

بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز سد زاینده رود با شاخص SWSI

داریوش رحیمی^{۱*}، زهرا محمدی^۲

^۱دانشیار گروه اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی،
^۲دانشجوی دکتری، آب و هواشناسی سینوپتیک، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان
تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۴

چکیده

خشک‌سالی به‌عنوان یک پدیده طبیعی به‌ویژه در مناطقی با اقلیم خشک بارش مانند ایران از چالش‌های بسیار مهم در تأمین آب هست. در این مقاله به کمک شاخص تأمین آب‌های سطحی (SWSI) خشک‌سالی هیدرولوژیکی حوضه بررسی گردیده است. جهت تحلیل خشک‌سالی هیدرولوژیکی از داده‌های بارش، آب معادل برف، متوسط دما، دبی و حجم ذخیره دریاچه سد زاینده‌رود در دوره زمانی ۱۳۸۸-۱۳۶۶ به‌صورت ماهانه و سالانه استفاده شده است. متدولوژی مقاله مبتنی بر شاخص‌های خشک‌سالی R^2 , SDI, SPI, SWSI و تکنیک‌های زمین‌آمار، تحلیل روند و ضریب همبستگی هست. نتایج نشان می‌دهد طبق شاخص SWSI در سال‌های ۸۸-۱۳۶۶، ۷ سال وضعیت خشک‌سالی (۳۱ درصد)، ۱۰ سال در وضعیت نرمال (۴۳ درصد) و ۶ سال در وضعیت مرطوب (۲۶ درصد) قرار دارند؛ همچنین سال ۱۳۷۸ با $SWSI = -2/55$ خشک‌ترین و سال ۱۳۷۱ با $SWSI = 2/88$ مرطوب‌ترین سال هست. علاوه بر آن، تحلیل مقایسه‌ای داده‌های بارش، دبی، ذخیره حجم دریاچه، روند افزایشی دما و مقادیر آب معادل برف نشان می‌دهد که همپوشانی مناسبی بین متغیرهای مدل SWSI و خشک‌سالی‌های اقلیمی وجود دارد ($r=0.78$) در واقع طبق شاخص‌های استخراجی خشک‌سالی نقش مؤثری در کاهش ضریب جریان حوضه و دبی پایه آن دارد؛ به‌عنوان نمونه کاهش بارش سالانه مهم‌ترین ایستگاه حوضه (ایستگاه کوه‌رنگ) از متوسط ۱۴۲۰ میلی‌متر سالانه به ۷۵۰ میلی‌متر در سال ۱۳۸۷ و تداوم خشک‌سالی در ۵ سال بعد از آن (۹۱-۱۳۸۷) با کاهش تجمعی بارش سالانه ۲۳۵۰ میلی‌متر منجر به افت ۳۳ درصدی دبی در ورودی سد (از ۴۶ متر به ۲۴ مترمکعب) گردیده است. آثار زیان‌بار این خشک‌سالی‌ها در اثر فاکتورهای مدیریتی و دخالت‌های انسانی تشدید شده که با توجه به غیرقابل‌پیش‌بینی بودن ولی تکرارپذیری آن به‌ویژه در چارچوب پدیده گرمایش جهانی در حوضه آبی زاینده‌رود پیشنهاد می‌شود در راهبردهای مدیریت منابع آب حوضه زاینده‌رود تجدیدنظر جدی صورت گیرد و بجای انتخاب راهبردهای مبتنی بر فراقکنی و تأمین آب به سمت راهبرد اصلاح الگوی مصرف رفت؛ چراکه ادامه روند راهبرد تأمین آب تنها مصرف بیشتر، ناپایداری شدیدتر اکوسیستم‌های انسانی و طبیعی موجود در حوضه را به دنبال خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: خشک‌سالی، خشک‌سالی هیدرولوژیکی، شاخص ذخیره آب‌های سطحی (SWSI)، تداوم خشک‌سالی هیدرولوژیکی، آبخیز سد زاینده‌رود

پهنه در همان بازه زمانی (مسعودیان، ۱۳۹۰: ۱۳۳).

بخش بالادست حوضه سد زاینده‌رود طی سال‌های اخیر با خشک‌سالی‌های با شدت بالا روبرو بوده است. این خشک‌سالی‌ها آثار خسارت‌بار زیادی از لحاظ هیدرولوژیکی، زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی به دنبال داشته است. کاهش حجم آب سد زاینده‌رود و حجم جریان، اُفت شدید سطح ایستابی، بایر شدن بخش زیادی از اراضی کشاورزی، محدود شدن

مقدمه

طرح مسئله: خشک‌سالی یکی از مخاطرات طبیعی است که نتایج و اثرات آن بر حوزه‌های اجتماعی، اقتصادی، منابع آب و کشاورزی می‌تواند به‌صورت یک فاجعه آشکار شود. خشک‌سالی به معنای اقلیمی آن یعنی کاهش بارش یک بازه زمانی معین بر روی یک پهنه مشخص نسبت به میانگین بلندمدت بارش همان

*نویسنده مسئول: d.rahimi@geo.ui.ac.ir

فعالیت‌های صنعتی و به‌ویژه توریستی از مهم‌ترین پیامدهای این خشک‌سالی‌ها هست.

تحلیل ماهیت ساختار این مشکلات یکی از دغدغه‌های اصلی مردم، دولت‌مردان و بهره‌برداران سنتی این حوضه آبی است که دامنه وسیعی از عوامل هم چون مدیریتی، برداشت نامناسب از منابع آب، گسترش حوضه آبخور زاینده‌رود فراتر از حوضه طبیعی آن، تغییرات اقلیمی و خشک‌سالی‌های متوالی را در آن مؤثر می‌دانند. این پژوهش بر آن است، به نقش خشک‌سالی‌ها در متغیر هیدرولوژیکی و حجم جریان در بالادست سد زاینده‌رود، به‌عنوان برون‌داد اصلی خشک‌سالی‌ها و عامل تنش مشکلات توجه کند. خشک‌سالی انواع مختلفی همچون اقلیمی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و قحطی را شامل می‌شود (حجازی زاده و جوی زاده، ۱۳۸۹: ۸). خشک‌سالی اقلیمی که به کاهش بارش نسبت به میانگین دوره مشخصی در یک منطقه اطلاق می‌گردد عامل شکل‌گیری سایر خشک‌سالی‌ها از جمله خشک‌سالی هیدرولوژیکی هست.

مفاهیم دیدگاه‌ها و مبانی نظری: با توجه به آشکار شدن سریع آثار خشک‌سالی اقلیمی بر منابع آب، خشک‌سالی‌های هیدرولوژیکی همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است؛ از جمله می‌توان به کار بنیادی شفر و دژمان (Shafer & Dezman, 1982) اشاره نمود. این دو به‌منظور تکمیل شاخص پالمر برای شرایط رطوبتی اراضی ایالت کلرادو شاخص SWSI را تهیه کردند. این پارامتر به‌عنوان شاخصی برای شرایط آب‌های سطحی طراحی شده و از آنجاکه مقدار برف کوهستان‌ها در آن، مؤلفه مهمی به حساب می‌آید به‌عنوان "شاخص وابسته به آب کوهستان" توصیف شده است. گارن (Garen) (۱۹۹۳) از شاخص SWSI در غرب ایالات‌متحده استفاده کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که این شاخص جهت پایش خشک‌سالی در غرب ایالات‌متحده به دلیل نقش برف در رواناب مناطق کوهستانی مناسب است. جونگ وون (Kwon, Joong) و همکارانش (۲۰۰۹) و یونگ اه کیم (Kim.Oh, Young) و همکاران (۲۰۱۲)، از شاخص

