

پهنه‌بندی پویایی سلامت آبخیز سازند بر اساس دبی‌های مشخصه کم‌آبی و پرآبی

سیدحمیدرضا صادقی^{۱*}، زینب حزباوی^۲ و مهدی غلامعلی‌فرد^۳

^۱ استاد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، ^۲ دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس و ^۳ استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۶

چکیده

تبیین مدل مفهومی جامع و در عین حال قابل فهم برای ارزیابی سلامت آبخیز از اولویت‌های اصلی و ضروری بسیاری از طرح‌ها و برنامه‌های مختلف مدیریتی و سیاست‌گذاری در سطح جهان و از جمله طرح کلان ملی مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز کشور است. در همین راستا، پژوهش حاضر به‌عنوان پژوهش پیش‌گام در کشور به بومی‌سازی مدل مفهومی پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری ($R_{el}R_{es}V_{ul}$) مبتنی بر داده‌های هیدرولوژی با هدف ارزیابی سلامت آبخیز پرداخته است. برای این امر، ابتدا اقدام به تهیه داده‌های طولانی مدت دبی جریان آبخیز سازند واقع در استان مرکزی و استخراج منحنی تداوم جریان شد. سپس، آستانه‌های مناسب دبی مشخصه کم‌آبی و پرآبی به‌عنوان یکی از پیش‌نیازهای ارزیابی سلامت آبخیز با استفاده از مدل مفهومی $R_{el}R_{es}V_{ul}$ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در ادامه، شاخص‌های پایایی (R_{el})، تاب‌آوری (R_{es}) و آسیب‌پذیری (V_{ul}) بر اساس مفاهیم حاکم بر مدل مفهومی $R_{el}R_{es}V_{ul}$ برای چهار مقطع زمانی ۱۳۶۵، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ محاسبه شدند. در نهایت، از طریق تلفیق هندسی شاخص‌های نام برده، وضعیت عمومی سلامت حوزه آبخیز سازند و در زیرحوضه‌های مختلف مبتنی بر دو معیار دبی مشخصه کم‌آبی و پرآبی پهنه‌بندی شد. نتایج پژوهش نشان داد که به‌ترتیب ۵۹، ۵۳، ۶۸ و ۶۶ درصد از آبخیز مطالعاتی در مقطع‌های زمانی اول تا چهارم در وضعیت نسبتاً سالم و سالم از لحاظ شاخص سلامت آبخیز قرار داشتند. حال آن‌که برای معیار دبی مشخصه پرآبی، به‌ترتیب ۱۹، ۲۲، ۵۴ و ۳۸ درصد آبخیز سازند در مقطع‌های زمانی مورد نظر در وضعیت نسبتاً سالم و سالم از لحاظ شاخص سلامت آبخیز قرار گرفت. همچنین، ارزیابی شاخص سلامت کل آبخیز سازند مبتنی بر معیارهای دبی مشخصه کم‌آبی و پرآبی به‌ترتیب نشانگر وضعیت متوسط و نسبتاً سالم و روند بهبود و نیز وضعیت متوسط و روند ثابت بوده است. علاوه بر آن، تغییرپذیری غیر یکنواخت مکانی وضعیت سلامت آبخیز در زیرآبخیزهای مختلف در مقطع‌های زمانی مطالعاتی مورد تایید قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری، تغییرات محیطی، سلامت بوم‌سازگان، مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، نمایه تخریب

مقدمه

Rapport و همکاران (۱۹۸۵) ارائه شده است. ایشان سلامت بوم‌سازگان را به‌عنوان ثبات و پایداری آن تعریف کرده‌اند. به این منظور که بوم‌سازگان تا چه اندازه توانایی حفظ ساختار خود پس از وارد آمدن

مفهوم سلامت بوم‌سازگان^۱ برای اولین بار به‌وسیله

* مسئول مکاتبات: sadeghi@modares.ac.ir

^۱ Ecosystem Health

Sadeghi, ۲۰۱۶؛ Sadeghi و Hazbavi, ۲۰۱۶؛ Hazbavi و Sadeghi (۲۰۱۷) ارائه شده است. مدل مفهومی $RelResVul$ ابتدا به وسیله Hashimoto و همکاران (۱۹۸۲) در زمینه هیدرولوژی برای مدیریت سامانه‌های تامین آب در استرالیا مطرح شده، سپس مورد توجه بوم‌شناس‌ها و اخیراً مدیران و تصمیم‌گیران حوزه‌های آبخیز قرار گرفته است. بر اساس این مدل مفهومی، پایایی یک آبخیز برای یک معیار نمایان‌گر شرایط خاص مورد نظر آن و بر اساس قوانین احتمال تعریف می‌شود. در واقع احتمال فرارگیری آبخیز در وضعیت ایمن یا وضعیت مورد قبول از نظر سلامت آن از نظر معیار مورد بررسی، پایایی آن آبخیز اطلاق می‌شود (Hoque و همکاران؛ ۲۰۱۲، ۲۰۱۴). همچنین ظرفیت یک سامانه آبخیز در واکنش به فشارهای طبیعی، تحمیلی یا ضربه‌های ناگهانی مثل تغییر اقلیم، آتش‌سوزی و فعالیت‌های انسانی مثل چرا یا به‌عبارت دیگر قابلیت آن آبخیز برای ترمیم یا نگهداری سطح بهره‌وری در بی‌نظمی‌های کوتاه یا طولانی‌مدت، تاب‌آوری یا انعطاف‌پذیری آبخیز گفته می‌شود. آسیب‌پذیری نیز درجه‌ای است که یک سامانه آبخیز، زیرسامانه یا اجزای آن بر اثر قرار گرفتن در برابر عامل‌های محرک (آشفتگی یا فشار) عملاً خسارت می‌بینند. به‌عبارتی پتانسیل حوزه آبخیز برای تخریب فرایندهای آبخیز و سلامت بوم‌سازگان آن در آینده، آسیب‌پذیری آبخیز گفته می‌شود (Turner و همکاران، ۲۰۰۳؛ Hoque و همکاران، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶). آسیب‌پذیری یک واحد اندازه‌گیری از شدت وضعیت خطر شکست است و دارای درجات مختلف می‌باشد که وابسته به شرایط محیطی حاکم بر سامانه آبخیز می‌تواند متفاوت ارزیابی شود.

