

تأثیر خشکسالی بر تغییرات مکانی-زمانی سلامت حوزه آبخیز افین

رضا چمنی^۱، مهدی وفاخواه^{۲*} و سید حمیدرضا صادقی^۲

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

^۲ و ^۲ استاد، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۴

چکیده

امروزه خشکسالی به یکی از موضوعات داغ مورد توجه جهان تبدیل شده است اما تأثیر آن بر ارائه خدمات و سلامت حوزه آبخیزها در مواجهه با این بلای طبیعی کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر همین اساس، در این پژوهش سعی شده است تا تأثیر خشکسالی در دوره ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۸ بر سلامت حوزه آبخیز افین مبتنی بر تغییرات پایایی (R_{el})، تاب‌آوری (R_{es}) و آسیب‌پذیری (V_{ul}) مورد ارزیابی قرار گیرد. لذا، داده‌های بارندگی سه ایستگاه باران‌سنجی با روش عکس فاصله وزنی برای حوزه آبخیز و زیرحوضه‌ها میان‌یابی شد. سپس، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) بر اساس میانگین و انحراف معیار داده‌های ماهانه تعیین شد و برای محاسبه شاخص‌های R_{es} ، R_{el} و V_{ul} مورد استفاده قرار گرفت. در انتها، با محاسبه مقدار میانگین هندسی این شاخص‌ها وضعیت کلی سلامت آبخیز تعیین شد. نتایج سالانه پژوهش نشان داد، آبخیز افین به لحاظ شاخص‌های R_{es} ، R_{el} و V_{ul} به ترتیب مقادیری بین $۰/۸۳-۰/۹۲$ ، $۰/۳۳-۰/۱۷$ و $۰/۵۴-$ $۰/۲۴$ را دارا است. شاخص $R_{el}R_{es}V_{ul}$ نیز مقادیری بین $۰/۳۷-۰/۵۳$ را به خود اختصاص داده است. همچنین، متوسط شاخص سلامت حوزه آبخیز در این دوره $۰/۴۲$ محاسبه شد که نشان‌دهنده قرارگیری سلامت حوزه آبخیز در گروه متوسط است. تغییرات مکانی سلامت آبخیز نیز نشان داد، شاخص‌های R_{es} ، R_{el} و V_{ul} در زیرحوضه‌های مختلف به ترتیب مقادیری بین $۰/۸۶-۰/۸۵$ ، $۰/۲۴-۰/۲۱$ و $۰/۷۸-۰/۷۶$ را دارا هستند. نتایج تحلیل بارندگی منطقه حاکی از آن است که با توجه به ثبات نسبی بارندگی، تأثیر دخالت‌های انسانی و تشدید عوامل تهدیدکننده سلامت آبخیز، بیش از پیش بر وضعیت موجود تأثیرگذار بوده است و در صورت عدم توجه به آن تأثیرات زیان‌باری در پی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: تغییرات آب و هوایی، خراسان جنوبی، خشکسالی هواشناسی، دخالت‌های انسانی، مدیریت جامع آبخیز

مقدمه

می‌دهد (Hamel و همکاران، 2018). آبخیزها یک سامانه اجتماعی-بوم‌شناختی هستند (Cabello و همکاران، 2015؛ Gari و همکاران، 2018) که از واحدهای تعاملی متعددی مانند رودخانه‌ها، نهرها، تالاب‌ها، مخازن، سدها و انشعابات، همراه با شهرها و انسان‌ها تشکیل شده‌اند (Zhang و Cai، 2018) و تغذیه منابع آب سطحی و زیرزمینی را کنترل می‌کنند. سلامت در عملکرد آن‌ها متأثر از پدیده‌های غیرانسانی

آبخیزهای سالم از نقش غیرقابل انکاری در تامین نیازها و ارائه خدمات سالم در بخش‌های مختلف به ذینفعان برخوردار هستند (Hazbavi و همکاران، 2018؛ Ervinia و همکاران، 2019). آبخیزهای سالم، انعطاف-پذیری محلی در برابر تغییرات آب و هوایی را بهبود می‌بخشد (Ervinia و همکاران، 2019) و خدمات ضروری برای انسان و عملکردهای محیط‌زیستی را ارائه

ذی‌نفعان، استفاده از شاخص‌های مناسب در راستای شناخت وضعیت سلامت و عملکرد آبخیزها امری ضروری است (Chamani و همکاران، 2021). روش‌های متعددی برای ارزیابی سلامت آبخیزها ارائه شده است. به‌عنوان نمونه، روش فشار-حالت-پاسخ (PRS)^۵ در حوضه رودخانه یانگ و آمازون (Sun و همکاران، 2019)، چهارچوب قدرت، سازماندهی و تاب‌آوری در فلات چینگ‌های چین (VOR)^۶ (Li و همکاران، 2013) طرح ارزیابی رودخانه استرالیا^۵ (Davies و همکاران، 2000) و مدل پایایی (Rel)^۶، تاب‌آوری (Res)^۷ و آسیب‌پذیری (Vul)^۸ از جمله این روش‌ها هستند (Sadeghi و Hazbavi، 2016). در روش RelResVul، شاخص پایایی، قابلیت اطمینان تکرار یا احتمال وجود حوزه آبخیز در حالت رضایت‌بخش؛ تاب‌آوری، میزان رسیدن یک سامانه به حالت مطلوب بعد از شکست و آسیب‌پذیری، میزان نامطلوب بودن وضعیت و یا عوامل ایجادکننده را نشان می‌دهد. این مدل، با رویکردی همه‌جانبه‌نگر و بر اساس تجزیه و تحلیل، احتمال موفقیت یا شکست یک آبخیز و میزان بهبودی آن از حالت‌های نامطلوب، به ارزیابی سلامت آبخیز در شرایط مختلف می‌پردازد (Sadeghi و Hazbavi، 2017).

مطالعات کمتری وضعیت آبخیزها نسبت به خشکسالی و پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری آن را نسبت به این پدیده اقلیمی ارزیابی و سنجش کرده‌اند. در این راستا، Sadeghi و Hazbavi (2017) تغییرات مکانی و زمانی شاخص‌های RelResVul مبتنی بر خشکسالی در حوزه آبخیز شازند برای سه سال ۱۹۸۶، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۸ را ارزیابی و بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تمام زیرحوضه‌های آبخیز شازند در تمام سال‌های مورد مطالعه در شرایط ناسالم و بسیار ناسالم قرار دارند. همچنین، Hazbavi و همکاران (2018) تغییر شاخص‌های قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری با توجه به الگوهای خشکسالی در سه حوزه آبخیز Foyle در ایرلند شمالی، Xarrama در پرتغال و شازند

از جمله تغییرات آب و هوایی است. از طرفی، فعالیت‌های انسانی مانند تخریب، جنگل‌زدایی و نظایر آن سبب کاهش سلامت آبخیزها و تشدید عملکرد منفی پدیده‌های غیرانسانی می‌شود (Tsai و همکاران، 2021).

