلومتر مربع، حدود ۳۳ میلیون مترمکعب برآورد شده است. با مقایسه eRDI و تغییرات حجم ذخیره آبخوان مشخص شد که تغییرات حجم ذخیره تابع eRDI-7 ماهه با ضریب همبستگی معنی‌دار پیرسون (در سطح ۵ درصد) برابر ۰/۶ بوده است. بدین صورت که با کاهش و افزایش مقادیر eRDI، حجم سالانه آبخوان تغییر کرده است. حجم ذخیره آبخوان در سال آبی ۲۰۰۴-۰۵ حدود ۱۲ میلیون متر مکعب افزایش یافته است که در این هنگام مقدار شاخص eRDI مثبت بوده است. با گذشت زمان و وقوع خشکسالی‌ها در منطقه در سال ۲۰۰۷-۰۸، از حجم ذخیره آبخوان حدود ۶۷ میلیون متر مکعب کاسته شده است. پس از این دوره و سال بعد از آن، حجم ذخیره آبخوان روندی نسبتاً افزایشی طی کرده تا اینکه در سال آبی ۲۰۱۳-۱۴ با وجود شرایط نرمال و نسبتاً مرطوب در منطقه، حجم آبخوان حدود ۴۴ میلیون مترمکعب افزایش یافته است. از این سال به بعد مجدداً همزمان با وقوع خشکسالی کشاورزی و کاهش مقادیر eRDI از حجم آبخوان کاسته شده است. همان‌طور که گفته شد افت ذخیره آب زیرزمینی با خشکسالی کشاورزی تقریباً در مقیاس سالانه تطابق زمانی دارد. این بدین معنی است که با وقوع خشکسالی کشاورزی در منطقه و احتمالاً کاهش تخصیص آب از سد جیرفت به دشت بعلت کمبود بارش، برداشت آب زیرزمینی افزایش پیدا کرده است و منجر به افت ذخیره آب زیرزمینی شده است. در واقع تأثیر این خشکسالی طی یک سال از طریق پمپاژ در آب زیرزمینی ظاهر شده است. بنابراین شاخص eRDI به عنوان یک شاخص هشدار دهنده افت ذخیره آب زیرزمینی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. نکته قابل تأمل دیگر که باید در نظر داشت این است

نتیجه‌گیری

استفاده شاخص خشکسالی کشاورزی eRDI می‌تواند مدیریت صحیح اراضی در جهت حداکثر عملکرد محصول و کاهش خسارت به کشاورزان را در

پی داشته باشد. علاوه بر این استفاده این شاخص، زنگ هشدار برای بهره برداری منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شود. در این تحقیق شاخص eRDI که بر مبنای بارش مؤثر عمل می‌کند، مورد توجه قرار گرفت



شکل (۶): تغییرات حجم ذخیره آبخوان و مقادیر شاخص eRDI

دخالت عامل دیگر نشان می‌دهند و نتیجه آن برای اراضی آبی بواسطه دخالت عامل پمپاژ آب زیرزمینی و احتمالاً بهره‌برداری از سد جیرفت، عدم همبستگی معنی‌دار است. بنابراین نیاز به تدوین یک شاخصی فراتر از شاخص eRDI است که علاوه بر بارش مؤثر ناشی از بارندگی، برداشت آب زیرزمینی یا بهره‌برداری از سد را نیز در نظر بگیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود که از NDVI حاصل از MODIS استفاده شود تا بتوان همبستگی بین آن و شاخص eRDI را بهتر مقایسه نمود.

در مجموع بررسی نتایج نشان می‌دهد که شاخص eRDI سه ماهه به‌عنوان ابزاری برای شناسایی سریع خشکسالی کشاورزی منطقه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این شاخص eRDI-7 ماهه بواسطه ضریب همبستگی معنی‌دار با تغییرات ذخیره آبخوان بعنوان زنگ هشدار پمپاژ بالای آب زیرزمینی دشت جیرفت، شرایط را برای مدیریت صحیح این منبع حیاتی می‌تواند فراهم کند.

مکانیسم شاخص eRDI مثل شاخص RDI بوده با این تفاوت که بجای بارش، بارش مؤثر جایگزین شده است. این شاخص برای اراضی کشاورزی دشت جیرفت با اقلیم خشک و نیمه خشک بکار گرفته شد تا عملکرد آن در مدل کردن خشکسالی کشاورزی بررسی گردد. نتایج تحقیق مبین این است که روند تغییرات زمانی شاخص، طی مراحل مختلف رشد گیاه تقریباً یکسان بوده اما برای مرحله رشد بحرانی ۳ ماهه (فوریه تا آوریل) گیاه، شدت خشکسالی‌ها به واسطه کاهش بارندگی مؤثر بهتر نمایان می‌شود لذا آن مبنای تحلیل‌های مکانی قرار گرفت. نتایج تحلیل مکانی eRDI مبین وقوع شرایط نرمال، تر و خشک متناسب با دسترسی یا عدم دسترسی بارش مؤثر برای گیاهان منطقه می‌باشد. نتایج شاخص NDVI جهت اطمینان به عملکرد شاخص eRDI مبین کاهش یا افزایش پوشش گیاهی متناسب با شدت‌های خشکسالی برآورد شده در منطقه است. علاوه بر این واکاوی بیشتر ارتباط بین eRDI و NDVI نشان داد که این دو، همبستگی معنی‌داری در اراضی تنک بواسطه بارش مؤثر بدون