اصلاح شده SWSI برای بررسی خشک‌سالی کره جنوبی و پیش‌بینی خشک‌سالی استفاده کردند. نتایج ارزیابی نشان داد که بزرگ‌ترین خشک‌سالی ثبت شده منطقه مربوط به سال ۲۰۰۱ هست. عراقی‌نژاد (۲۰۱۱)، در مقاله‌ای روشی را برای پیش‌بینی و کنترل خشک‌سالی هیدرولوژیکی حوضه رودخانه زاینده‌رود ارائه داده است که به گفته‌ی وی می‌تواند نقایص شاخص ذخایر آب سطحی (SWSI) را بهبود ببخشد. بالینگ (Balling) و همکاران (۲۰۰۷)، تأثیر عوامل خشک‌سالی در حوضه کلرادو را بررسی و مشخص نمودند که نوسانات اقیانوس آرام (PDO) که بیشترین واریانس را با (PHDI) دارد، نوسانات جنوبی (ENSO)، نوسانات اقیانوس اطلس (AMO) و درجه حرارت سیاره بر روی حوضه تأثیر دارد. شبان (Shaban) (۲۰۰۸)، خشک‌سالی هیدرولوژیکی را در لبنان مطالعه کرد. مقایسه شاخص خشک‌سالی هیدرولوژیکی نشان داده منابعی که تحت تأثیر فعالیت‌های انسان هستند مانند رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی کاهشی حدود ۲۹-۲۳ درصد را داشته‌اند و منابعی که کمتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسان است مانند پوشش برف و بارش باران و برف کاهشی حدود ۱۶-۱۲ درصد دارند که حاکی از تأثیر فعالیت‌های بشر بر منابع آب است. ادوسا (Edossa) و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از شاخص خشک‌سالی (SPI) ارتباط بین شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در کشور اتیوپی مشخص نمودند که وقوع پدیده خشک‌سالی هیدرولوژیکی در ایستگاه اندازه‌گیری جریان ملکا سدی با میانگین تأخیری هفت‌ماهه از رویداد خشک‌سالی هواشناسی در آواش (Awash) روی می‌دهد که یک تنوع ۳ تا ۱۳ ماهه دارد. سهرابی و همکاران (۲۰۱۲) به کمک شاخص‌های مختلف خشک‌سالی منطقه آیداهو در ایالت متحده آمریکا را بررسی کردند. نتایج یک کاهش روند و افزایش روند را به ترتیب برای بارش و دما نشان می‌دهد. رحیمی و همکاران (۲۰۱۱)، با بررسی شدت خشک‌سالی‌های استان چهارمحال و بختیاری تأثیرات آن را روی دبی رودخانه کارون بررسی و نتیجه گرفتند

خشکسالی آب‌های جاری تقریباً در تمام ایستگاه‌ها در سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۰۱ رخ داد. کریمی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی با روش حد آستانه ثابت بر روی حوضه آبخیز کرخه پرداختند. نتایج نشان داد بیشترین حجم کمبود و بیشترین تداوم خشکسالی در حد آستانه ۷۰ و ۸۰ درصد در بیشتر ایستگاه‌ها بعد از آن سال ۱۳۷۷ رخ داده است، در نهایت توزیع‌های احتمالاتی مناسب برای سری‌های حداکثر حجم کمبود، توزیع جانسون، بیشترین فراوانی و برای سری‌های حداکثر تداوم، توزیع نمایی دوگانه و جانسون هر یک دارای بیشترین فراوانی در بین سایر توزیع‌ها می‌باشند.

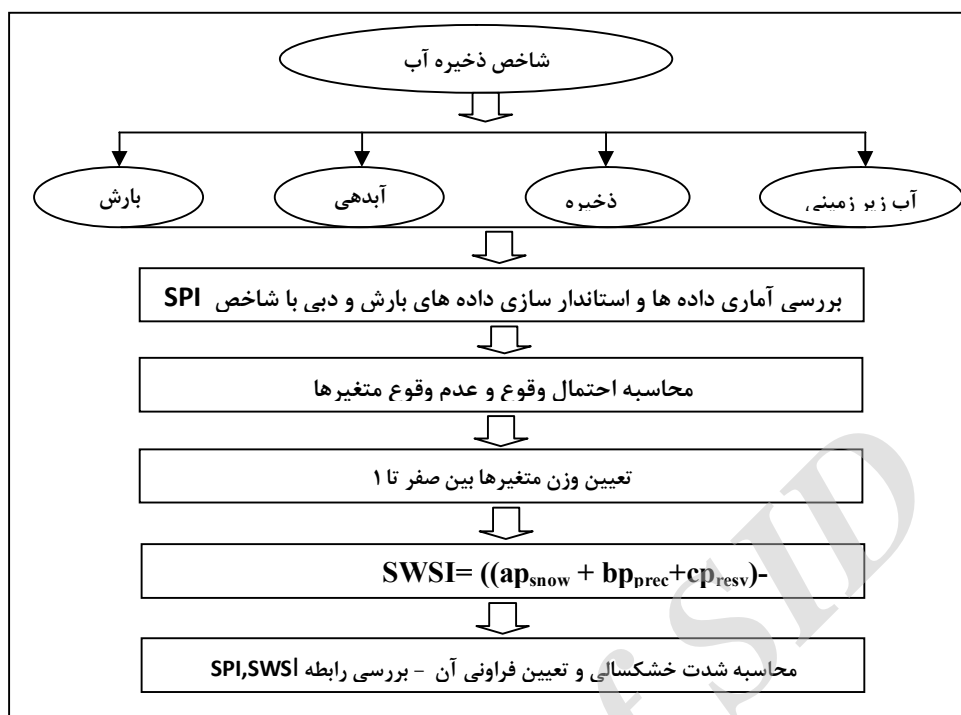
رودخانه زاینده‌رود به‌عنوان تنها رودخانه دائمی ایران مرکزی در سال‌های اخیر با مشکلات متعددی از جمله خشک شدن کامل رودخانه روبرو بوده است، به‌نحوی که این رودخانه تبدیل به یک رود غیر دائمی شده و به‌تبع آن آثار شدید و بحران‌های بزرگی در محدوده حوضه مذکور ایجاد نموده است. در این مقاله تلاش بر آن است تا ضمن شناخت شدت خشکسالی هیدرولوژیک در بالادست رودخانه زاینده‌رود، علت کاهش منابع آب نیز بررسی گردد.

روش‌ها و چهارچوب نظری تحقیق روش تحقیق در این پژوهش از نوع اسنادی و تحلیل روابط آماری بر روی داده‌های بارش، ذخیره برف، دبی و مخازن سدها هست و برای این منظور از نرم‌افزارهای S-PLUS، MiniTab و Excel استفاده شده است. نمودار ۱ مدل مفهومی انجام کار را نشان می‌دهد.

شاخص تأمین آب سطحی (SWSI): متداول‌ترین شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی در مناطقی که برف منشأ عمده‌ی جریان‌ات سطحی است شاخص (SWSI) هست. استفاده از این شاخص نخستین بار توسط Shafer و Dezman (۱۹۸۲) جهت تکمیل پایش خشکسالی در ایالت کلرادو در آمریکا که ذخیره برف منبع عمده تأمین آب در منطقه است پیشنهاد گردید.

که بین مقادیر استاندارد شده بارش و دبی مقدار ضریب تعیین برابر با ۵۶ درصد است بدین معنی که در دوره خشکسالی‌های اقلیمی مقادیر دبی تا ۵۶ درصد کاهش پیدا می‌کند.