خشکسالی^۱ نیز از جمله پدیده‌های طبیعی و غیر مترقبه‌ای است که در دهه‌های اخیر و در پی تغییرات مداوم آب و هوایی، تشدید شده و با تغییر در شدت، مدت و گستردگی آن، موجب خسارت‌های مالی، جانی، تضعیف منابع اقتصادی، کاهش توانمندی‌های اجتماعی و افزایش سرعت زوال و نابودی جامعه انسانی را فراهم ساخته است (Hossaini و همکاران، 2017). خشکسالی با توجه به ماهیت پنهان و غیرقابل پیش‌بینی بودن آن، پدیده‌ای خزنده بوده است که به تدریج و نامحسوس گسترش می‌یابد و گاهی سال‌های متمادی در یک منطقه باقی می‌ماند (Fanni و همکاران، 2017).

ایران نیز از این قاعده مستثنی نیست و خشکسالی به دفعات متعدد در ایران نیز رخ داده است. نتایج و بررسی‌های تغییرات اقلیمی نیز حاکی از آن است که در ۳۰ سال آینده خشکسالی در ایران افزایش خواهد یافت و بخش اعظمی از ایران با خشکسالی‌های شدید و خیلی شدید مواجه خواهند شد. مقادیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI)^۲ در خراسان جنوبی نیز موید گسترش این پدیده در استان است، به طوری که بر اساس گزارش خشکسالی اداره کل هواشناسی استان در سال ۲۰۱۷، بارندگی در استان ۲۱ درصد کاهش داشته است (Hossaini و همکاران، 2017). بر همین اساس، مطالعات متعدد با شاخص‌های مختلفی از جمله SPI، RDI، RAI و SAIP تاثیر خشکسالی در خراسان جنوبی را بررسی کرده‌اند و نتایج نشان از آن دارد که در دهه‌های گذشته این پدیده در این استان تشدید شده است (Fanni و همکاران، 2017؛ Dulatabadi و Khasheisivaki، 2017؛ Karimi و همکاران، 2018؛ Salehi Tabas و همکاران، 2020).

با توجه به ماهیت پیچیده خشکسالی و تاثیرات مستقیم و غیرمستقیم زیاد آن بر زندگی انسان و سایر

⁵ Australian river assessment scheme

⁶ Reliability

⁷ Resilience

⁸ Vulnerability

¹ Drought

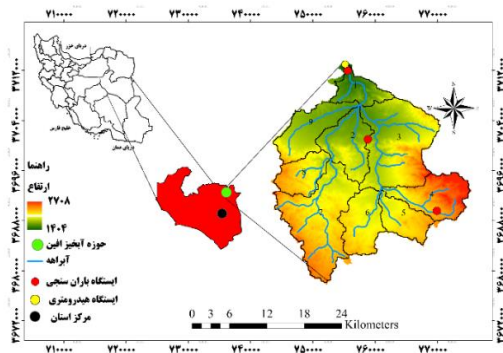
² Standardized Precipitation Index (SPI)

³ Presser-State-Response

⁴ Vigor-Organization-Resilience

استفاده شد. به منظور میان‌یابی داده‌های نقطه‌ای برای تجزیه و تحلیل شاخص‌های سلامت هر زیرحوضه، از روش عکس فاصله وزنی^۱ که در سایر پژوهش‌ها در خراسان جنوبی استفاده شده است، استفاده شد که در رابطه (۱) ارائه شده است (Shojaee و همکاران، 2016). در رابطه (۱)، R_i و d به ترتیب بارش در ایستگاه i و فاصله زیرحوضه تا ایستگاه i است (Chamani و همکاران، 2021).

$$R = \sum_1^n \left[\frac{R_i}{d^2} \right] \div \left[\frac{1}{d^2} \right] \quad (1)$$



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز افین و پراکنش مکانی زیرحوضه‌ها و ایستگاه‌های باران‌سنجی آن

محاسبه SPI: نمایه بارندگی استاندارد شده، صرفاً بر پایه داده‌های بارندگی استوار است و بر محاسبه وقوع بارندگی در مقیاس‌های مختلف زمانی تأکید دارد (Rajabi و Vafakhah, 2005). این شاخص به تعداد انحراف داده‌های بارش مشاهده شده از میانگین بلند مدت خود اشاره دارد. استفاده از این شاخص می‌تواند ابزار قدرتمندی برای تعیین میزان، شدت و تغییرات مکانی خشکسالی باشد. در این شاخص چنانچه بارش بیشتر از میانگین بلند مدت خود باشد، SPI مثبت است و اگر بارش کمتر از میانگین بلند مدت بارندگی باشد، SPI منفی است. این شاخص به شرح رابطه (۲) محاسبه می‌شود که در آن، x_i و x و σ به ترتیب بارش مشاهده ای، میانگین بارش و انحراف معیار دوره بارندگی است (Chamani و همکاران، 2021). در این پژوهش، از شاخص SPI یک ماهه برای تعیین وضعیت سلامت آبخیز در هر سال استفاده شده است (Hazbavi و همکاران، 2018).

در ایران را ارزیابی کردند. متوسط شاخص سلامت به- ترتیب برای آبخیزهای Xarrama, Foyle و شازند ۰/۵۴، ۰/۵۳ و ۰/۳۷ به دست آمد.

در مطالعه‌های دیگر، Chamani و همکاران (2021) پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری حوزه آبخیز چالوس مبتنی بر شاخص خشکسالی را در دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۶ با مدل RelResVul ارزیابی نمودند. نتایج پژوهش حاکی از آن است، شاخص‌های R_{el} ، R_{es} و V_{ul} به ترتیب ۰/۵، ۰/۲۳ تا ۰/۶۲ و ۰/۰۶ تا یک را به خود اختصاص داده است. میانگین هندسی این شاخص‌ها نیز بین ۰/۱۹ تا ۰/۵۸ متغیر بوده است. متوسط شاخص سلامت حوزه آبخیز چالوس بر اساس پویایی شاخص خشکسالی ۰/۴۵ محاسبه شد که این آبخیز در گروه متوسط قرار گرفته است.

مطالعات متعددی به ارزیابی خشکسالی در آبخیزهای مختلف پرداخته و آن را تعیین کرده‌اند اما میزان اثرپذیری و آسیب‌پذیری و قدرت برگشت آبخیزها به شرایط مطلوب پس از خشکسالی مورد توجه قرار نگرفته است. بر این اساس، در این پژوهش سعی شده است تغییرات مکانی و زمانی سلامت در حوزه آبخیز افین خراسان جنوبی کمی و میزان پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری این آبخیز در برابر خشکسالی ارزیابی شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز افین در خراسان جنوبی و در طول جغرافیایی ۳۱° ۵۲' تا ۳۵° ۵۳' شرقی و عرض جغرافیایی ۴۲° ۳۳' تا ۵۸° ۳۳' شمالی واقع شده است. متوسط بارندگی منطقه ۱۳۱/۸ میلی‌متر و متوسط دمای آن، ۱۴/۷ درجه سانتی‌گراد است. اقلیم منطقه بر اساس طبقه‌بندی آمبرژه خشک سرد و بر اساس طبقه‌بندی دمارتن خشک است (Kavakebi و همکاران، 2020). موقعیت حوزه آبخیز افین و زیرحوضه‌های آن و پراکنش ایستگاه‌های باران-سنجی در شکل ۱، نشان داده شده است.