در خصوص ارزیابی سلامت بوم‌سازگان‌ها، مطالعات متعدد و با اهداف گوناگونی انجام شده است. لکن در زمینه ارزیابی سلامت با مدل مفهومی $RelResVul$ مطالعات محدودی و به‌صورت مطالعه موردی فقط در ایالت متحده آمریکا و هند و اخیراً در ایران به‌وسیله نگارندگان صورت پذیرفته است. در آمریکا، Hoque و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از مدل مفهومی $RelResVul$ ، روشی برای ارزیابی سلامت آبخیز با توجه به داده‌های کیفیت آب رودخانه، به روش احتمالی از

تنش و بازیابی به حالت اولیه را دارد. چندین دهه است که مطالعات مختلفی سلامت بوم‌سازگان و روش‌های ارزیابی آن در محیط‌های مختلف آبی و خاکی در ارتباط با فرایندهای اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی را مورد بحث قرار داده‌اند. به‌نحوی که امروزه ارزیابی سلامت بوم‌سازگان به یکی از اولویت‌های اساسی و حیاتی تمام دولت‌ها، پژوهش‌گران و مدیران در سرتاسر جهان در راستای دستیابی به اهداف مدیریت سازگار تبدیل شده است. تا کنون مفهوم سلامت بوم‌سازگان در واحدهای مختلف از جمله تالاب‌ها، رودخانه‌ها، واحدهای شهری و روستایی به‌کار برده شده است. اخیراً این مفهوم در واحد حوزه آبخیز به‌عنوان یک بوم‌سازگان مستقل در برگیرنده ابعاد اجتماعی-سیاسی و محیط زیستی و تأمین‌کننده مواد غذایی، امنیت اجتماعی و اقتصادی، و همچنین خدمات مهم حمایت از زندگی ذی‌نفعان مورد توجه قرار گرفته است. نتایج مترتب بر سلامت آبخیز هم اکنون در مرحله طفولیت خود قرار دارد و نیازمند توسعه، مفهوم‌سازی و تبیین بیشتر است. در همین راستا، روش‌های متنوعی از جمله تجزیه و تحلیل پویایی دما^۱، تجزیه و تحلیل شبکه‌ای^۲، مدل فاصله سلامت^۳، ارزیابی اوضاع مناسب عملکردی^۴، مدل‌های مفهومی پایایی-تاب‌آوری-آسیب‌پذیری ($RelResVul$)^۵، فشار-وضعیت-پاسخ (PSR)^۶ و نسخه‌های اصلاحی و توسعه‌ای آن شامل PSIR^۷، DSR^۸، DPSRC^۹، DPSIR^{۱۰} و DPSIRM^{۱۱} و نیز مدل مفهومی بنیه-ساختار-تاب‌آوری (VOR_{es})^{۱۲} برای ارزیابی سلامت بوم‌سازگان‌های مختلف (Hazbavi و

^۱ Thermodynamic analysis

^۲ Network analysis

^۳ Health distance model

^۴ Proper functioning condition assessment

^۵ Reliability-Resilience-Vulnerability ($RelResVul$)

^۶ Pressure-State-Response (PSR)

^۷ Pressure-State-Impact-Response (PSIR)

^۸ Drive Force-State-Response (DSR)

^۹ Driving Force-Pressure State-Response-Control (DPSRC)

^{۱۰} Driving Force-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR)

^{۱۱} Driving Force-Pressure-State-Impact-Response-Management (DPSIRM)

^{۱۲} Vigor-Organization-Resilience (VOR_{es})

آبی برای مهار خشک‌سالی در منطقه مطالعاتی مورد تأیید قرار گرفت. در ادامه، Hoque و همکاران (۲۰۱۶) مطالعه‌ای برای ارزیابی سلامت دو آبخیز Cedar Creek و Wildcat Creek واقع در آمریکا با کاربرد کارایی مدل مفهومی $R_{el}R_{es}V_{ul}$ مبتنی بر معیارهای کیفیت آب را انجام دادند. در این مطالعه از ترکیب الگوریتم ماشین بردار رابطه‌ای و شبکه بیزی برای بازسازی طولانی‌مدت داده‌های مطالعاتی استفاده کردند. نتایج حاصل از مطالعه با هدف ارزیابی عدم قطعیت داده‌ها و نیز متفاوت بودن مکان‌های مطالعاتی در نتایج خروجی مدل مفهومی $R_{el}R_{es}V_{ul}$ ، کارایی مدل را برای ارزیابی سلامت آبخیز هر دو منطقه مطالعاتی مورد تأیید قرار دادند.

در ایران نیز Hazbavi و Sadeghi (۲۰۱۷الف) مدل مفهومی $R_{el}R_{es}V_{ul}$ را برای معیارهای SPI، دبی‌های مشخصه کم‌آبی و پرآبی و غلظت رسوب طی یک دوره زمانی ۳۸ ساله (۱۹۷۷-۲۰۱۴) بر اساس شرایط حاکم بر حوزه آبخیز شازند واقع در استان مرکزی، موجودیت داده، آستانه‌های تعیین شده برای هر کدام از معیارهای مطالعاتی مفهوم‌سازی و بومی‌سازی کردند. طبق تحلیل‌های به‌عمل آمده، مقدار شاخص سلامت آبخیز برابر با $0/11 \pm 0/16$ به‌دست آمد و بیانگر پایین بودن وضعیت سلامت آبخیز شازند طی دوره مطالعاتی بود. همچنین، در ادامه Sadeghi و Hazbavi (۲۰۱۷) تغییرپذیری مکانی و زمانی سلامت آبخیز شازند واقع در استان مرکزی از لحاظ خشک‌سالی هواشناسی را با بومی‌سازی مدل مفهومی $R_{el}R_{es}V_{ul}$ مورد بررسی قرار دادند. Hazbavi و همکاران (۲۰۱۸a) نیز در پژوهشی تغییرپذیری مدل مفهومی $R_{el}R_{es}V_{ul}$ مبتنی بر SPI در سه منطقه با اقلیم‌های متفاوت شامل حوزه‌های آبخیز Xarrama، Foyle و شازند به‌ترتیب واقع در ایرلند شمالی (معتدل مرطوب)، پرتغال (مدیترانه‌ای) و ایران (خشک و نیمه‌خشک) طی دوره زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۲ را مورد بررسی قرار دادند. بررسی ارتباط بین نوع اقلیم و مقدار SPI، شاخص‌های پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری و نیز شاخص جامع سلامت، نتایج مؤید تأثیرپذیری معنی‌دار تنها دو شاخص آسیب‌پذیری و جامع سلامت آبخیز (۰/۰۰-p-