شاهرخ وندی و همکاران (۱۳۸۸)، در مقاله‌ای به بررسی خشکسالی هیدرولوژیک و ارتباط آن با بارش در حوضه رودخانه خرم‌آباد پرداختند. با بررسی نتایج مشخص شد که خشکسالی‌های اقلیمی حداکثر با تداوم‌های یک تا سه‌ماهه و خشکسالی‌های هیدرولوژیک حتی در تداوم‌های پنج تا دوازده ماهه نیز مشاهده می‌شوند. تاتینا و همکاران (۱۳۸۹)، به پایش و پهنه‌بندی خشکسالی در گیلان پرداختند. نتایج نشان داد که خشکسالی به‌طور متناوب و با سیکل‌های نسبتاً منظم در منطقه اتفاق می‌افتد. فراوانی وقوع خشکسالی در ایستگاه‌های مرطوب و خشک باهم متفاوت بوده و فراوانی وقوع خشکسالی در شدت‌های متوسط و شدید نسبت به ایستگاه‌های مرطوب بیشتر رخ می‌دهد. گل محمدی و مساح بوانی (۱۳۹۰)، تغییرات شدت و دوره بازگشت خشکسالی حوضه قره‌سو (با استفاده از شاخص (SPI) را بررسی نمودند. مقایسه نتایج حاکی از این است که حوضه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ میلادی شاهد افزایش بارش و به‌تبع آن کاهش شدت خشکسالی نسبت به دوره پایه خواهد بود. نصرتی و همکاران (۱۳۹۰)، به پایش روزانه خشکسالی و منابع آب در اقلیم‌های مختلف ایران پرداختند. نتایج نشان داد شاخص خشکسالی مؤثر، مستقل از ویژگی‌های اقلیمی منطقه، شاخص مناسبی در شناخت وضعیت خشکسالی در مقیاس روزانه است. همچنین شاخص منابع آب قابل‌دسترس، اثرات خشکسالی را به‌عنوان تابعی از افت روزانه حاصل از تأثیر بارندگی در منابع آب منطقه به‌وضوح نشان می‌دهد. نیکبخت و همکاران (۱۳۹۰)، به تجزیه و تحلیل شدت خشکسالی آب‌های جاری به‌وسیله شاخص درصد نرمال (PNI) در شمال غرب ایران پرداختند نتایج نشان می‌دهد که بدترین



نمودار ۱: مدل مفهومی روش تحقیق

شناخت از رفتارهای هیدرولوژیکی حوضه، مشخصات فیزیوگرافی و نظرات کارشناسی مبتنی بر مطالعات پایه هیدرولوژی و اقلیم‌شناسی و مدیریت منابع آب حوضه و $a + b + c + d = 1$ نیز احتمال تجاوز برای متغیر i ام (برف (snow)، باران (prec)، رواناب (strm) و مخزن (s)) است. معادله بالا، تفاضل عدد ۵۰ در صورت کسر برای آن است که مقادیر شاخص حول صفر متقارن باشد. همچنین با تقسیم بر عدد ۱۲، مقادیر شاخص بین ۴٫۲- و ۴٫۲+ قرار می‌گیرد (شفر و دژمان، ۱۹۸۲).

داده‌ها پژوهش: با توجه به این که از شاخص SWSI استفاده می‌گردد لذا داده‌های مورد استفاده شامل بارش، دبی، آب معادل برف و مخازن آبی ثبت‌شده در سطح حوضه است. جدول (۲) مشخصات داده‌ها و ایستگاه‌های استفاده شده را نشان می‌دهد. پس از گردآوری این داده‌ها پایگاه داده‌های آن در نرم‌افزار Excel تهیه گردید و سپس میانگین بلند مدت روزانه، ماهانه و سالانه و درصد احتمال وقوع آن محاسبه شد و نمودارهای آن تهیه گردید.

هدف از تدوین شاخص SWSI، به‌دست آوردن معیاری برای تعیین مقدار آب موجود در مناطق کوهستانی و امکان مقایسه مناطق مختلف باهم است. علاوه بر تعیین شدت خشک‌سالی‌های به وقوع پیوسته در منطقه، با کمک این شاخص می‌توان وضعیت آینده را پیش‌بینی نمود. برای انجام پیش‌بینی به کمک SWSI، کافی است به‌جای هرکدام از متغیرهای به‌کاررفته در رابطه، مقادیر پیش‌بینی آن پارامتر را در نظر گرفت (۳). در شاخص تأمین آب سطحی (SWSI)، چهار پارامتر موردنظر است. این داده‌ها عبارت‌اند از: ذخیره برفی، جریان رودخانه‌ای، بارش و حجم مخازن سطحی آب. مقدار شاخص SWSI با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

$$SWSI = \frac{a \cdot P_{snow} + b \cdot P_{prec} + c \cdot P_{strm} + d \cdot P_{resv} - 50}{12}$$

رابطه ۱:

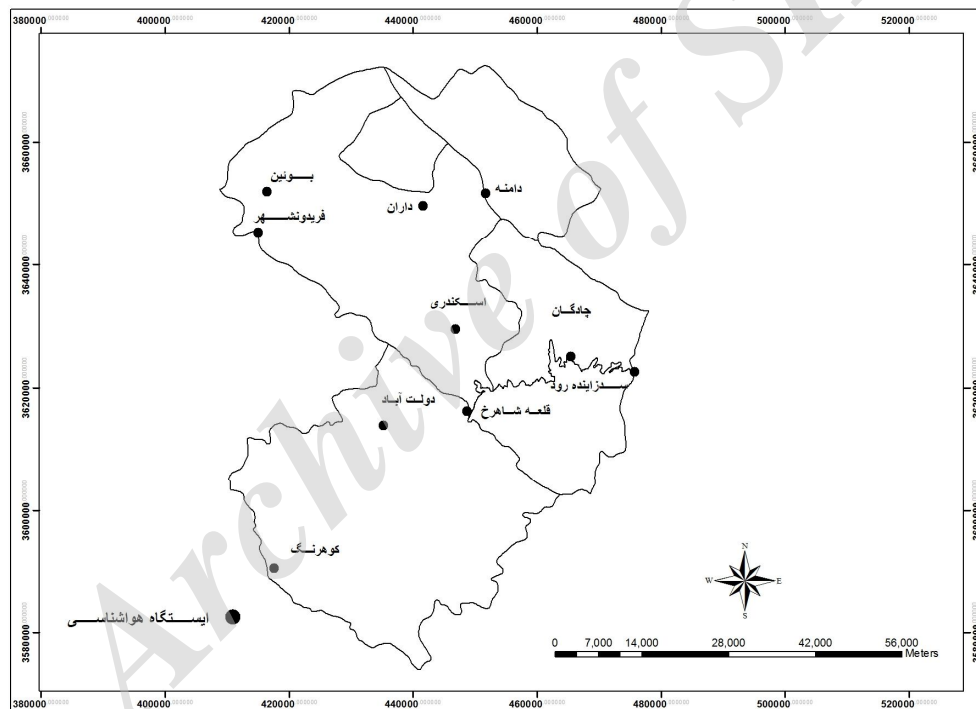
در رابطه فوق، a ، b ، c و d وزن هر یک از اجزاء در نظر گرفته‌شده در محاسبه SWSI است که بر اساس

جدول ۱: مقادیر شاخص SWSI (Shafer & Dezman 1982)

مقادیر شاخص SWSI	وضعیت هیدرولوژیکی	مقادیر شاخص SWSI	وضعیت هیدرولوژیکی
+۴	خیلی تر	-۲	خشکی کم
+۲	تری کم	-۳	خشکی زیاد
-۱	نزدیک نرمال	-۴	خشکی شدید

داده‌های ذخیره مخزن سد: سد به دو نوع سدهای بزرگ و سدهای کوچک (خاکی) تقسیم می‌شوند که در حوضه مورد مطالعه هر دو نوع آن‌ها وجود دارد. سد زاینده‌رود تنها سد بزرگ حوضه است که در این پژوهش از حجم و دبی ورودی این سد استفاده شده است. جدول (۳)، مشخصات سد زاینده‌رود را ارائه داده است.