منابع

- بی همتا، م. ر.، و م. ع. زارع چاهوکی. ۱۳۸۷. اصول آمار علوم طبیعی. انتشارات دانشگاه تهران. ۳۰۰ ص.
- پورسیدی، ع.، و ح. ع. کشکولی. ۱۳۹۱. مطالعه وضعیت آبهای زیرزمینی دشت جیرفت به کمک مدل PMWIN. علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی) ۳۵ (۲): ص ۵۱-۶۳.
- جعفری، ح. ر.، س. ص. علمداری و ا. زاینده‌رودی. ۱۳۹۰. بررسی عوامل زمین‌شناسی تأثیر گذار بر کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت جیرفت. فصلنامه علمی پژوهشی زمین و منابع واحد لاهیجان. ۴(۴): ص ۱-۱۰.
- دماوندی ع. ا.، م. رحیمی، م. ر. یزدانی، و ع. ا. نوروزی. ۱۳۹۵. پایش مکانی خشکسالی کشاورزی از طریق سری‌های زمانی شاخص‌های NDVI و LST داده‌های MODIS (مطالعه موردی: استان مرکزی). فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی. سال بیست و پنجم، شماره ۹۹، ص ۱۱۵-۱۲۶.
- شرکت سهامی آب منطقه ای کرمان. ۱۳۹۴. گزارش ممنوعیت منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی جیرفت. ۱۰۳ ص
- صابری ع.، و س. سلطانی گردفردمرزی. ۱۳۹۶. ارزیابی روش‌های زمین‌آمار در پهنه بندی شدت خشکسالی استان آذربایجان غربی. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. ۷ (۲۷): ص ۱۵۱-۱۶۵.
- Fitts, C. R. 2002. Groundwater Science. Second Edition, UK, Academic Press. 450 pp.
- Nohegar, A and M. Heydarzadeh. 2016. Evaluation of the effects of meteorological drought on groundwater table fluctuations (Case study: Hormozgan Province, Iran). Natural Environment Change, 2(2):111-125.
- Pablos, M., J. Martínez-Fernández., N Sánchez and A González-Zamora. 2017. Temporal and Spatial Comparison of Agricultural Drought Indices from Moderate Resolution Satellite Soil Moisture Data over Northwest Spain. Remote sensing. 9(11): 1-27.
- Parida, B.R. 2006. Analysing the effect of severity and duration of agricultural drought on crop performance using Terra/MODIS satellite data and meteorological data, Indian Institute of Remote Sensing.
- Rimkus, E., E. Stonevicius, J. Kilpys, V. Maciulyte, and D. Valiukas. 2017. Drought identification in the eastern Baltic region using NDVI, Earth Syst. Dynam, 8, 627-637.
- Stamm, G.G. 1967. Problems and procedures in determining water supply requirements for irrigation projects. In: Hagan et al (eds) Irrigation of agricultural lands. Agronomy monograph 11. American Society of Agronomy, Madison, 771-784.
- Tian, Y., Y-P. Xu and G. Wang. 2018. Agricultural drought prediction using climate indices based on Support Vector Regression in Xiangjiang River basin. Science of the Total Environment 622-623:710-720.
- Tigkas, D., H. Vangelis and G. Tsakiris. 2017. An Enhanced Effective Reconnaissance Drought Index for the Characterisation of Agricultural Drought. Environmental process, 4: 137-148.



An early warning system for agricultural drought and groundwater storage depletion using eRDI index

Mahdi Soleimani Motlagh¹, Mojtaba Soleimani Sardo², Elham Davoodi³

Abstract

Improving the drought quality indicators play an important role in water resources management. In this research, the Effective Reconnaissance Drought Index (eRDI) was used to detect agricultural droughts and present an early warning system in the Jiroft Plain. For this, the reliability of this index was evaluated using the NDVI and its relationship with storage changes of the aquifer was analyzed. According to the findings, the eRDI index shows the same effects in modeling of agricultural drought in different stages of plant growth but its severity is higher in the critical period of vegetation's growth and therefore this period was considered for the spatial analysis of agricultural drought. The results showed that the occurrence of normal, dry and wet periods are associated with the accessibility or inaccessibility of effective precipitation. The results indicated a significant correlation between eRDI and NDVI in sparsely vegetation areas at the level of 5% ($r = 0.87$) due to the effective precipitation role in calculating the eRDI, although a weak correlation has been found between the NDVI and eRDI ($r = 0.31$) in the irrigated area that is probably due to the groundwater pumping and exploitation from the Jiroft dam. As a result, the eRDI-3 and eRDI-7 could be useful for early warning of the agricultural drought and groundwater storage depletion respectively.

Keywords: Agricultural Drought, Effective Precipitation, Jiroft Plain, eRDI, NDVI

1. Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural resources, Lorestan University, Khorramabad, Lorestan, Iran. Email: soleimani.m@lu.ac.ir

2. Assistant Professor, Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Jiroft, Kerman, Iran. Email: mojtaba.soleimani@ujiroft.ac.ir

3. Ph.D. Graduated in Watershed Management Science and Engineering, Department of Range and Watershed Management, University of Kashan. Email: elhamdavoodi90@yahoo.com