داده‌های اقلیمی: در این پژوهش از داده‌های بارندگی روزانه سه ایستگاه باران‌سنجی برای دوره ۱۳۸۴-۱۳۹۸

¹ Inverse Distance Weighting

گرفته می‌شود تا تاثیر هر یک از شاخص‌ها در سلامت آبخیز دخالت داده و نمایی کلی از سلامت آبخیز ارائه شود (Sadeghi و همکاران، 2019). برای محاسبه $R_{el}R_{es}V_{ul}$ نهایی، از سه شاخص پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری با توجه به ضرورت لحاظ حساسیت بیشتر نسبت به تغییرات متغیرهای جداگانه بر اساس رابطه (۸)، میانگین هندسی ($R_{el}R_{es}V_{ul}$) گرفته شد (Ervinia و همکاران، 2019).

$$(R_{el}R_{es}V_{ul}) = [\prod_{i=1}^3 R_{el} \cdot R_{es} \cdot V_{ul}]^{1/3} \quad (۸)$$

تقسیم‌بندی سلامت آبخیز: برای توصیف و تفسیر سلامت آبخیزها و شرایط آن‌ها هر یک از شاخص‌های سلامت آبخیز به پنج گروه تقسیم‌بندی شده‌اند. این گروه‌بندی در جدول ۱، ارائه شده است (Sadeghi و همکاران، 2018).

جدول ۱- گروه‌بندی وضعیت سلامت آبخیز

دامنه	۳ ۰	۴ ۰	۵ ۰	۶ ۰	۷ ۰
گروه	بسیار ناسالم	ناسالم	متوسط	سالم	خیلی سالم

نتایج و بحث

تغییرات زمانی بارندگی و شاخص SPI: در شکل ۲، متوسط بارندگی و تغییرات سالیانه شاخص SPI برای دوره آماری ۱۳۹۸-۱۳۸۴ ارائه شده است. بر این اساس، کمترین و بیشترین بارندگی به میزان ۸۵/۹۴ و ۱۹۰/۲۶ میلی‌متر به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۸۸ رخ داده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، بارندگی در طول دوره آماری در آبخیز افین با شیب متوسط ۰/۹۲ میلی‌متر در سال افزایش یافته است. تغییرات شاخص SPI در حالت استاندارد شده و غیر استاندارد در شکل ۳ مشاهده می‌شود. بیشترین و کمترین میزان شاخص SPI مربوط به سال ۱۳۹۷ و به ترتیب با مقادیر ۲۹/۴۴ و ۹/۱۷- است. با توجه به این که مقدار این شاخص در سال ۱۳۹۷ نسبت به سایر سال‌ها از دامنه متفاوتی برخوردار است، از ارائه آن در شکل ۳، صرف نظر شده است.

$$SPI = (x_i - \bar{x}) / \sigma \quad (۲)$$

محاسبه شاخص‌های R_{el} و R_{es} ، V_{ul} : برای محاسبه شاخص‌های R_{el} و R_{es} ، V_{ul} نیاز به حذف اثر بزرگی و قابل مقایسه کردن داده‌ها است. بدین منظور، از رابطه (۳) استفاده شد (Sadeghi و Hazbavi، 2017). سپس، برای محاسبه شاخص‌های سلامت از تحلیل و ارزیابی تغییرات مکانی ماهانه SPI بر اساس رابطه‌های (۴) تا (۶) استفاده شد.

$$Y = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (۳)$$

$$Reliability (R_{el}) = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d[j]}{T} \quad (۴)$$

$$Resilience (R_{es}) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d[j] \quad (۵)$$

$$Vulnerability (V_{ul}) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left(\frac{L_{obs}(j) - L_{min}(j)}{L_{obs}(j) - L_{min}(j)} \right) H[L_{obs}(j) - L_{min}(j)] \quad (۶)$$

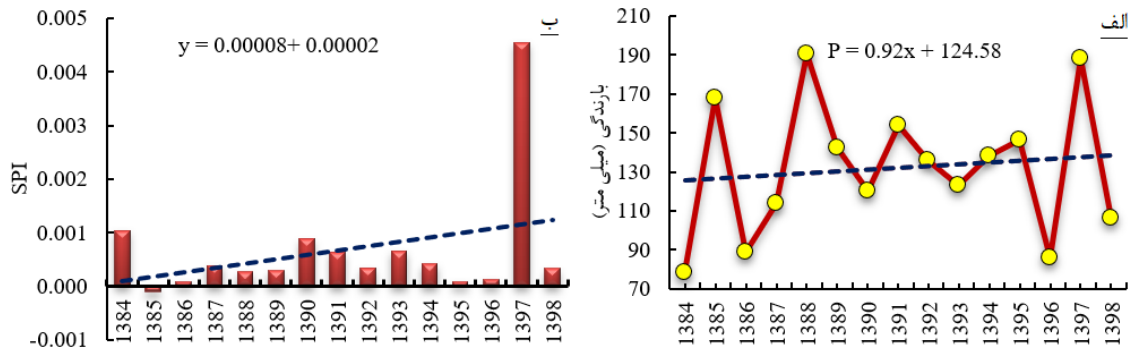
در این رابطه‌ها، M تعداد وقایع شکست یا تعداد ماه‌هایی که SPI زیر آستانه تعیین شده قرار می‌گیرد، $d(j)$ به مدت زمان رویداد شکست j th اشاره دارد، T تعداد ماه‌ها یا فاصله زمانی هر محاسبه، $L_{obs}(i)$ مقدار مشاهده شده، $L_{std}(i)$ مقدار حد آستانه و $[H]$ عملکرد تابع پله‌ای Heaviside^۱ است. از تابع Heaviside برای راستای جلوگیری از ورود حوادث شکست در محاسبه آسیب‌پذیری استفاده می‌شود. مقدار کل $[H]$ ، در رابطه (۶) برای مقادیر منفی و مقادیر مثبت به ترتیب صفر و یک در نظر گرفته می‌شود. در ادامه، برای حذف اثرات بزرگی و ایجاد قابلیت مقایسه داده‌ها با یکدیگر بر اساس رابطه (۶) اقدام به استانداردسازی داده‌ها شد (Ervinia و همکاران، 2019).

در رابطه (۶)، اگر مقادیر $L_{obs}(i)$ و $L_{std}(i)$ کوچک شوند، مقدار V_{ul} به سمت صفر میل می‌کند. لذا، مقدار V_{ul} منفی و بر خلاف دو شاخص R_{es} و R_{el} است و برای ایجاد انسجام بین سه شاخص، این شاخص به شکل زیر و بر اساس رابطه (۷) اصلاح می‌شود (Ervinia و همکاران، 2019).