وضعیت حوزه آبخیز و بر اساس آستانه‌های مورد نظر ارائه دادند. در این پژوهش، الگوریتم بیزی^۱ بر اساس ماشین بردار رابطه‌ای^۲ (RVM) برای کمی کردن خطاها در سری بازسازی شده به‌کار برده شد. تحلیل $R_{el}R_{es}V_{ul}$ نشان داد که حوزه آبخیز مذکور در معرض تهدید آفت‌کش‌ها، آمونیوم و فسفر کل قرار داشته است. نتایج حاکی از این بود که روش‌های به‌کار گرفته شده در پژوهش برای ارزیابی اثرات تنش‌های مختلف در کل حوزه آبخیز مفید بوده است. سپس Hoque و همکاران (۲۰۱۳) اثر چند سناریوی تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر سلامت آبخیز Wildcat Creek واقع در Indiana آمریکا با استفاده از شاخص‌های $R_{el}R_{es}V_{ul}$ را مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش، اثر سناریوی افزایش مقدار بارش بر شاخص‌های سلامت حوزه آبخیز منفی ارزیابی شد. سلامت حوزه آبخیز بر اساس مقدار نیتروژن کل در بعضی از سناریوهای کاربری اراضی کاهش پیدا کرد. آن‌ها اذعان داشتند که تحلیل مبتنی بر خطر در ادغام با روش‌های قطعی برای ارزیابی جامع سلامت آبخیز تحت سناریوهای مورد نظر ضروری بود. همچنین Hoque و همکاران (۲۰۱۴) برای ارزیابی سلامت زمین‌های کشاورزی حوزه‌های آبخیز ایالات متحده مدل مفهومی $R_{el}R_{es}V_{ul}$ را به‌کار بردند. ایشان تغییرپذیری سلامت آبخیز در دو تقسیم‌بندی آبخیز از نظر مقیاس مکانی، شامل نسبت سطح اراضی مشارکت‌کننده بالادست به سطح ابتدایی شروع آبراهه و رتبه‌بندی آبراهه به روش استراهلر را بررسی کردند. نتایج حاکی از تغییرپذیری مکانی شاخص‌های مذکور و عدم تأثیر نحوه تقسیم‌بندی مقیاس مکانی بر ارزیابی سلامت آبخیز مورد مطالعه بوده است. در همین زمینه، Chanda و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل مفهومی $R_{el}R_{es}V_{ul}$ و داده‌های پنج ساله رطوبت خاک، تغییرات مکانی زمانی بلندمدت روند سالانه خشکی در یک حوزه آبخیز در هند را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، نقطه پژمردگی دائمی به‌عنوان آستانه قرارگیری در تنش آبی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از مدل مفهومی $R_{el}R_{es}V_{ul}$ نشان‌دهنده تغییرات مکانی و زمانی شاخص خشک‌سالی بوده، نیاز به مدیریت منابع

¹ Bayesian² Relevance Vector Machine (RVM)

پایش و رفتارسنجی آبخیز به‌عنوان یکی از مراحل اصلی مدیریت سازگار آبخیز به‌طور جدی می‌توان استفاده کرد (Sadeghi و Hazbavi, ۲۰۱۸). بر این اساس، پژوهش فعلی با هدف پهنه‌بندی سلامت آبخیز شازند واقع در استان مرکزی بر اساس معیارهای دبی‌های مشخصه کم‌آبی و پرآبی و مبتنی بر مدل مفهومی $ReIResV_{ul}$ برای ارزیابی سلامت آبخیز برنامه‌ریزی شد. در پژوهش حاضر از مفاهیم و مبانی علمی و تخصصی حاکم بر مدل مفهومی $ReIResV_{ul}$ به‌عنوان یکی از مدل‌های مهم، پرکاربرد در زمینه منابع آب و نوظهور در ارزیابی سلامت آبخیز و به سبب به‌کارگیری شاخص‌های مبتنی بر خطر شامل پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری و نیز لحاظ مفاهیم حاکم بر تعیین آستانه سلامت، استفاده شده است. طبقاً نتایج حاصل از این پژوهش ضمن استفاده در تبیین ارزیابی سلامت حوزه آبخیز و ارائه رویکردهای الگوی مدیریتی حفاظت آبخیز شازند، قابلیت تعمیم به سایر حوزه‌های آبخیز با شرایط مشابه را نیز خواهد داشت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: پژوهش حاضر با هدف اصلی ارزیابی وضعیت سلامت آبخیز مبتنی بر مدل مفهومی $ReIResV_{ul}$ در آبخیز شازند به‌عنوان یکی از آبخیزهای مبتلا به کشور در خصوص توسعه‌های صنعتی برنامه‌ریزی شد. حوزه آبخیز شازند با مساحت ۱۷۴۰ کیلومتر مربع، یکی از زیرحوضه‌های دریاچه نمک است. رودخانه خروجی آبخیز با دبی متوسط ۳/۸۶ متر مکعب بر ثانیه، در پایین‌دست پس از ادغام با سرشاخه‌های اصلی رودخانه قره‌چای در استان همدان، در نهایت به سد الغدير ساوه منتهی می‌شود (Davudirad و همکاران، ۲۰۱۶). منطقه مورد مطالعه بر اساس پژوهش‌های پیشین (Darabi و همکاران، ۲۰۱۴) به ۲۴ زیرآبخیز به‌صورت ارائه شده در شکل ۱ تقسیم‌بندی و در پژوهش حاضر نیز مد نظر قرار گرفته شد.

مدل ارزیابی سلامت $ReIResV_{ul}$: پهنه‌بندی سلامت آبخیز مورد مطالعه در مقیاس زیرآبخیزهای ۲۴ گانه شناسایی شده در مقطع‌های زمانی ۱۳۶۵، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ و بر اساس دبی‌های مشخصه کم‌آبی و

(value=) از گرادیان اقلیمی^۱ بود. در این پژوهش هدف مطالعاتی بومی‌سازی مدل مفهومی مزبور در ترکیب با معیار SPI برای چهار مقطع زمانی ۱۹۸۶، ۱۹۹۸، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ در سطح ۲۴ زیرحوزه آبخیز شازند بوده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی و پهنه‌بندی نشان داد که تمام زیرحوضه‌های مورد مطالعه در سال‌های ۱۹۸۶ و ۱۹۹۸ در دسته ناسالم قرار داشتند. در حالی که در سال ۲۰۰۸ وضعیت سلامت آبخیز شازند به خیلی ناسالم تقلیل یافته است. سپس در سال ۲۰۱۴، ۷۵ درصد آبخیز در وضعیت ناسالم و ۲۵ درصد آن در وضعیت خیلی ناسالم طبقه‌بندی شد. در ادامه، Hazbavi و همکاران (۲۰۱۸) به ارزیابی جامع سلامت همان سه آبخیز با شرایط متفاوت اقلیمی و هیدرولوژیکی واقع در ایرلند شمالی، پرتغال و ایران مبتنی بر مدل مفهومی $ReIResV_{ul}$ پرداختند. در این پژوهش، سلامت آبخیز از نظر معیارهای SPI، دبی مشخصه کم‌آبی و پرآبی، غلظت رسوب، نیتروژن و فسفر کل ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مقدار شاخص جامع سلامت در سه آبخیز Xarrama, Foyle و شازند به‌ترتیب در وضعیت متوسط، متوسط و نسبتاً ناسالم قرار گرفت. سپس متناسب با تبیین مشکلات موجود در هر حوزه آبخیز برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار ملل متحد (SDGs)^۲ راه‌حل‌های مدیریتی پیشنهاد داده شد. در سال‌های اخیر نیز Sadeghi و همکاران (۲۰۱۹) مبادرت به تنسيق مشارکت شاخص‌های پایایی (ReI)، تاب‌آوری (Res) و آسیب‌پذیری (V_{ul}) عوامل مختلف اقلیمی، هیدرولوژیک و انسانی در تعیین سلامت آبخیز شازند کردند. ایشان نقش شاخص (ReI) در چهار مقطع مطالعاتی را بیش از ۳۴ درصد گزارش کردند.