در حوضه مورد مطالعه نزدیک به ۱۵ سد یا بند خاکی با حجم متفاوت وجود دارند. بیشتر این سدها به‌منظور تأمین آب کشاورزی ساخته شده‌اند مجموع حجم این سدها ۲,۹۶۰,۰۰۰ مترمکعب است که یک ذخیره خوب آبی برای حوضه محسوب می‌گردد (اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری ۱۳۹۳) (جدول ۳).



شکل ۱: نقشه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی حوضه

جدول ۲: مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی حوضه (سازمان هواشناسی)

نام ایستگاه	طول جغرافیا	عرض جغرافیا	ارتفاع (متر)	دوره آماری	نوع ایستگاه	عنصر
کوه‌رنگ	۵۰ ۰۷	۳۲ ۲۶	۲۲۸۵	۱۳۶۶-۱۳۸۸	سینوپتیک	باران-برف
داران	۵۰ ۲۲	۳۲ ۵۸	۲۲۹۰	۱۳۶۸-۱۳۸۸	سینوپتیک	باران
فریدون‌شهر	۵۰ ۰۶	۳۲ ۵۶	۲۴۹۰	۱۳۸۱-۱۳۸۸	کلیماتولوژی	باران
دامنه	۵۰ ۲۹	۳۳ ۰۱	۲۳۰۰	۱۳۴۵-۱۳۸۸	کلیماتولوژی	باران
چادگان	۵۰ ۳۸	۳۲ ۴۶	۲۱۰۰	۱۳۸۲-۱۳۸۸	کلیماتولوژی	باران
قلعه شاهرخ	۵۰ ۲۷	۳۲ ۴۱	۲۱۴۰	۱۳۴۹-۱۳۸۸	تبخیر سنجی	باران-دبی
اسکندری	۵۰ ۲۶	۳۲ ۴۹	۲۱۲۰	۱۳۵۵-۱۳۸۸	تبخیر سنجی	باران-دبی
سد زاینده‌رود	۵۰ ۴۴	۳۲ ۴۴	۱۹۵۰	۱۳۴۵-۱۳۸۸	تبخیر سنجی	باران
دولت‌آباد	۵۰ ۱۷	۳۲ ۳۹	۲۵۵۰	۱۳۷۱-۱۳۸۸	تبخیر سنجی	باران
بوئین	۵۰ ۰۶	۳۳ ۰۰	۲۴۰۰	۱۳۷۰-۱۳۸۸	تبخیر سنجی	باران

اداره کل هواشناسی و آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری و اصفهان

جدول ۳: مشخصات سد زاینده‌رود

نام سد	طول	عرض	ارتفاع (m)	ماکزیمم حجم (m ³)	متوسط حجم (m ³)	مینیمم حجم (m ³)	طول دوره آماری
زاینده‌رود	۵۰ ۴۴	۳۲ ۴۴	۲۱۶۰	۱۲۷۷/۱۷	۸۸۹/۲۳	۱۹۰/۹۴	۱۳۵۰-۱۳۹۰

شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان

ادامه جدول ۳- مشخصات سدهای خاکی موجود در حوضه آبخیز سد زاینده‌رود (هزار مترمکعب)

سد	حجم	سیدی آباد	خلیل‌آباد	باشلق	سودجان	مزمگ	گرداب‌بن	۱ کی	۲ کی	چمدر	قوه کهنیز	کافور دره	اشکان	باشلق پایین
	۲۵۷	۵۰	۳۵	۱۴۰	۲۶۵	۷۵	۲۰	۲۸	۲۰	۱۰۰	۱۲۰	۷۰	۱۲۰۰	۲۲۰

اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان چهارمحال و بختیاری

در شاخص SWSI وزن اجزاء از حوضه‌ای به حوضه دیگر متفاوت است به همین دلیل نمی‌توان دو حوضه را به‌وسیله این شاخص با یکدیگر مقایسه نمود. در فرمول اصلی که توسط شفر و دژمان (۱۹۸۲) ارائه گردیده است در هر فصل از سه عنصر استفاده گردیده است و در واقع عنصر رواناب در فصل گرم به جای عنصر برف استفاده گردیده ولی در این پژوهش در هر دو فصل از چهار عنصر هم‌زمان استفاده گردید. دلیل این کار نقش برف در تأمین رواناب در فصل گرم است؛ زیرا در فصل گرم برفی که در ارتفاعات ذخیره گردیده است با ذوب شدن بخشی از رواناب را تأمین می‌کند. اما به دلیل نقش کمتری که نسبت به زمستان دارد در فصل گرم وزن کمتری به آن اختصاص داده شده و

وزن اجزاء پژوهش: برای محاسبه شاخص SWSI در ابتدا به هر یک از اجزاء وزن می‌دهیم. وزن هر یک از عناصر با توجه به نقش آن‌ها در تأمین رواناب حوضه محاسبه می‌گردد و در واقع کاری تجربی است و به تجربه‌ی خود محقق بستگی دارد. برای اختصاص وزن به هر یک از اجزاء در ابتدا سال به دو فصل سرد و گرم تقسیم گردید این موضوع به این دلیل است که وزن اجزاء به‌کاررفته در شاخص در فصل سرد و گرم متفاوت است. هرکدام از اجزاء در فصول مختلف دارای اهمیت متفاوت می‌باشند. در حوضه مورد مطالعه فصل سرد ماه‌های آبان، آذر، دی، بهمن، اسفند و فروردین و فصل گرم نیز شامل ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد، شهریور و مهر می‌شود.

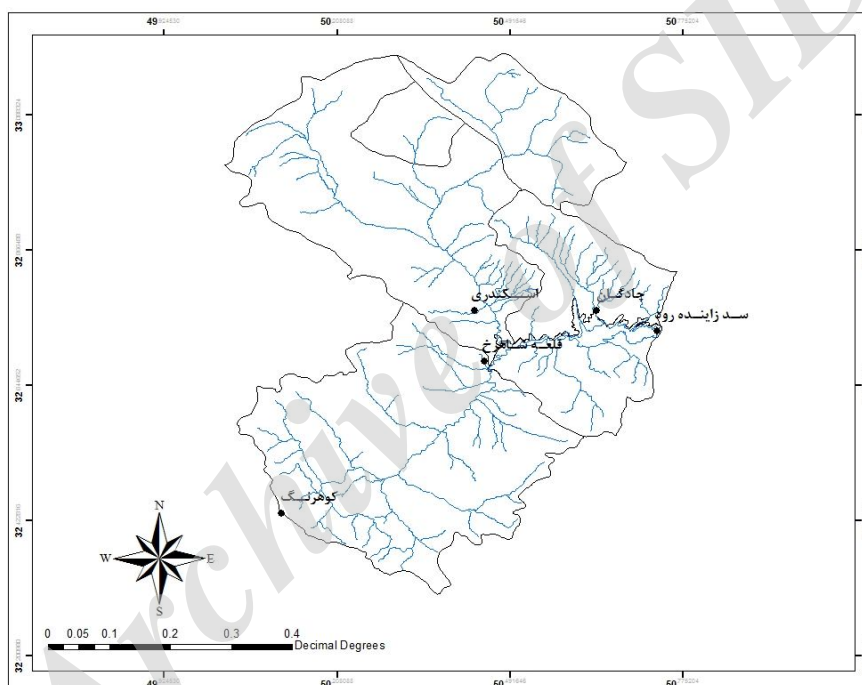
مجموع وزن‌های هر فصل برابر یک است. جدول (۴)، مقادیر وزنی اختصاص داده‌شده به هر یک از اجزاء را در فصل گرم و سرد نشان می‌دهد.