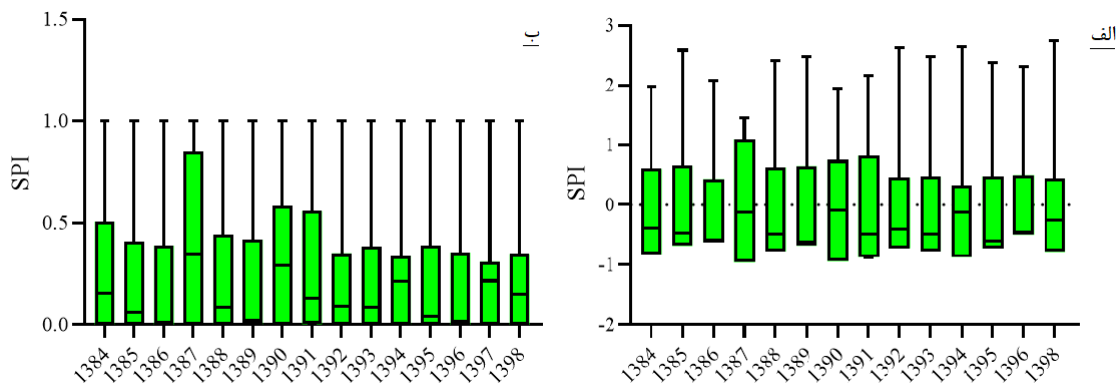
$$V = 1 - V_{ul} \quad (۷)$$

با توجه به این که پس از تعیین شاخص‌های $R_{el}R_{es}V_{ul}$ و تعیین هر یک از آن‌ها برای دوره زمانی مورد نظر در آبخیز افین و زیرحوضه‌های آن، نیازمند ارائه و نمایش وضعیت کلی سلامت آبخیز است، از شاخص‌های پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری میانگین

^۱ Heaviside Step Function



شکل ۲- متوسط بارندگی سالیانه (الف) و شاخص SPI (ب) حوزه آبخیز افین برای دوره ۱۳۸۴-۱۳۹۸



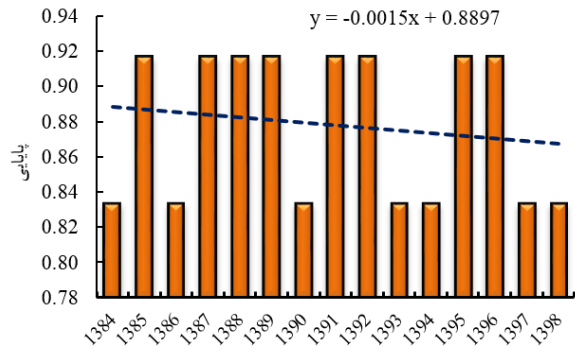
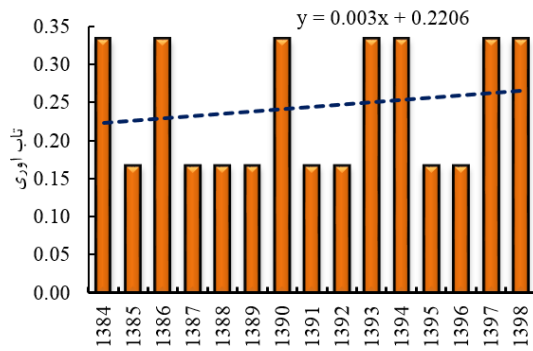
شکل ۳- تغییرات استاندارد شده (الف) و سالیانه (ب) شاخص SPI حوزه آبخیز افین برای دوره آماری ۱۳۸۴-۱۳۹۸

بسیار ناسالم قرار دارد. این در حالی است که در سایر سال‌های آماری نیز از شرایط مناسب برخوردار نبوده است و در گروه ناسالم قرار دارند.

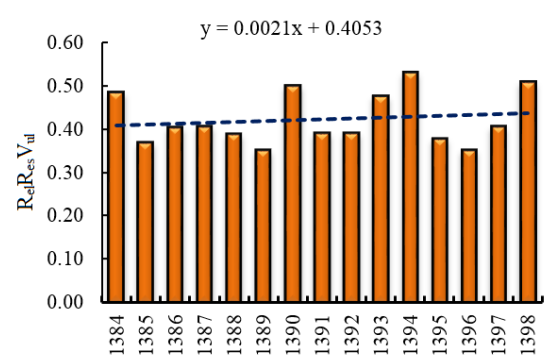
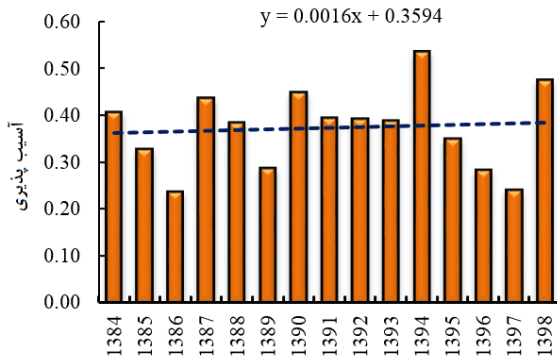
تغییرات آسیب‌پذیری آبخیز افین (شکل ۵) نشان می‌دهد، سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۴ به ترتیب با مقادیر ۰/۲۳ و ۰/۵۳ کمترین و بیشترین میزان آسیب‌پذیری را دارا هستند. تقسیم‌بندی سلامت آبخیز بر اساس شاخص آسیب‌پذیری نیز نشان می‌دهد سال‌های ۱۳۸۴، ۱۳۸۷، ۱۳۹۰، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۸ در گروه ناسالم و سایر سال‌های دوره مطالعاتی در گروه بسیار ناسالم قرار دارند. پس از میانگین‌گیری شاخص‌های سلامت آبخیز، وضعیت کلی سلامت آبخیز ($RelRes_{V_{ul}}$) در شکل ۵، نشان داده شده است. بر این اساس، آبخیز به دو گروه بسیار ناسالم (۱۳۸۵، ۱۳۸۶، ۱۳۸۸، ۱۳۸۹، ۱۳۹۱، ۱۳۹۲، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶) و ناسالم (۱۳۸۴، ۱۳۸۷، ۱۳۹۰، ۱۳۹۳، ۱۳۹۴، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸) تقسیم شده است.

تغییرات زمانی شاخص پایایی، تاب‌آوری و

آسیب‌پذیری: شاخص‌های پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری و $RelRes_{V_{ul}}$ در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. تغییرات شاخص پایایی در دوره آماری مورد مطالعه نشان می‌دهد، سال ۱۳۸۵، ۱۳۸۷، ۱۳۸۸، ۱۳۸۹، ۱۳۹۱، ۱۳۹۲، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ بیشترین شاخص پایایی به میزان ۰/۹۲ و سایر سال‌های دوره مورد مطالعه با میزان ۰/۸۳ کمترین حالت پایایی را به خود اختصاص داده‌اند. بر اساس گروه‌بندی سلامت آبخیز (جدول ۱)، آبخیز افین به لحاظ پایایی در شرایط بسیار سالم قرار دارد. اما با توجه به شکل ۴، این شاخص در کل دوره حالت نزولی داشته است و هر ساله از میزان پایایی و پویایی آبخیز در برابر خشکسالی کاسته می‌شود. تغییرات شاخص تاب‌آوری آبخیز افین برخلاف شاخص پایایی در شرایط مساعدی قرار ندارد، به طوری که در سال‌های ۱۳۸۵، ۱۳۸۷، ۱۳۸۸، ۱۳۸۹، ۱۳۹۱، ۱۳۹۲، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ در بدترین شرایط ممکن و در گروه



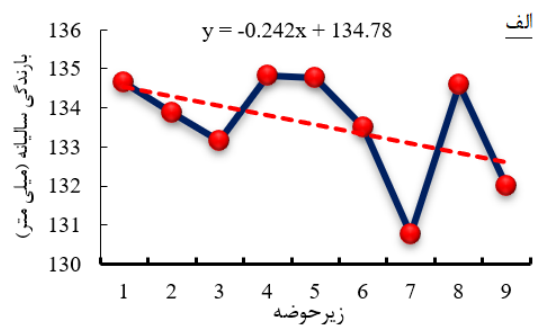
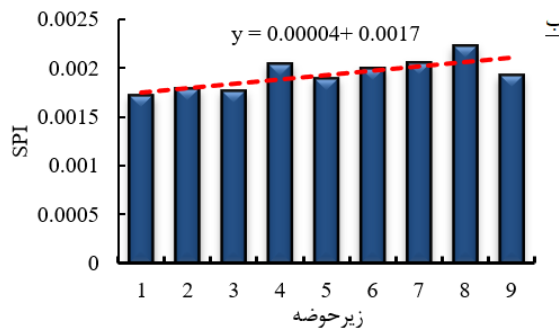
شکل ۴- تغییرات سالیانه شاخص پایابی (R_au) و تاب آوری (R_es) حوزه آبخیز افین



شکل ۵- تغییرات سالیانه شاخص $R_{es}V_{ui}$ و شاخص آسیب پذیری (V_ui) در حوزه آبخیز افین

۱۳۱ میلی متر، بیشترین و کمترین مقدار بارندگی را در دوره مطالعاتی به خود اختصاص داده‌اند.