به‌طورکلی جمع‌بندی سوابق ارائه شده در سطح جهانی، ضرورت انجام پژوهش‌های گسترده و همه‌جانبه در شرایط مختلف برای دستیابی به نتایج جامع‌تر و تکمیلی در راستای اتخاذ تصمیمات راهبردی مناسب و متناسب با مسائل مدیریتی حاکم بر حوزه‌های آبخیز را تأیید و تأکید می‌کند. از طرفی از ابزارهای ارزیابی سلامت آبخیز به‌عنوان یکی از رویکردهای مؤثر در

¹ Climatological gradient

² United Nations Sustainable Development Goals (SDGs)

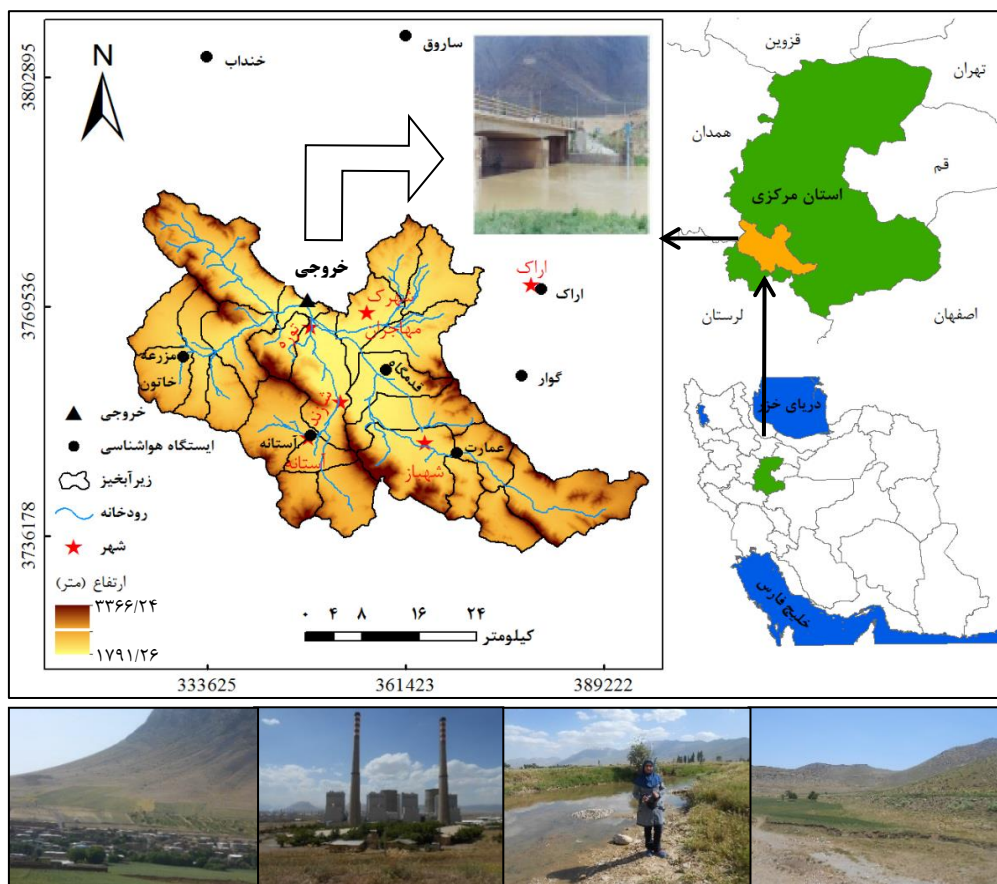
دبی‌های روزانه به‌صورت نزولی مرتب شده و سپس احتمال وقوع آن‌ها از فرمول تجربی ویبول (Mahdavi, ۲۰۰۹) به‌دست آمد.

بر همین اساس، آستانه‌های مربوط به دو معیار دبی مشخصه کم‌آبی و پرآبی Mahdavi (۲۰۰۹) برای کل حوزه آبخیز به‌ترتیب ۰/۱۶ و ۱۲/۶۳ استخراج شد. سپس با توجه به عدم تجهیز زیرحوزه‌های آبخیز به ایستگاه‌های اندازه‌گیری، برای تعیین آستانه دبی‌های مشخصه کم‌آبی و پرآبی در مقیاس زیرحوزه‌های آبخیز مطالعاتی، از ضرب ضریب اصلاحی (R_C) محاسبه شده از رابطه (۱) در مقدار آستانه‌های تعیین شده برای تمام آبخیز مطالعاتی استفاده شد.

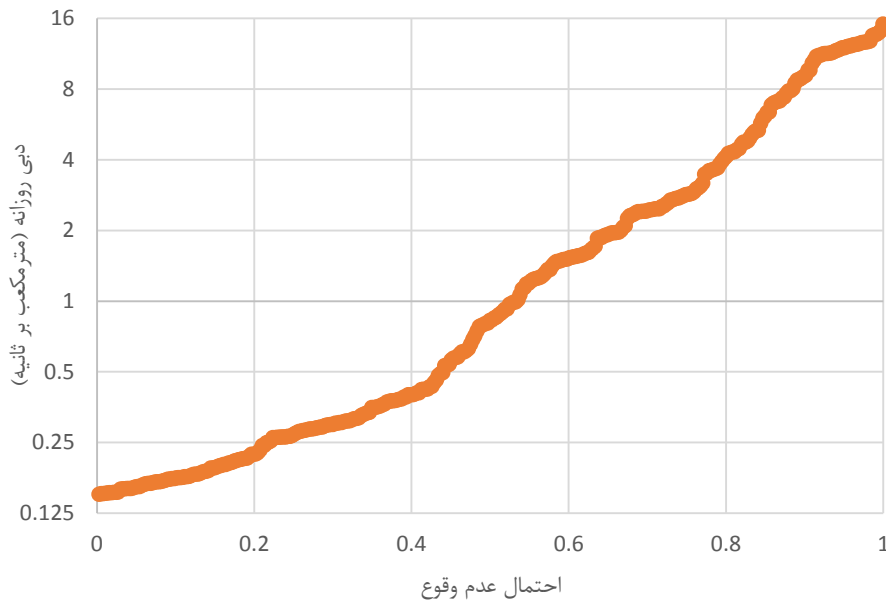
$$R_C = \left[\prod_{i=1}^2 \frac{A_i}{A_t} \times \frac{R_{ci}}{R_{ct}} \right]^{1/2} \quad (1)$$

که در آن، A_i ، A_t ، R_{ci} و R_{ct} به‌ترتیب بیانگر مساحت زیرآبخیز، مساحت کل، ضریب رواناب تهیه شده در واحد زیرآبخیز و ضریب رواناب کل می‌باشند.