جدول ۴: وزن عناصر هیدرولوژیک در SWSI ماهانه و فصلی حوضه آبخیز زاینده‌رود

فصل	برف	بارش	دبی	ذخیره سد
گرم	۰/۱	۰/۲۵	۰/۴	۰/۲۵
سرد	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۲	۰/۱

محاسبات نگارندگان

محدوده جغرافیایی پژوهش: منطقه مورد بررسی حوضه‌ی آبخیز سد زاینده‌رود است که با مساحت ۴۲۶۲ کیلومتر مربع و محیط ۳۶۲ کیلومتر در منطقه‌ای با مختصات $۴۹^{\circ} ۵۴'$ تا $۵۰^{\circ} ۴۵'$ طول شرقی و $۳۲^{\circ} ۱۸'$ تا $۳۳^{\circ} ۱۲'$ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز سد زاینده‌رود

مخازن، تحت تأثیر شرایط بالادست و تغییرات حوضه در آن محل است. آب‌های زیرزمینی نیز تابع تغذیه از آب‌های سطحی و جریانات ورودی زیرزمینی قرار دارد (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۱۳۸۹: ۳۷۹). خشک‌سالی‌های رخ داده در حوضه آبی زاینده‌رود یکی از چالش برانگیزترین خشک‌سالی‌ها در کشور است که دلایلی متعددی را برای آن بر می‌شمارند. در ادامه تغییرات عناصر هیدرو اقلیمی مؤثر بر خشک‌سالی

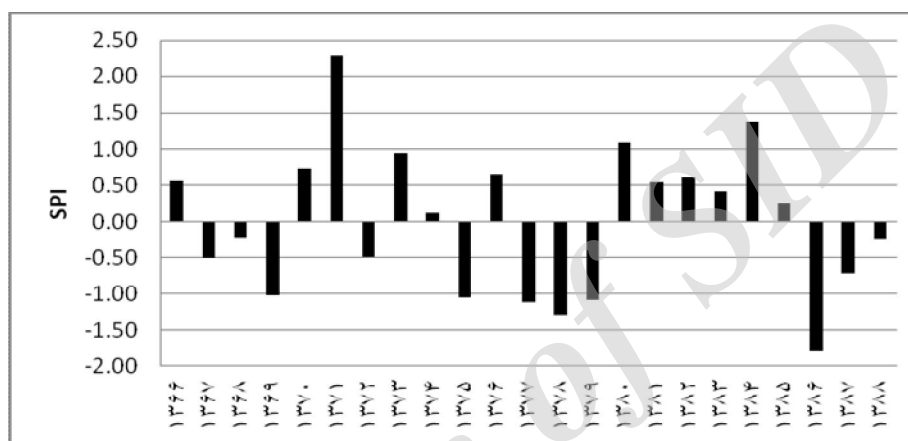
بحث

برای مصرف‌کنندگان آب، خشک‌سالی هنگامی اتفاق می‌افتد که تأمین آب کم شود. خشک‌سالی هیدرولوژیکی، حاصل کمبود بارش مؤثر در دوره‌های قبلی است. پایش خشک‌سالی هیدرولوژیک با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری (اطلاعات جریان رودخانه)، تراز آب دریاچه هاو مخازن سدها و همچنین سطح آب‌های زیرزمینی انجام می‌گیرد. اطلاعات جریان و تراز آب

به اهمیت خشک‌سالی اقلیمی، نخست با استفاده از شاخص SPI خشک‌سالی اقلیمی حوضه بررسی گردید، شکل (۲). طبق این نمودار خشک‌ترین سال حوضه سال ۱۳۸۶ است و مرطوب‌ترین سال ۱۳۷۱ است که میزان SPI آن‌ها به ترتیب برابر با ۱/۷۹- و ۲/۲۹ است. با توجه به اهمیت بارش در تأمین رواناب حوضه وزن این عنصر در فصل سرد وزن ۰/۳۵ و در فصل گرم ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

هیدرولوژیکی در چارچوب مدل SWSI بررسی شده است.

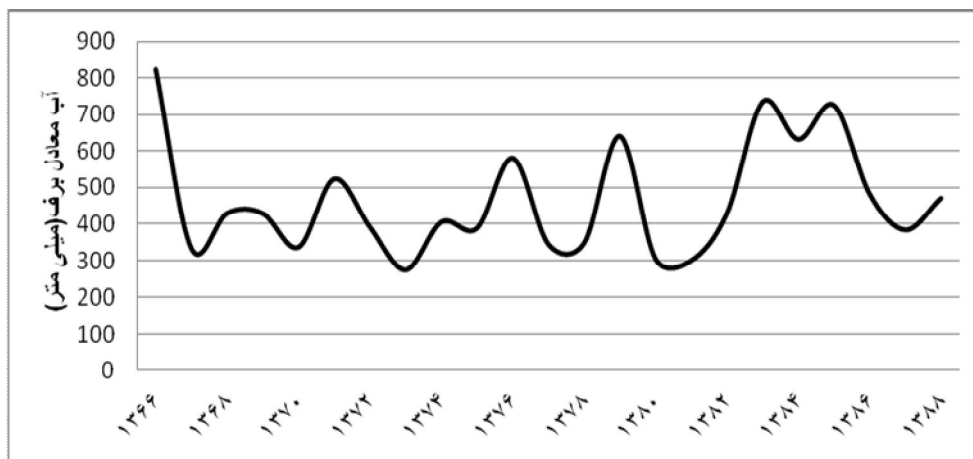
بارش حوضه: میانگین سالانه بارش حوضه ۵۰۰ میلی‌متر است. ایستگاه کوه‌رنگ با ۱۴۰۰ میلی‌متر بیشترین و ایستگاه سد زاینده‌رود با ۲۳۷ میلی‌متر کمترین بارش حوضه را دارند؛ بنابراین دامنه تغییرات مکانی بین سرچشمه و خروجی سد زاینده‌رود برابر با ۱۱۶۳ میلی‌متر است. در این حوضه، حدود ۵۰ درصد از کل بارش سالانه در فصل زمستان می‌بارد. با توجه



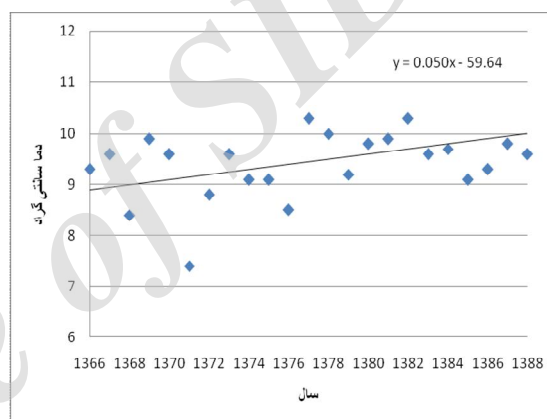
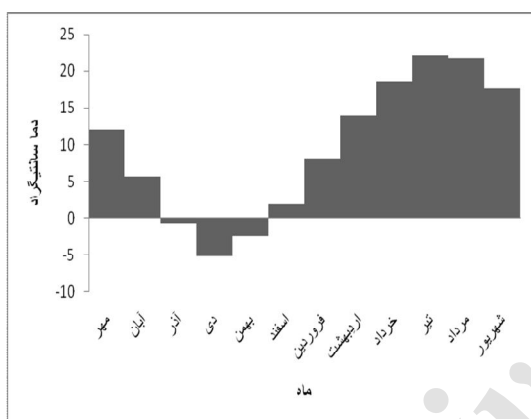
شکل ۲: مقدار SPI سالانه حوضه آبخیز سد زاینده‌رود

درصد با آزمون نا پارامتری من-کندال بررسی گردید با توجه به مقدار ضریب برآوردی آن $Z=0.61$ داده‌ها به صورت تصادفی بوده و فاقد روند هستند. بررسی تغییرات ماهانه آب معادل برف حوضه نشان می‌دهد که در ماه‌های خرداد، تیر، مرداد، شهریور، مهر و آبان به حداقل، ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت به حداکثر و ماه‌های آذر، دی و بهمن انباشت برف در حوضه می‌باشند. این نوسانات با آهنگ ماهانه دمای منطقه در حد زیادی همساز است بر اساس نتایج آزمون روند، دما در سطح اطمینان ۹۵ درصد با ضریب $Z=۲/۳۸$ دارای روند معنی‌دار است شکل ۴. جهت تعیین نقش برف در مدل SWSI در فصل ذوب (اسفند، فروردین، اردیبهشت) وزن ۰/۴ و در فصل گرم و انباشت برف (خرداد، تیر، مرداد، شهریور، مهر، آبان، آذر، دی و بهمن) به دلیل کم شدن اثر این عنصر در رواناب مقدار وزن این عنصر در فرمول ۰/۱ در نظر گرفته شد.