تغییرات مکانی بارندگی و شاخص SPI: در شکل ۶، تغییرات مکانی بارندگی و شاخص SPI در نه زیرحوضه افین نشان داده شده است. بر اساس شکل ۶، زیرحوضه-های شماره ۵، ۴، ۱ و ۸ با ۱۳۵ و زیرحوضه شماره ۷ با

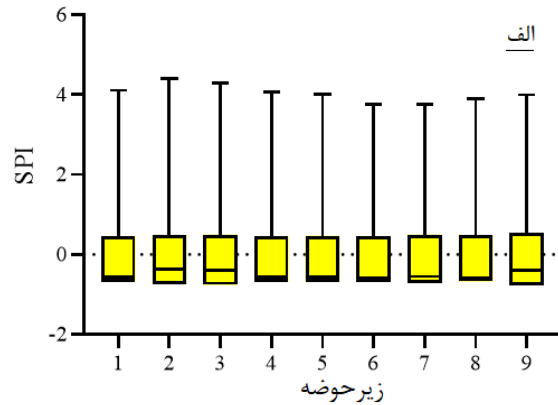
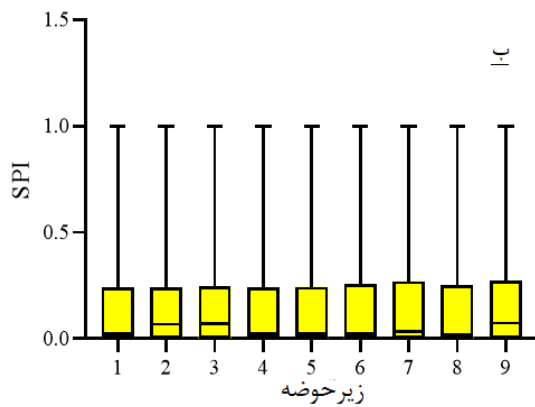


شکل ۶- متوسط بارندگی سالیانه و شاخص SPI حوزه آبخیز افین

توجه به شکل ۶، مقادیر بارندگی از غرب به شرق حوضه نیز کاهش یافته است و زیرحوضه‌های ۷ و ۹، از بارندگی کمتری نسبت به سایر زیرحوضه‌ها برخوردار

به‌طورکلی، بارندگی در زیرحوضه‌ها از خروجی آبخیز به سمت بالادست روند نزولی داشته و با شیب متوسط ۰/۲۴۲ میلی متر در سال کاهش یافته است. با

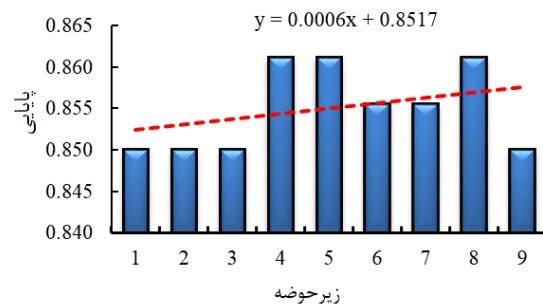
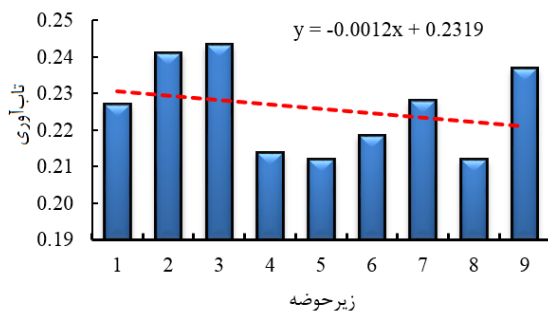
شکل ۷ نشان می‌دهد، بیشترین مقدار این شاخص متعلق به زیرحوضه شماره ۲ به میزان ۴/۴۰ و کمترین آن به زیرحوضه شماره ۹ به میزان ۰/۷۶- تعلق دارد.



شکل ۷- تغییرات SPI سالیانه (الف) و استاندارد شده (ب) حوزه آبخیز افین

شاخص پایایی در زیرحوضه‌های مختلف، متفاوت است. بیشترین آن در زیرحوضه‌های شماره ۴، ۵ و ۸ با مقدار ۰/۸۶ و کمترین آن در سایر زیرحوضه‌ها و به مقدار ۰/۸۵ است.

تغییرات مکانی شاخص پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری: تغییرات شاخص‌های سلامت آبخیز در شکل‌های ۸ تا ۱۰، ارائه شده است. بر اساس شکل ۸،

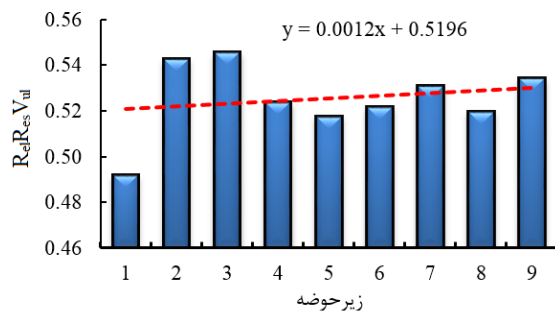


شکل ۸- تغییرات سالیانه شاخص پایایی (ReI) و تاب‌آوری (Res) حوزه آبخیز افین

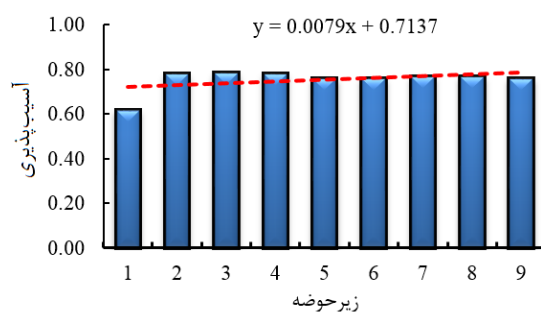
پایین زیرحوضه‌ها، پایایی بالای این زیرحوضه‌ها در برابر خشکسالی سبب شده است از آسیب‌پذیری نسبتاً کمتری در برابر خشکسالی برخوردار باشند (شکل ۹). همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، تمامی زیرحوضه‌ها در برابر خشکسالی آسیب‌پذیر هستند و زیرحوضه شماره ۱ با مقدار ۰/۶۲ بیشترین آسیب‌پذیری را متحمل خواهد شد. با توجه به تاب‌آوری پایین زیرحوضه‌ها و آسیب‌پذیر بودن آن‌ها در برابر خشکسالی و تغییر بارندگی‌ها، وضعیت کلی سلامت آبخیز نیز در