پرآبی صورت گرفت. مقطع‌های زمانی مورد نظر در پژوهش حاضر متناسب با موجودیت داده‌ها، شرایط توسعه‌ای آبخیز شازند و نیز انجام مطالعات مقایسه‌ای و تکمیلی در راستای پژوهش‌های پیشین (Davudirad و همکاران، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶؛ Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹) انتخاب شده‌اند. برای تخمین دبی‌های مشخصه کم‌آبی و پرآبی در خروجی هر یک از زیرحوزه‌های آبخیز ابتدا داده‌های دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری پل دوآب واقع در نقطه خروجی آبخیز شازند (شکل ۱) مربوط به دوره ۱۳۵۱ تا ۱۳۹۳ از سازمان آب منطقه‌ای استان مرکزی (<http://markaziwa.wrm-dns.ir>) دریافت و سپس برای رسم منحنی تداوم جریان به‌صورت ارائه شده در شکل ۲ و نیز استخراج آستانه‌های دبی‌های مشخصه کم‌آبی (با فراوانی بیش از ۳۵۵ روز در سال) و پرآبی (با فراوانی کمتر از ۱۰ روز در سال) به شرح گزارش شده در مطالعات پیشین (Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۹) استفاده شد. برای رسم منحنی تداوم جریان، نخست



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی در کشور و استان مرکزی (بالا) و نمایی عمومی از شرایط حاکم بر حوزه آبخیز شازند (پایین)



شکل ۲- منحنی تداوم دبی جریان روزانه ایستگاه پل دوآب طی دوره ۱۳۶۵-۱۳۹۳

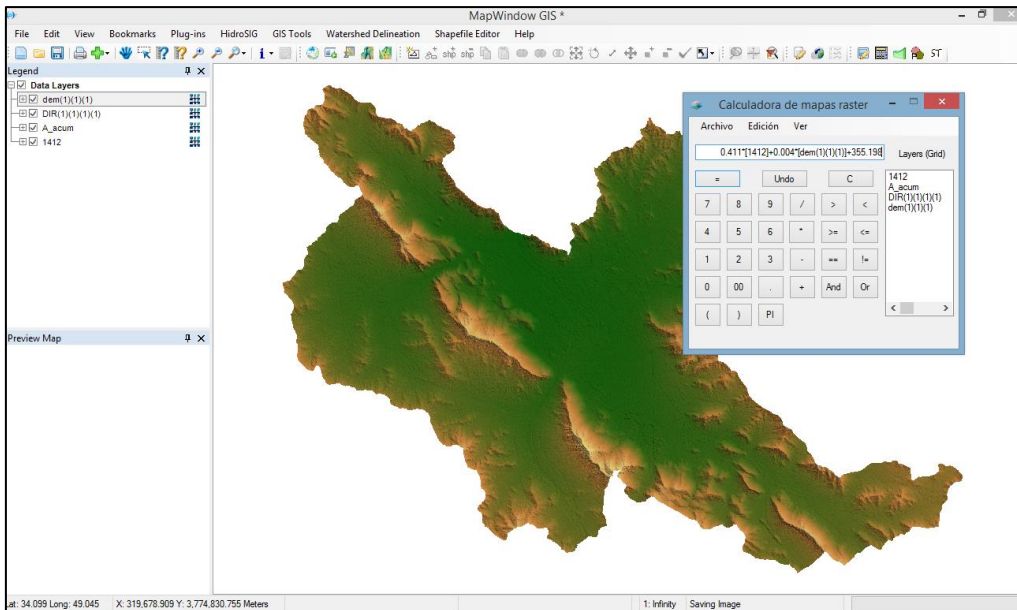
تعرق واقعی با استفاده از امکانات موجود در نرم‌افزار مذکور برای این امر، از رابطه زیر (Davudirad و همکاران، ۲۰۱۶) برای تهیه نقشه مکانی تبخیر و تعرق واقعی ماهانه استفاده شد.

$$E = 0.411P + 0.004h + K \quad (2)$$

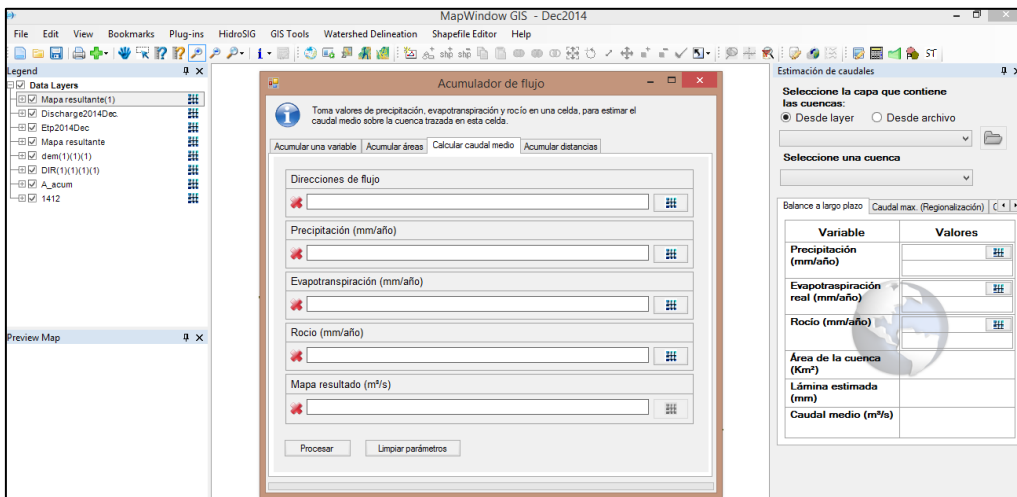
که در آن، E ، P ، h و K به ترتیب تبخیر و تعرق واقعی ماهانه (میلی‌متر)، بارندگی ماهانه (میلی‌متر)، ارتفاع متوسط منطقه (متر) و پارامتر منطقه‌ای هستند. مقدار K با توجه به اطلاعات اندازه‌گیری شده بارندگی، دبی و ارتفاع ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوزه آبخیز شازند، برای هر ماه واسنجی شد. سپس با بارگذاری نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی تهیه شده برای هر ماه و قرارگیری آن در کنار سایر لایه‌های اطلاعاتی، با توجه به شکل ۴ مقدار رواناب برای کل آبخیز شازند و با استفاده از محیط نرم‌افزار MapWindow GIS (<http://web.stanford.edu>; <http://www.mapwindow.org/>) و سامانه اطلاعات جغرافیایی، پهنه‌بندی رواناب در تمام زیرحوزه‌های آبخیز صورت پذیرفت. در شکل ۵ نیز مقدار رواناب، برآوردی برای آبخیز شازند برای خرداد ۱۳۹۳ برای نمونه نمایش داده شده است.

برای محاسبه ضریب رواناب در سطح هر یک از زیرحوزه‌های آبخیز مطالعاتی نیز، جدول‌ها و مبانی پیشنهادی مدل WetSpa (Liu و De Smedt، ۲۰۰۴) و متناسب با شرایط حاکم بر آن‌ها مبتنی بر لایه کاربری اراضی، شیب و بافت خاک به کار گرفته شد. همچنین برای تهیه مقدار متوسط ماهانه رواناب هر یک از زیرحوزه‌های آبخیز از طریق برقراری روابط رگرسیونی حاکم بین مقدارهای بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل، ارتفاع و اطلاعات پیشین (Davudirad و همکاران، ۲۰۱۶؛ Sadeghi و Hazbavi، ۲۰۱۷؛ Sadeghi و Hazbavi، ۲۰۱۷) در محیط نرم‌افزار MapWindow GIS از افزونه 4.0 HydroSIG (<http://minas.medellin.unal.edu.co/~hidrosig/index.php/en/2corporativo/1-que-es-hidrosig-4-0>) استفاده شد.