ذخیره برف حوضه: در حوضه‌های آبخیز کوهستانی (ارتفاع بالاتر از ۱۵۰۰ متر) برف نقش مهم و مؤثری در تداوم آبدهی رودخانه‌ها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد؛ بنابراین تغییرات در ذخیره برف و آب معادل آن تأثیرات شدیدی بر شدت خشک‌سالی‌ها دارد. حوضه آبی زاینده‌رود نیز از جمله این حوضه‌ها است. به منظور تعیین نقش ذخیره برف در خشک‌سالی‌های هیدرولوژی حوضه از داده‌های آب معادل برف ایستگاه کوه‌رنگ در دوره آماری ۸۸-۱۳۶۶ استفاده شده است. بررسی تغییرات آب معادل برف در ایستگاه مبنای حوضه نشان می‌دهد که حداکثر آب معادل برف در سال ۱۳۶۶ برابر با ۸۲۰ میلی‌متر و سال آبی ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ با ۷۵۰ میلی‌متر بیشترین مقدار و سال‌های آبی ۱۳۷۳، ۱۳۷۸ و ۱۳۸۱ با حدود ۳۰۰ میلی‌متر کمترین آب معادل برف را دارند (شکل ۳). روند تغییرات آب، معادل برف در ایستگاه با آزمون نا پارامتری من-کندال در سطح اطمینان ۹۵



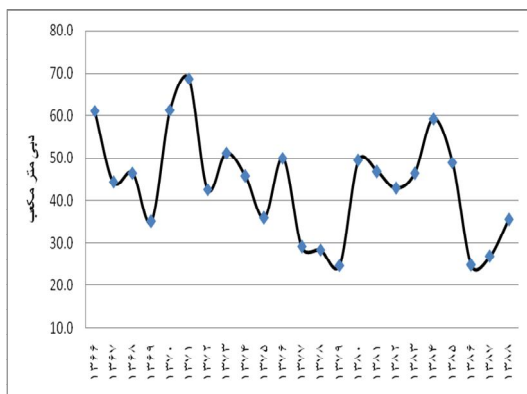
شکل ۳: مقادیر سالانه آب معادل برف در ایستگاه کوه رنگ



شکل ۴: مقادیر دمای ماهانه و سالانه (برحسب سانتی گراد) در ایستگاه کوه رنگ

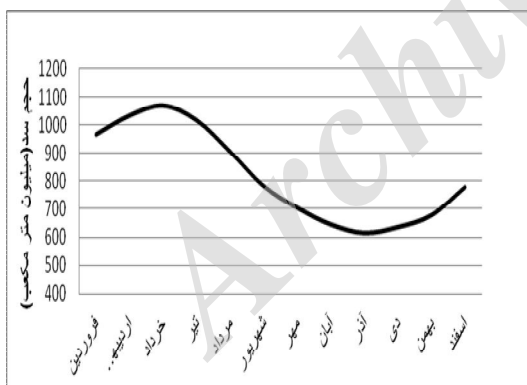
استانداردسازی داده‌های آبدهی جهت تعیین شدت خشک‌سالی‌های اقلیمی از دیگر اقدامات انجام گرفته است. بدین منظور از شاخص SDI استفاده شده است (شکل ۶). بر اساس نتایج مستخرج شده طی دوره زمانی ۱۱ سال آن دارای ضریب SDI (منفی) خشک‌سالی، ۱۱ سال آن در حالت نرمال و تنها یک سال آن دارای شرایط مرطوب است. با توجه به اهمیت دبی در فصل تابستان به عنصر دبی در مدل SWSI در فصل گرم وزن ۰/۴ و در فصل سرد وزن ۰/۱۵ معین شده سپس مقادیر درصد احتمال وقوع برای هر سال محاسبه و در مدل استفاده گردید.

دبی حوضه: برای آیند متغیرهای اقلیم‌شناسی، هیدرولوژی، کاربری اراضی و پوشش گیاهی می‌باشند. به عبارت دیگر دبی تغییر عناصر مؤثر بر خشک‌سالی هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد. به منظور بررسی نوسانات دبی در حوضه‌ی آبی زاینده‌رود دبی ورودی سد در ایستگاه قلعه شاهرخ مورد بررسی قرار گرفت. متوسط ورودی سد زاینده‌رود ۴۳/۷ مترمکعب در ثانیه طی دوره آماری ۱۳۶۶-۱۳۸۸ است. نوسانات آبدهی قلعه شاهرخ نشان می‌دهد که حداکثر آن در سال ۱۳۷۱ برابر با ۷۰ مترمکعب بر ثانیه و حداقل آن برابر با ۲۴ مترمکعب در سال‌های ۱۳۷۸، ۱۳۷۹ و ۱۳۸۶ به ثبت رسیده است (شکل ۵).



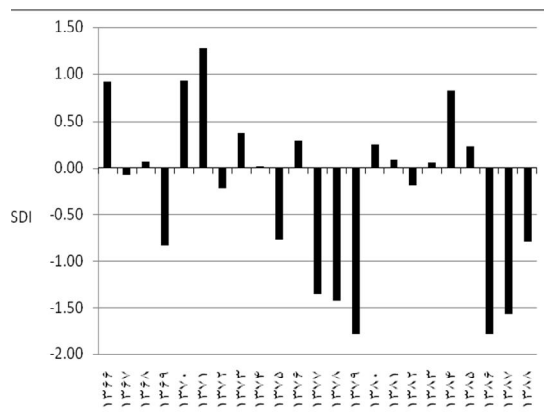
شکل ۶: مقدار SDI سالانه ورودی سد زاینده‌رود

(شکل ۷). نوسانات سالانه حجم دریاچه نیز نشان می‌دهد که حجم آب آن بین ۱۲۰۰ تا ۲۵۰ میلیون مترمکعب متغیر است. حداقل حجم دریاچه سد زاینده‌رود در سال آبی ۱۳۷۸ و ۱۳۷۹ و سال‌های آبی ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ و حداکثر آن در سال آبی ۱۳۶۶، ۱۳۷۱ به ثبت رسیده است. با توجه به اطلاعات ذکر شده و اهمیت حجم دریاچه سد در آبدهی رودخانه به دلیل اهمیت این ذخایر در فصل تابستان وزن ۰/۲ و در فصل زمستان ۰/۱ به ذخایر سطحی داده شده است.