روند تغییرات پایایی در زیرحوضه‌های افین، نشان دهنده روند صعودی آن با شیب جزئی است. اما وضعیت این زیرحوضه‌ها بسیار شکننده است، به طوری که تاب‌آوری بسیاری پایینی (شکل ۸) در برابر تغییرات خشکسالی از خود نشان می‌دهند. طبقه‌بندی تاب‌آوری در زیرحوضه‌ها نشان می‌دهد، زیرحوضه‌های شماره ۴، ۵ و ۸ با مقدار ۰/۲۱ و زیرحوضه‌های شماره ۲، ۳ و ۹ با مقدار ۰/۲۴ به ترتیب کمترین و بیشترین آسیب‌پذیری را به خود اختصاص داده‌اند. با وجود تاب‌آوری

شماره ۳ با مقدار ۰/۵۴ از بیشترین سلامت متوسط در برابر خشکسالی برخوردار است.



تمامی زیرحوضه‌ها پایین است. بر این اساس، زیرحوضه شماره ۱ با مقدار ۰/۴۹ از کمترین سلامت و زیرحوضه



شکل ۹- تغییرات سالیانه شاخص آسیب‌پذیری (V_{ul}) و شاخص $R_{ul}R_{es}V_{ul}$ حوزه آبخیز افین

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده شد، متوسط بارندگی در سطح آبخیز نزدیک به نرمال بوده است. Fanny و همکاران (2018) نیز با تحلیل خشکسالی در خراسان جنوبی بر این نکته تاکید کرده‌اند که نتایج این پژوهش را تایید می‌کنند. Golkarhamzeiyazd و همکاران (2016)، در خراسان جنوبی با پهنه‌بندی اقلیم استان نشان دادند، محدوده ایستگاه زهان (واقع در داخل حوضه و مرز زیرحوضه شماره ۴ و ۵) دارای اقلیم کوهستانی سرد و نیمه‌خشک است و دما از کمترین تاثیر در این منطقه نسبت به سایر بخش‌های استان برخوردار است.

با توجه به تغییر بارندگی در کل استان، تغییرات دمایی کمتر در این منطقه سبب شده است، آبخیز افین و زیرحوضه‌های آن از آسیب‌پذیری کمتری نسبت به تغییرات بارندگی برخوردار باشند. از طرفی، وقوع طوفان در استان در فصل‌های بهار و تابستان باعث کاهش تولیدات گیاهی، لخت بودن سطح خاک و ایجاد گرد و خاک در منطقه می‌شود که می‌تواند تاب‌آوری و قدرت انتقال آبخیز از حالت ناسالم به حالت سالم را کاهش دهد که تاییدی بر نتایج این پژوهش است.

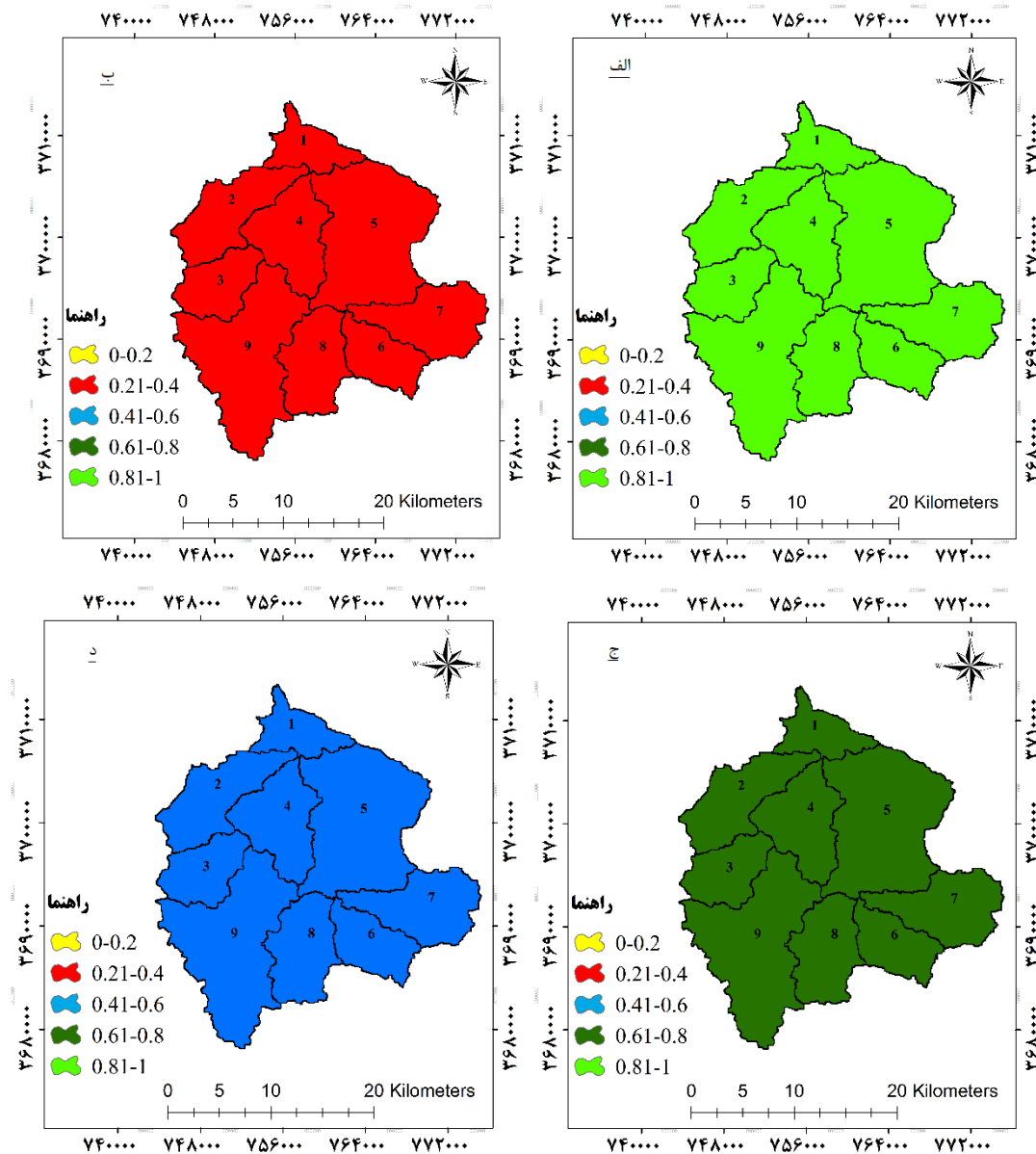
تحلیل نتایج سلامت آبخیز افین نشان داد، این آبخیز در شرایط متوسط از لحاظ سلامت قرار دارد و با توجه به تغییرات مکانی و زمانی بارندگی‌ها و تغییر در الگوی آن، باعث برهم خوردن تعادل و پایداری شرایط آبخیز شده است و ارائه خدمات و تامین نیازهای انسان با مشکل مواجه خواهد شد (Chamani و همکاران،

همان‌طور که در شکل ۱۰ نیز نشان داده شده است و بر اساس گروه‌بندی ارائه شده در جدول ۱، شاخص پایداری در آبخیز افین از شرایط مناسبی برخوردار بوده و در گروه پنج یا بسیار سالم قرار گرفته است. اگرچه با توجه به کاهش بارندگی‌ها، حوزه آبخیز توانسته است پایداری خود را حفظ کند، اما به مرور زمان و در طول دوره آماری مورد مطالعه از تاب‌آوری و قدرت برگشت آبخیز به شرایط سالم به شدت کاسته شده است، به‌طوری که بر اساس جدول ۱، آبخیز افین از نظر تاب‌آوری در گروه ناسالم قرار دارد و چنانچه بارندگی‌ها با کاهش مواجه شود، توانایی حفظ شرایط موجود را نداشته و با آسیب‌های جدی مواجه خواهد شد.