برای این کار، ابتدا نقشه‌های بارندگی، مدل رقومی ارتفاع، شیب، تجمع و جهت جریان با فرمت رستر وارد محیط نرم‌افزار MapWindow GIS شدند. در شکل ۳، نمایی از محیط نرم‌افزار MapWindow GIS و لایه‌های اطلاعاتی ورودی نمایش داده شده است. به دلیل نبود ایستگاه‌های مطالعاتی کافی برای تهیه نقشه تبخیر و



شکل ۳- نمایی از محیط نرم افزار MapWindow GIS 4.6 برای تخمین مقدار رواناب ماهانه برای حوزه آبخیز شازند



شکل ۴- نمایی از محیط و روش محاسباتی رواناب ماهانه برای حوزه آبخیز شازند

که در آن‌ها و بر اساس مفاهیم حاکم بر مدل مفهومی Re_l, Re_s, V_{ul} ، شاخص پایایی (Re_l) به‌عنوان احتمال قرارگیری آبخیز در وضعیت ایمن در زمان معین از طریق رابطه (۳) محاسبه شد. در این رابطه، $d(j)$ مدت زمان زمین شکست آبخیز، M تعداد کل شکست‌ها و T کل مدت زمان ثبت شده می‌باشد. به این ترتیب اگر هر قسمتی از حوزه آبخیز در وضعیت شکست قرار بگیرد، احتمال این‌که آبخیز تا یک زمان معین خود را از حالت شکست بازبایی کند و خارج شود به‌عنوان شاخص تاب‌آوری آبخیز (Re_s) تعریف و از رابطه (۴) محاسبه شد. در نهایت شدت نسبی حالت شکست با استفاده از سومین شاخص در قالب آسیب‌پذیری (V_{ul})

سپس شاخص‌های پایایی (Re_l) ، تاب‌آوری (Re_s) و آسیب‌پذیری (V_{ul}) از طریق رابطه‌های (۳) تا (۵) محاسبه شد.

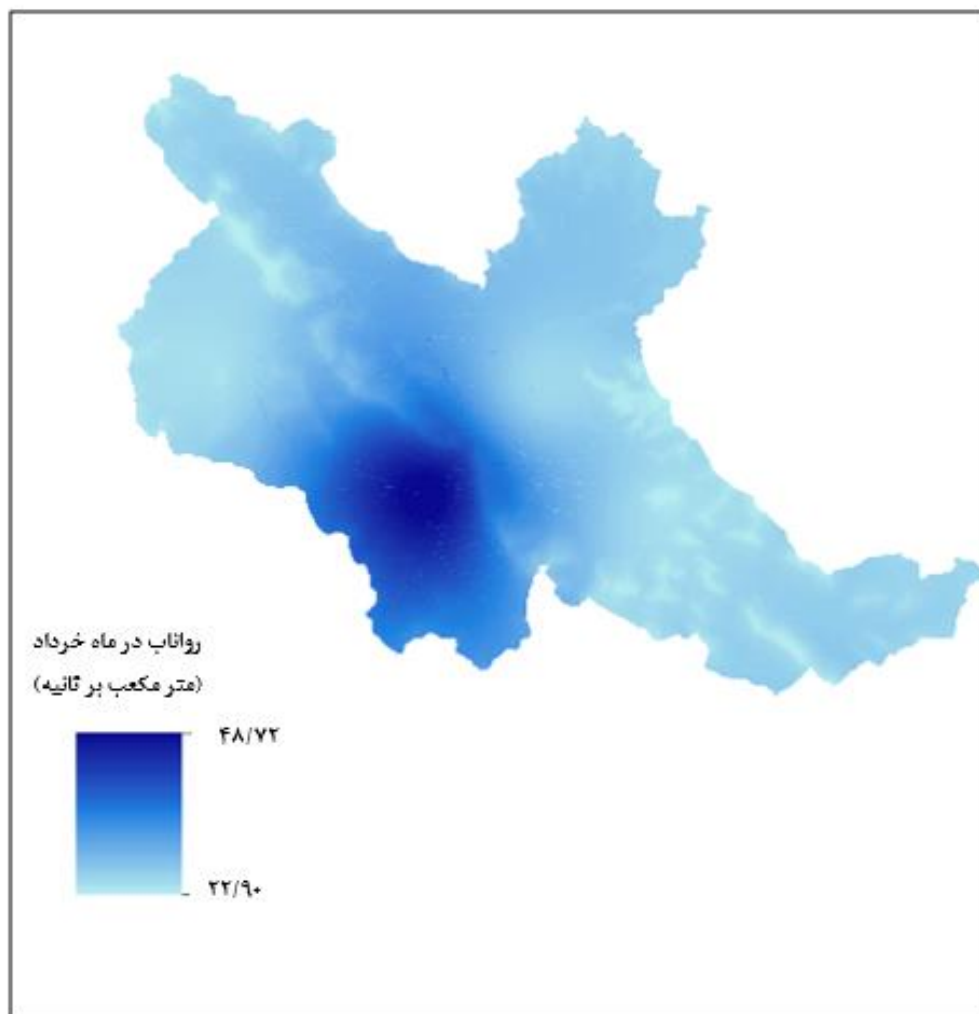
$$Re_l = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d(j)}{T} \quad (3)$$

$$Re_s = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right\}^{-1} \quad (4)$$

$$V_{ul} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^T \left\{ \left[\frac{L_{obs}(i) - L_{std}(i)}{L_{std}(i)} \right] H[L_{obs}(i) - L_{std}(i)] \right\} \quad (5)$$

است. H [] نشانگر تابع پله‌ای ناپیوسته و چندضابطه‌ای است که مقدار آن برای اعداد منفی، صفر، برای اعداد نامنفی، یک و برای صفر، $0/5$ در نظر گرفته می‌شود (Hoque و همکاران؛ ۲۰۱۲، ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶).

برآورد شد. به‌نحوی که آسیب‌پذیری به‌عنوان یک واحد اندازه‌گیری از متوسط آسیب وارده از حالت شکست و قابل تحمل به‌وسیله آبخیز بوده، از رابطه (۵) به‌دست آمد. در رابطه مذکور $L_{obs}(i)$ مقدار متغیر اندازه‌گیری شده در زمان t_i مقدار استاندارد یا مجاز متغیر



شکل ۵- نمایی از مقدار رواناب محاسباتی ماه خرداد ۱۳۹۳ برای حوزه آبخیز شازند

برای ارزیابی و تعیین وضعیت نهایی سلامت آبخیز، مقادیر شاخص سلامت آبخیز به تفکیک زیرحوزه‌های آبخیز مطالعاتی، برای دو معیار دبی مشخصه کم‌آبی و پرآبی، به پنج طبقه سالم ($0/81 - 1/00$)، نسبتاً سالم ($0/80 - 0/61$)، متوسط ($0/60 - 0/41$)، نسبتاً ناسالم ($0/40 - 0/21$) و ناسالم ($0/20 - 0/00$) تقسیم‌بندی شد (Yu و همکاران، ۲۰۰۶).

برای رسیدن به شاخص سلامت مبتنی بر مدل مفهومی $ReIResV_{ul}$ ، از میانگین هندسی شاخص‌های محاسباتی به‌سبب حساس‌تر بودن میانگین مذکور نسبت به سایر میانگین‌ها (Loucks، ۱۹۹۷؛ Wiegand و همکاران، ۲۰۱۳) پس از استانداردسازی شاخص‌ها (Zhao و همکاران، ۲۰۰۶) استفاده شد.