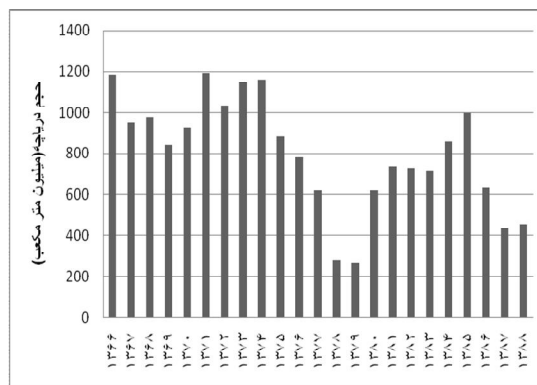
شکل ۷: مقادیر ماهانه حجم دریاچه سد زاینده‌رود

طی دوره آماری (۱۳۶۶-۱۳۸۸) بوده است. جدول (۹)، نشان‌دهنده درصد فراوانی شدت خشک‌سالی هیدرولوژیک است. طبق جدول بیشترین فراوانی متعلق به وضعیت نرمال با ۴۳ درصد، پس از آن خشک‌سالی ضعیف با ۲۲ و متوسط با ۹ درصد کمترین مقدار است.



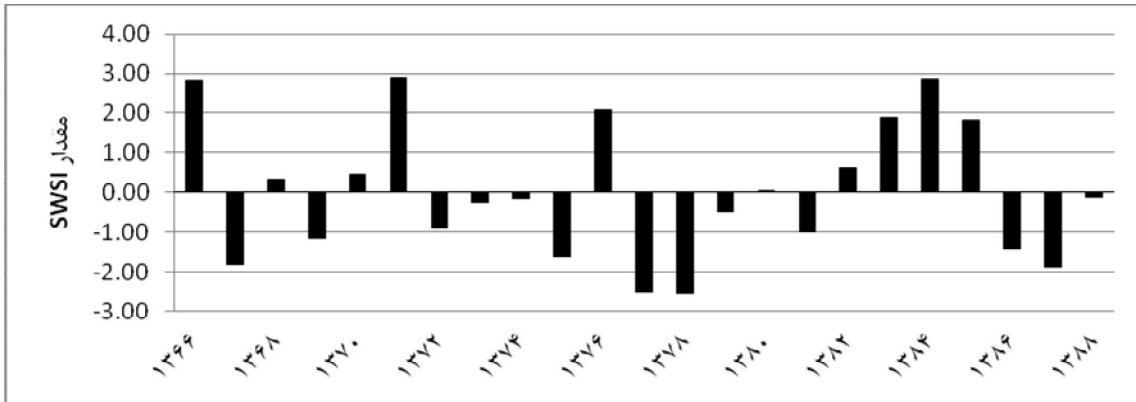
شکل ۵: مقادیر سالانه دبی ایستگاه ورودی سد

ذخایر سطحی حوضه: با توجه به تجدید پذیری حجم ذخیره آب دریاچه سد، این متغیر به صورت ماهانه بررسی شد. ذخایر آب سطحی این حوضه در دو نوع مخزن سدهای خاکی با ظرفیت ۳ میلیون مترمکعب و سد بتونی زاینده‌رود با حجم ۱۱۰۰ میلیون مترمکعب انجام می‌گیرد. سدهای خاکی سهم چندانی در این ذخیره‌سازی در مقایسه با سد زاینده‌رود ندارند؛ اما سد زاینده‌رود نوسانات ذخیره‌های بین ۱۱۰۰ میلیون مترمکعب در خردادماه تا ۶۰۰ میلیون مترمکعب در ماه‌های آبان، آذر و دی دارد



شکل ۸: مقادیر سالانه حجم دریاچه سد زاینده‌رود

SWSI سالانه حوضه: نتایج حاصل از شاخص SWSI در شکل ۹ و جدول ۹ نشان داده شده است. طبق نتایج حاصله شاخص مذکور در حوضه آبخیز سد زاینده‌رود بین ۳+ تا ۲/۵- است. بر اساس شکل (۹) مقدار و شدت SWSI سالانه حوضه سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۷۸ خشک‌ترین با شاخص ۲/۵- و سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۷۱ با تقریب ۳ مرطوب‌ترین سال‌های حوضه در



شکل ۹: مقادیر سالانه SWSI حوضه آبخیز سد زاینده رود

جدول ۹: فراوانی شدت‌های خشکسالی شاخص SWSI حوضه سد زاینده رود

درصد احتمال وقوع	احتمال وقوع	فراوانی	شدت خشکسالی
۹	۰/۹	۲	خشکسالی متوسط
۲۲	۰/۲۲	۵	خشکسالی ضعیف
۴۳	۰/۴۳	۱۰	نرمال
۹	۰/۹	۲	مرطوب ضعیف
۱۷	۰/۱۷	۴	مرطوب متوسط

محاسبات: نگارنده

مقایسه دو شاخص SPI و SWSI بیانگر تأثیر خشکسالی‌های اقلیمی بر خشکسالی‌های هیدرولوژیکی است شکل (۱۰). جهت ارائه تحلیل واضح‌تری از اثرات خشکسالی‌های اقلیمی بر خشکسالی‌های هیدرولوژیکی مقدار همبسته بودن این دو شاخص با همدیگر مورد سنجش قرار گرفت (جدول ۱۰). مقدار همبستگی بین این دو شاخص در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ برابر با ۰/۷۸ و ضریب تعیین آن ۶۰ درصد و این ضرایب گویای تأثیرگذاری شدید خشکسالی اقلیمی بر الگوی هیدرولوژیکی حوضه است. علاوه بر آن زمان تأخیر بین خشکسالی اقلیمی و هیدرولوژیکی در حد یک الی ۲ سال است. البته اختلافی از نظر اندازه بین بلندی شکل ستونی در نمودار به چشم می‌خورد که این اختلاف ناشی از دامنه شاخص SWSI بین ۴ و -۴ و دامنه SPI بین ۲ و -۲ است. طبق نمودار ۹ در آغاز یک دوره خشک، در حوضه شدت SPI بیشتر از شاخص SWSI است ولی در انتهای دوره شدت خشکسالی هیدرولوژیکی بیشتر از اقلیمی است.

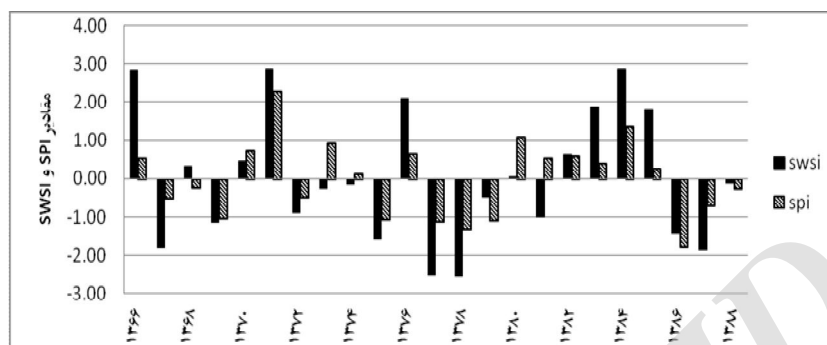
در مجموع ۳۱ درصد سال‌های مورد بررسی دارای خشکسالی می‌باشند و این بدان معنا است که این حوضه به‌طور متوسط هر ۳ سال، یک‌بار دارای خشکسالی است و این مطلب گویای ضعف توان اکولوژی حوضه و حاکمیت اقلیمی ناپایدار بوده و این در شرایطی است که تنها ۲۶ درصد سال‌های آبی شرایط مرطوب متوسط و ضعیف در حوضه وجود داشته است. به‌عبارت‌دیگر دوره‌های ترسالی به شکلی نیستند که بتوانند کسری آب حاصله را جبران نمایند و این شرایط باعث فشار بیشتر بر منابع آب تجدید ناپذیر زیرزمینی می‌شود. در واقع طبق نتایج استخراجی از شاخص‌های متعدد SWSI, SDI, SPI باید اذعان نمود که دوره‌های خشکسالی در این حوضه بایکالی دو سال مرطوب از همدیگر جدا شده و بیانگر ناپایداری هر چه بیشتر منابع آب در حوضه است.