نتایج آسیب‌پذیری حوضه در شکل ۱۰ نشان می‌دهد، با توجه به این‌که بارندگی‌ها در آبخیز در طول دوره آماری روند افزایشی داشته است (شکل ۲)، حوضه از آسیب‌پذیری کمتری برخوردار است و در گروه سالم قرار گرفته است. اما با توجه به پایین بودن شرایط تاب‌آوری منطقه، چنانچه آبخیز افین با تنش و کاهش بارندگی‌ها مواجه شود، به سرعت آسیب خواهد دید و در شرایط بحرانی قرار خواهد گرفت. شرایط متوسط سلامت آبخیز (شکل ۱۰) بیان‌کننده آن است که این آبخیز با توجه به روند نسبتاً پایدار بارندگی فعلی، در شرایط متوسط از لحاظ سلامت قرار دارد و با کاهش بارندگی، به شدت از سلامت آبخیز کاسته خواهد شد و تنش‌های مختلف محیطی در حوضه رخ خواهد داد.

منطقه در آینده با خشکسالی‌های خفیف و متوسط روبرو خواهد شد (Salehi Tabas و همکاران، 2020) که می‌تواند برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و استفاده از منابع مختلف آبخیز را با مشکل مواجه سازد (Hui و همکاران، 2018).

بر همین اساس، نتایج پژوهش‌های تغییرات اقلیمی در آبخیز افین نشان می‌دهد در آینده نزدیک (۲۰۴۵-۲۰۱۵) و دور (۲۰۷۵-۲۰۴۵) و تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5، متوسط بارندگی کاهش خواهد یافت. این در حالی است که



شکل ۱۰- تغییرات مکانی شاخص‌های پایایی (الف)، تاب‌آوری (ب)، آسیب‌پذیری (ج) و وضعیت کلی سلامت (د) آبخیز افین

طی سال‌های گذشته در آبخیز افین افزایش سطح زیرکشت باغ‌های زرشک، افزایش جمعیت و کاهش منابع آبی تحت تاثیر خشکسالی بیش از پیش بر تنش-های مردمی افزوده و اختلافات محلی را به وجود آورده است که در آینده نیز تشدید خواهد شد (Ahmadi و Ramezani، 2017).

مطالعات Kavakebi و همکاران (2020)، در پیش‌بینی ریسک خشکسالی هواشناسی در حوزه آبخیز افین نشان داد، تحت تاثیر تغییر اقلیم و تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 در دوره‌های ۲۰۲۰-۲۰۴۶ و ۲۰۷۴-۲۱۰۰، مدت، تعداد و وقوع خشکسالی در آبخیز افین افزایش خواهد یافت. این در حالی است که

در این پژوهش، تغییرات زمانی و مکانی سلامت آبخیز افین مبتنی بر خشکسالی بر اساس چارچوب تغییرات پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری برای دوره ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۸ بر اساس داده‌های سه ایستگاه باران‌سنجی واقع در داخل آبخیز مورد ارزیابی و سنجش قرار گرفت.

نتایج پژوهش بیان‌کننده آن است که با توجه به ثبات نسبی بارندگی در منطقه، آبخیز افین از پایایی مناسبی برخوردار است و متوسط شاخص پایایی در آبخیز افین ۰/۸۷ محاسبه شد که در گروه بسیار سالم قرار گرفت. این در حالی است که این آبخیز از تاب‌آوری بسیار پایینی برخوردار است، به طوری که متوسط این شاخص ۰/۲۴ تعیین شد و در گروه ناسالم قرار دارد. به لحاظ آسیب‌پذیری نیز این آبخیز با مقدار ۰/۳۷ در گروه ناسالم تقسیم‌بندی شد.

متوسط شاخص‌های سلامت آبخیز حاکی از آن است که آبخیز افین با مقدار ۰/۴۲ از لحاظ سلامت در گروه متوسط قرار گرفته و نشان می‌دهد چنانچه در آینده در روند بارندگی‌ها تغییری ایجاد شود، حوضه آسیب‌پذیری زیادی را متحمل می‌شود و برگشت آن به شرایط مطلوب بسیار مشکل خواهد بود. بر این اساس، توجه به تغییرات مکانی تخریب آبخیزها و شناسایی برنامه‌ریزی در راستای مدیریت و اصلاح آن‌ها برای جلوگیری از ورود آسیب‌های بیش‌تر به منطقه ضروری است.

افزایش جمعیت و به تبع آن افزایش سطوح غیرقابل نفوذ، آسیب‌پذیری حوضه در برابر دسترسی به آب و تامین نیازهای ذی‌نفعان را در پی خواهد داشت (Chamani و همکاران، 2020) که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر درآمد و استقلال مالی آبخیزنشینان تاثیر خواهد گذاشت و با کاهش درآمد این افراد، تخریب و استفاده غیر اصولی از اراضی در راستای جبران خسارت‌های مالی افزایش خواهد داشت و پذیرش طرح‌های مدیریتی و احیایی در راستای تقویت سلامت آبخیز را کاهش خواهد داد.

این امر در آبخیز افین نیز کاملاً مشهود است و با کاهش بارندگی‌ها و کاهش آب در دسترس، تولیدات محصول زعفران که یکی از بزرگ‌ترین منابع درآمدی مردم محلی است، با کاهش مواجه شده است، به طوری که کاهش عملکرد محصول زعفران در مناطق تحت کشت آن در خراسان جنوبی تا حد قابل توجهی منطبق بر دوره‌هایی با کاهش بارندگی‌ها و افزایش خشکسالی‌ها بوده است (Karimi و همکاران، 2019). بر این اساس، کاهش مقادیر شاخص $RelResV_{ul}$ موید کاهش بارندگی و کاهش منابع آب در دسترس در آبخیز است که نیازمند برنامه‌ریزی بلند مدت مدیریتی و حفاظتی برای استفاده پایدار از منابع آب در بلند مدت است (Sadeghi و Hazbavi، 2017).