پهنه‌بندی سلامت آبخیز: پس از تعیین مقادیر شاخص‌های محاسباتی مدل مفهومی به‌کار برده شده،

نتایج و بحث

نتایج مربوط به بررسی مقدار دبی جریان سالانه طی دوره آماری ۱۳۵۱ تا ۱۳۹۳ نشان‌دهنده روند کاهنده مقدار دبی جریان سالانه آبخیز شازند با میانگین $2/54 \pm 3/41$ متر مکعب بر ثانیه بوده است. همچنین، میانگین دبی سالانه آبخیز شازند در مقطع‌های زمانی ۱۳۶۵، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ به ترتیب $4/38 \pm 8/77$ ، $0/90 \pm 0/80$ ، $3/56 \pm 8/98$ و $0/92 \pm 1/63$ محاسبه شد.

ارزیابی سلامت آبخیز بر اساس دبی مشخصه کم‌آبی: نتایج حاصل از مدل‌سازی و پهنه‌بندی سلامت آبخیز شازند مبتنی بر مدل مفهومی $ReIReS V_{III}$ در چهار مقطع زمانی ۱۳۶۵، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ در شکل‌های ۶ و ۷ برای معیار دبی مشخصه کم‌آبی برای کلیه زیرآبخیزهای (۱ تا ۲۴) شازند ارائه شده است. علاوه بر آن، تحلیل به‌عمل آمده از نتایج محاسباتی برای معیار دبی مشخصه کم‌آبی در جدول ۱ خلاصه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سلامت آبخیز شازند از لحاظ دبی مشخصه کم‌آبی یا به نوعی خشک‌سالی از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۳ در زیرآبخیزهای مختلف متغیر بوده و از روند ثابتی تبعیت نکرده است. به‌طور کلی در سال ۱۳۶۵، آبخیز شازند غالباً در وضعیت نسبتاً سالم (۵۹ درصد) قرار گرفته بود. سپس در سال ۱۳۷۷ به ترتیب ۳۱، ۲۶ و ۲۲ درصد آبخیز در وضعیت‌های سالم، متوسط و نسبتاً سالم دسته‌بندی شد. در سال ۱۳۸۷ نیز ۳۶ و ۳۲ درصد آبخیز به دو طبقه سالم و نسبتاً سالم از لحاظ خشک‌سالی هیدرولوژیکی اختصاص داده شد. در نهایت ۴۹ درصد از آبخیز در سال ۱۳۹۳ در وضعیت نسبتاً سالم قرار گرفت. نحوه توزیع طبقات سالم، نسبتاً سالم، متوسط، نسبتاً ناسالم و ناسالم در اغلب زیرآبخیزهای شازند در تمام سال‌های مطالعاتی متغیر بوده و نشان‌دهنده پویایی پهنه آبخیز مطالعاتی از لحاظ عامل هیدرولوژی مورد مطالعه می‌باشد. به‌عنوان مثال قسمت شمال شرقی آبخیز در دو سال مطالعاتی اول دارای وضعیت ناسالمی بودند.

سپس در سال‌های بعد توانستند خود را تا حدود زیادی در برابر خشک‌سالی بازیابی کنند. البته برای بعضی زیرآبخیزها مانند ۴ و ۹ در سال آخر به وضعیت ناسالم اولیه برگشتند. با بررسی مفاهیم حاکم بر مدل و محاسبات صورت گرفته، این نکته محرز شد که مهم‌ترین عامل موثر در پایین بودن وضعیت ناسالمی دو زیرآبخیز ۴ و ۹، ابتدا شاخص تاب‌آوری و سپس شاخص پایایی آن بوده است. به‌طوری‌که این دو زیرآبخیز کم‌ترین مقدار شاخص سلامت را در سال‌های مطالعاتی به‌جز در سال ۱۳۸۷ داشتند. برای زیرآبخیزهای ۱۱، ۲۱ و ۲۲ ابتدا شاخص پایایی و سپس شاخص تاب‌آوری بیش‌ترین تأثیر را در تغییر وضعیت سلامت آن‌ها داشتند. زیرا که در سال ۱۳۶۵ دو زیرآبخیز ۱۱ و ۲۱ کم‌ترین مقدار شاخص پایایی را کسب کرده بودند و زیرآبخیز ۲۲ کم‌ترین مقدار تاب‌آوری را به‌خود اختصاص داده بود. سپس در سال ۱۳۷۷، هر سه زیرآبخیز با کسب کم‌ترین مقدار شاخص پایایی موجب شد که از لحاظ وضعیت کلی سلامت، کم‌ترین رتبه را به خود اختصاص بدهند (شکل‌های ۶ و ۷).

همان‌گونه که از رابطه‌های (۳) و (۴) استنباط می‌شود، وضعیت دو شاخص پایایی و تاب‌آوری از دو متغیر d و M به‌عنوان مدت زمان قرارگیری آبخیز در حالت شکست و کل دفعات ثبت شده برای حالت شکست تأثیر پذیرفته‌اند. هر چقدر مقدار d بالاتر باشد، یعنی مدت زمان قرارگیری آبخیز در حالت شکست بیش‌تر بوده، بنابراین، پایایی آبخیز کم‌تر بوده است. علاوه بر آن، اگر مقدار M با فرض یکسان بودن مقدار d کم‌تر باشد به‌معنی عدم توانایی آبخیز در خروج از حالت شکست و بازیابی بوده و بنابراین مقدار تاب‌آوری آبخیز کم‌تر بوده است.

زیرآبخیز ۱۶ از وضعیت نسبتاً سالم (۰/۷۹) در سال ۱۳۶۵ به سالم (۰/۸۹) در سال ۱۳۷۷، نسبتاً ناسالم در سال ۱۳۸۷ (۰/۵۸) و متوسط در سال ۱۳۹۳ (۰/۵۶) تغییر پیدا کرده است. با بررسی محاسبات، مشاهده شد که عامل تأثیرگذار در روند کاهنده وضعیت سلامت زیرآبخیز نام‌برده در دو سال