تحلیل خشکسالی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی حوضه:

جدول ۱۰: همبستگی بین SWSI و SPI در حوضه سد زاینده رود

SWSI	SPI	
۰/۷۸۱	۱	SPI
۱	۰/۷۸۱	SWSI

محاسبات نگارندگان



شکل ۱۰: مقایسه مقادیر SWSI و SPI سالانه حوضه سد زاینده رود

نتیجه گیری

حوضه آبخیز سد زاینده رود با دامنه تغییرات بارشی معادل ۱۱۶۳ میلی متر (اختلاف کوهرنگ و سد زاینده رود) با شدت بالاتری نسبت به مناطق هم تراز اقلیمی خود تحت تأثیر خشکسالی است. طبق مدل SWSI در حوضه طی سال‌های ۸۸-۱۳۶۶، ۷ سال آن در وضعیت خشکسالی (۳۱ درصد)، ۱۰ سال در وضعیت نرمال (۴۳ درصد) و ۶ سال در وضعیت مرطوب (۲۶ درصد) قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که سال ۱۳۷۸ با ضریب $SWSI = -2/55$ خشکترین و سال ۱۳۷۱ با $SWSI = 2/88$ مرطوبترین سال است. تحلیل مقایسه‌ای داده‌های بارش، دبی، ذخیره‌ی حجم دریاچه، روند افزایشی دما و مقادیر آب معادل برف نشان می‌دهد که همپوشانی مناسبی به متغیرهای مدل SWSI و خشکسالی‌های اقلیمی وجود دارد. از نتایج دیگر تأثیر خشکسالی‌های اقلیمی بر روی رفتار هیدرولوژیکی حوضه در سطح اطمینان ۰/۰۵ با ضریب همبستگی ۰/۷۸ است؛ علاوه بر آن طبقه‌سازی استخراجی $SWSI, SPI, SDI, R, R^2$ خشکسالی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی نقش مؤثری در کاهش ضریب جریان حوضه و دبی پایه آن دارد. در پایان نتیجه بررسی فاکتورهای مختلف نشان می‌دهد در سال‌های اخیر کاهش بارش سالانه مهم‌ترین ایستگاه حوضه

(ایستگاه کوهرنگ) از متوسط ۱۴۲۰ میلی متر سالانه به ۷۵۰ میلی متر در سال ۱۳۸۷ و تداوم خشکسالی در ۵ سال بعد از آن (۹۱-۱۳۸۷) با کاهش تجمعی بارش سالانه ۲۳۵۰ میلی متر منجر به افت ۳۳ درصد دبی پایه گردیده است (از ۴۶ متر به ۲۴ مترمکعب). آثار زیان‌بار این خشکسالی‌ها در اثر فاکتورهای مدیریتی و دخالت‌های انسانی به شکل فزاینده‌ای تشدید شده که با توجه به غیرقابل پیش‌بینی بودن ولی تکرارپذیری خشکسالی‌ها به‌ویژه در چارچوب پدیده گرمایش جهانی در حوضه آبی زاینده رود پیشنهاد می‌شود، در راهبردهای مدیریت منابع آب حوضه زاینده رود تجدیدنظر جدی صورت گیرد و به‌جای انتخاب راهبردهای مبتنی بر تأمین آب به سمت راهبرد اصلاح الگوی مصرف رفت؛ چراکه ادامه روند راهبرد تأمین آب تنها مصرف بیشتر ناپایداری شدیدتر اکوسیستم‌های انسانی و طبیعی موجود را در حوضه به دنبال خواهد داشت.

منابع

۱. حجازی زاده، زهرا. سعید جوی‌زاده. ۱۳۸۹. مقدمه‌ای بر خشکسالی و شاخص‌های آن. چاپ اول، سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها (سمت)، تهران.

11. Edossa Desalegn, Chemed, Babel., Mukand, Singh., Gupta, and Ashim, D. 2009. Drought Analysis in the Awash River Basin, Ethiopia. Springer science + Business Media B.V, Water Resour Manage, 1441-1460.
12. Garen, David, C. 1993. Revised Surface Water Supply Index for Western United States, J. Water Res. Plann. Manage. 1993. 119: 437-454.
13. Kim, Oh. Young. and Lee. Kyoung, Jae, Palmer, Richard, N. 2012. A drought outlook study in korea, Hydrological Sciences Journal, 57(6), 1140-1153.
14. Kwon. Joong. Hyung. and Kim. Joon, Seong, 2010. Assessment of 14- 14- Distributed Hydrological Drought Based on Hydrological Unit Map Using SWSI Drought Index in South Korea, KSCE Journal of Civil Engineering, 923-929.
15. Nikbakht. Jaefar, Tabari. Hussein, 2012. Streamflow Drought Severity analysis by Percent of Normal index (PNI) in northwest Iran. Springer-Verlag.
16. Rahimi, Dariush, Mokarram, Marzieh, Danapour, Mehrdis. 2011. The Analysis of Drought Effects on Water Resources in Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran, American Journal of Scientific Research, 70-79.
17. Shaban .A. 2008. Indicator and Aspects of Hydrological Drought in Lebanon. Springer science + Business Media B.V. Water Resour Manage 1875-1891.
18. Shafer, B.A. and Dezman, L.E. 1982. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought condition in snowpack runoff area, Proc. Western Snow Conf., pp 164-175.
19. Sohrabi, Mohammad, Ryu. John.H, Abatzoglou. John, and Tracy, J. 2012. Climat extrem and its Linkage to regional drought over Idaho, USA. Springer science + Business Media B.V, Nat Hazard.
۲. تاتینا، مرضیه. محمود روشنی و اتوسا بیگدلی. ۱۳۸۹. پایش و پهنه‌بندی خشکسالی در گیلان. چشم‌انداز جغرافیایی، دوره پنجم، شماره یازده، تهران.
۳. شاهرخ وندی، منصور. مهران لشنی زند و معصومه خاکپور. ۱۳۸۸. بررسی خشکسالی هیدرولوژیک و ارتباط آن با بارش در حوضه رودخانه خرم‌آباد. آمایش محیط، شماره ششم، تهران.
۴. کارآموز، محمد. شهاب عراقی‌نژاد. ۱۳۸۹. هیدرولوژی پیشرفته، کتابخانه آستانه مقدس حضرت فاطمه معصومه (س). قم.
۵. کریمی، مهشید. کاکا شاهی و مطلب بایزیدی. ۱۳۹۴. تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی با روش حد آستانه ثابت (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کرخه). پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز. دوره ششم، شماره یازدهم، ساری.
۶. گل محمدی، مریم. علیرضا مساح بوانی. ۱۳۹۰. بررسی تغییرات شدت و دوره بازگشت خشکسالی حوضه قره‌سو در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). دوره بیست و پنجم، شماره دوم، تهران.
۷. مسعودیان، سید ابوالفضل. ۱۳۹۰. آب و هوای ایران. چاپ اول، مشهد، انتشارات شریعه توس.
۸. نصرتی، کاظم. یونس کاظمی. ۱۳۹۰. پایش روزانه خشکسالی و منابع آب در اقلیم‌های مختلف ایران، مرتع و آبخیزداری (منابع طبیعی ایران)، دوره شصت و چهارم، شماره اول، تهران.
9. Araghinejad, Shahab, 2011. An Approach for Probabilistic Hydrological Drought Forecasting, water Res. Manage. 25 (9), 191-200.
10. Balling. Robert. C., Goodrich, Gregory, B. 2007. Analysis of drought determinants for the Colorado River Basin. Springer science + Business Media B.V. Climatic change 179-194.