نتیجه‌گیری

منابع مورد استفاده

- Ahmadi, A. and A. Ramezani. 2017. Explaining the socio-political tensions caused by water in South Khorasan, case study: Esfadan and Afin regions. *Geography*, 15(52): 260-278 (in Persian).
- Cabello, V., B. Willaarts, M. Aguilar and L. Del Moral. 2015. River basins as social-ecological systems: linking levels of societal and ecosystem water metabolism in a semiarid watershed. *Ecology and Society*, 20(3): 20.
- Cai, Y. and L. Zhang. 2018. Editorial: multi-scale ecological indicators for supporting sustainable watershed management. *Ecological Indicator*, 92: 1-10.
- Chamani, R., S.H.R. Sadeghi, M. Vafakhah and M. Naghdi. 2021. Reliability, resilience and vulnerability of Chalous Watershed based on drought index. 14(1): 65-75 (in Persian).
- Davies, P.E., J.F. Wright, D.W. Sutcliffe and M.T. Furse. 2000. Development of a national river bio assessment system (AUSRIVAS) in Australia. In: assessing the biological quality of fresh waters: RIVPACS and other techniques. Proceedings of an International Workshop Held in Oxford, UK. Freshwater Biological Association (FBA), Far Sawrey, Ambleside, Cumbria, UK, 113-124 pages.
- Dulatabadi, S. and A. Khasheivaki. 2017. Estimation of saffron yield using drought index RDI, case study: South Khorasan Province. *Journal of Saffron Research*, 7(1): 161-176 (in Persian).
- Ervinia, A., J. Huang, Y. Huang and J. Lin. 2019. Coupled effects of climate variability and land use pattern on surface water quality: an elasticity perspective and watershed health indicators. *Science of the Total Environment*, 693: 133592.

8. Fanni, Z., H. Khalilollahi, Zh. Sajjadi and M. Falsolaiman. 2017. Analysis of causes and consequences of drought in South Khorasan and Birjand. *Planning and Arranging Space*, 20(4): 175-200 (in Persian).
9. Gari, S.R., C.E.O. Guerrero, B. Uribe, J.D. Icely and A. Newton. 2018. A DPSIR-analysis of water uses and related water quality issues in the Colombian Alto and Medio Dagua community council. *Water Science*, 32: 318-337.
10. Golkarhamzeiyazd, H.R., M. Rezayinezhad and M. Tavousi. 2016. Climatic zoning of South Khorasan Province with GIS software. *Journal of Soil and Water Resources Protection*, 6(1): 47-60 (in Persian).
11. Hamel, P., D. Riveros-Iregui, D. Ballari, T. Browning, R. Célleri, D. Chandler, K.P. Chun, G. Destouni, S. Jacobs, S. Jasechko, M. Johnson, J. Krishnaswamy, M. Poca, P.V. Pompeu and H. Rocha. 2018. Watershed services in the humid tropics: opportunities from recent advances in ecohydrology. *Ecohydrology*, 11(3): 1-42.
12. Hazbavi, Z., J.E.M. Baartman, J.P. Nunes, S.D. Keesstra and S.H.R. Sadeghi. 2018. Changeability of reliability, resilience, and vulnerability indicators with respect to drought patterns. *Ecological Indicators*, 87: 196-208.
13. Hossaini, S.M., K. Roosta, A. Zamanipour and M. Taymuri. 2017. Farmers' perceptions of the consequences of drought with a phenomenological approach, case study: South Khorasan Province. *Journal of Agricultural Extension and Education Research*, 10(4): 63-74 (in Persian).
14. Karimi, M., M. Bannayan Aval and M. Mousavi Baygi. 2019. Drought and vulnerability assessment in the fluctuation of saffron production affected by rainfall shortage, case study: Razavi and South Khorasan provinces. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 3(13): 773-787 (in Persian).
15. Kavakebi, Gh., M. Mousavi Baygi, A. Alizade, A. Mosaedi and M. Jabbari Noghabi. 2020. Development of weather meteorological drought forecast model, case study: Afin Sub-basin. *Journal of Water and Soil*, 33(6): 943-958 (in Persian).
16. Li, Y.Y., S.K. Dong, L. Wen, X.X. Wang and Y. Wu. 2013. Three-dimensional framework of Vigor, Organization, and Resilience (VOR) for assessing rangeland health: a case study from the Alpine Meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Eco Health*, 10:423-433.
17. Sadeghi, S.H.R. and Z. Hazbavi. 2017. Spatiotemporal variation of watershed health propensity through reliability-resilience-vulnerability based drought index, case study: Shazand Watershed in Iran. *Science of the Total Environment*, 587: 168-176.
18. Sadeghi, S.H.R. and Z. Hazbavi. 2016. Watershed health (Part 1) conceptual model of Reliability, Flexibility and Vulnerability (RRV). *Extension and Development of Watershed Management*, 14: 39-43 (in Persian).
19. Salehi Tabas, M., M. Yaghoobzadeh, Gh.R. Zamani and M. Amirabadizadeh. 2020. The effect of climate change on drought severity and frequency in South Khorasan. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2(14): 482-497 (in Persian).
20. Shojaei, T., M. Baaghideh and G. Fallah. 2016. Statistical and synoptic analysis of dust storm in South Khorasan Province in the period 2000-2014. *Two Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 3(1): 58-70 (in Persian).
21. Sun, R., P. Yao, W. Wang, B. Yue and G. Liu. 2019. Assessment of wetland ecosystem health in the Yangtze and Amazon river basins. *International Journal of Geo-Information*, 6(81): 2-14.
22. Tsai, Y.W., J.Y. Lin and Y.C.C. Chen. 2021. Establishment of the watershed health indicators and health check of reservoirs. *Ecological Indicators*, 127: 107779.
23. Vafakhah, M. and M. Rajabi. 2005. Efficiency of meteorological drought indices for monitoring and evaluation of droughts in Bakhtegan, Tasht and Maharloo lakes. *Desert*, 2(10): 369-372 (in Persian).

Effect of drought on temporal-spatial changes of the Efin Watershed health

Reza Chamani¹, Mehdi Vafakhah^{2*} and Seyed Hamid Reza Sadeghi³

¹ PhD Student in Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor and ^{2 and 3} Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Science, Tarbiat Modares University, Iran

Received: 26 August 2021

Accepted: 26 December 2021

Abstract

Today, drought has become one of the hot topics of global concern, but its impact on the provision of services and functional health of watersheds in the face of this natural disaster has been less evaluated. Accordingly, in this study, the effect of drought on the Efin Watershed health has been evaluated based on changes in Reliability (R_{el}), Resilience (R_{es}) and Vulnerability (V_{ul}) indicators in the period 2005-2019. Based on this, the rainfall data of three rain gauge stations were interpolated using Inverse Distance Weighting (IDW) for the watershed and sub-watersheds. Standardized Precipitation Index (SPI) was then determined based on the mean and standard deviation of monthly data and was used to calculate the R_{el} , R_{es} and V_{ul} indicators. Finally, the overall health status of the watershed was determined by calculating the geometric mean of these indicators. The annual results showed that Efin Watershed in terms of R_{el} , R_{es} and V_{ul} indicators extends between 0.83-0.92, 0.17-0.33 and 0.24-0.54, respectively. The $R_{el}R_{es}V_{ul}$ index also has values between 0.37-0.53. The average watershed health indicator in this period was also calculated to be 0.42, which indicates mean watershed health condition. Spatial variations of watershed health also showed that R_{el} , R_{es} and V_{ul} indicators fluctuated between 0.85-0.86, 0.21-0.24 and 0.76-0.78 in different sub-watersheds. The results of rainfall analysis of the region, indicate that due to the relative stability of rainfall, the impact of human intervention and intensification of watershed health threatening factors, more than ever effect on the current situation and if not addressed will have harmful effects.

Keywords: Climate change, Comprehensive watershed management, Human interventions, Meteorological drought, South Khorasan

* Corresponding author: vafakhah@modares.ac.ir