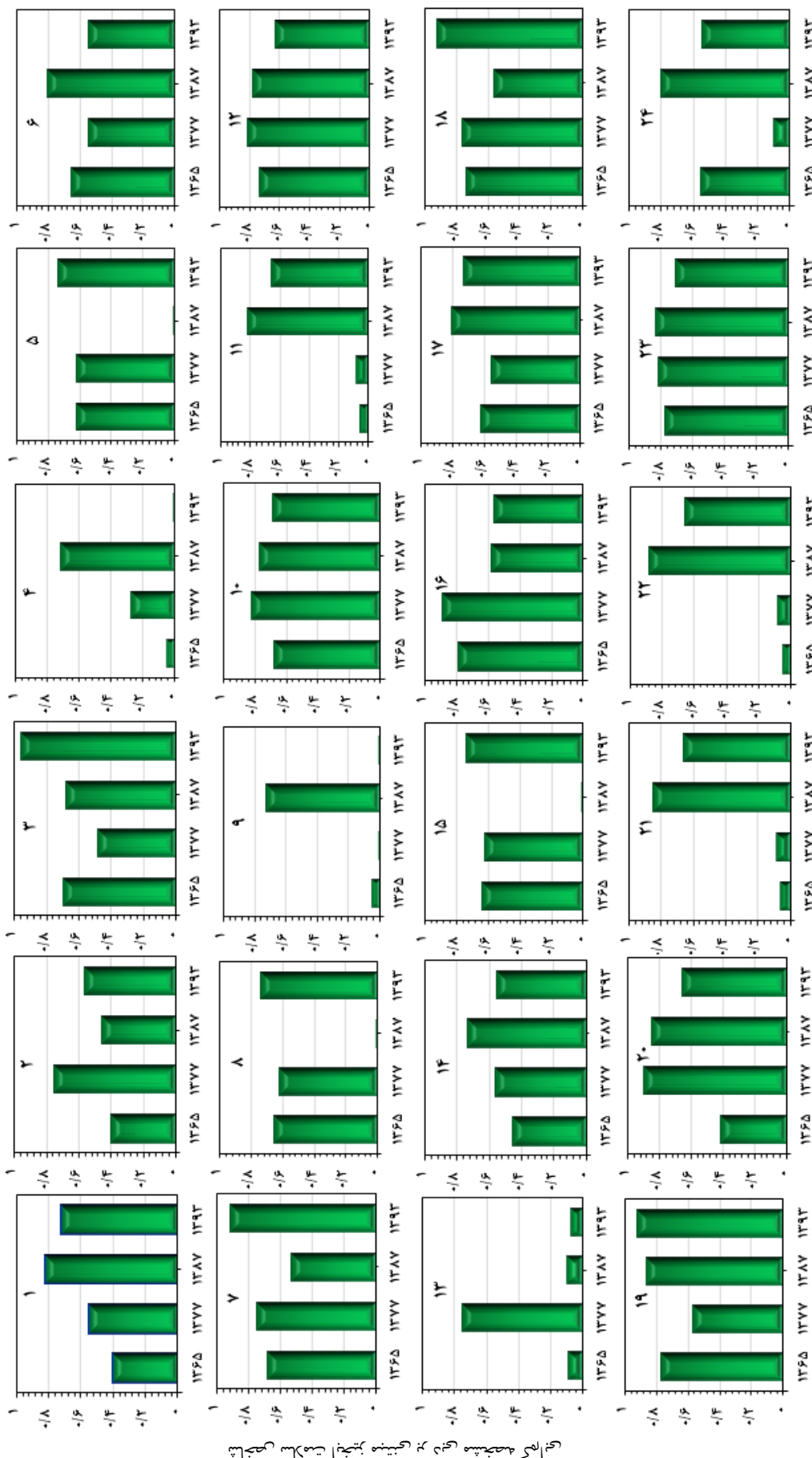
چهارم به ترتیب $0/28 \pm 0/52$ ، $0/28 \pm 0/58$ ، $0/29 \pm 0/66$ و $0/26 \pm 0/63$ به دست آمد که تأییدی دیگر بر این امر می‌باشد.

Davudirad و همکاران (۲۰۱۵) تغییرات دوره‌ای و مکانی استفاده از سرزمین را برای آبخیز شازند در چهار زیرحوضه اصلی ازنا، نهرمیان، پل دوآب و بازنه بررسی نمودند. طبق پژوهش آن‌ها زیرحوضه پل دوآب در دو دوره ۱۳۶۵-۱۳۷۷ و ۱۳۷۷-۱۳۸۷ دارای بیش‌ترین تغییر کاربری بوده است. از طرفی موقعیت قرارگیری زیرآبخیزهای ۴، ۹، ۱۱، ۲۱ و ۲۲ در پژوهش حاضر کاملاً با زیرحوضه پل دوآب منطبق می‌باشد. بنابراین وقوع تغییرات زیاد و از نوع تخریبی در شاخص سلامت آبخیز مبتنی بر دبی مشخصه کم‌آبی در زیرآبخیزهای مزبور را می‌توان به این امر نسبت داد. همچنین، انتظار می‌رود که یکی از دلایل اختصاص مساحت با وضعیت ناسالم در منطقه در مقطع‌های زمانی ابتدایی نسبت به سال‌های اخیر، اثرپذیری زیاد شاخص سلامت آبخیز در دوره‌های ابتدایی که هم‌زمان با شروع و توسعه فعالیت‌های صنعتی بوده، باشد. همان‌گونه که قبلاً ذکر شده است مطالعات مشخصی در زمینه ارزیابی سلامت آبخیز با استفاده از مدل مفهومی $RelResV_{ul}$ و مبتنی بر دبی جریان حوزه‌های آبخیز انجام نشده است. اما در راستای تایید نتایج پژوهش حاضر مطالعات متعددی (برای مثال Newson، ۱۹۹۷؛ Foushee، ۲۰۱۰؛ Phillips و همکاران، ۲۰۱۶؛ Hazbavi و همکاران، ۲۰۱۸) نیز به تغییرپذیری دبی‌های کم‌آبی در اثر تغییر اقلیم، توسعه شهرنشینی و صنعتی پرداخته‌اند و تأکید بر اتخاذ اقدامات مدیریتی متناسب با رفتار آبخیز از تغییرپذیری میزان دبی و رواناب نموده‌اند. همچنین، Kelly و همکاران (۲۰۱۶) با هدف ارزیابی سلامت رودخانه با استفاده از شاخص جامع زیستی بیان کردند که دبی مشخصه کم‌آبی به‌عنوان یکی از معیارهای ضروری در تبیین سلامت زیستی رودخانه به حساب می‌آید و نیز نمایان‌گر بهتری نسبت به سایر مؤلفه‌های دبی برای پژوهش آن‌ها بوده است.

اخیر، به شاخص پایایی و سپس شاخص تاب‌آوری بر می‌گردد.

در خصوص زیرآبخیز ۱۳ به سبب حداکثر مقدار شاخص آسیب‌پذیری در سال ۱۳۶۵، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳، حداقل مقدار شاخص سلامت آبخیز را کسب نموده و فقط در سال ۱۳۷۷ به‌طور موقت توانسته نسبت به سایر زیرآبخیزها مقدار متوسطی از شاخص آسیب‌پذیری را به دست آورده که موجب ارتقای وضعیت سلامت آن شده است. در مقدار شاخص آسیب‌پذیری علاوه بر مقدار M ، مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده دبی جریان، مقدار آستانه و نیز تابع پله یا چندضابطه‌ای تاثیرگذار بودند و ارتباط هر چهار متغیر نام‌برده در این محاسبه اهمیت بسیاری داشته است. اثر این شاخص خود را به‌خوبی در زیرآبخیز ۱۳ نشان داده است. زیرآبخیزهای ۱، ۲، ۳، ۵، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳ از جمله زیرآبخیزهایی هستند که در تمام دوره‌ها در حفظ و یا بهبود سه شاخص اصلی ارزیابی سلامت پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری نسبتاً خوب عمل کرده‌اند. همچنین، زیرآبخیزهای ۳، ۶، ۷ و ۲۴ از جمله مناطقی بودند که به‌طور مقطعی دارای حالت گذر از وضعیت‌های مختلف سلامت آبخیز (سالم تا ناسالم) بودند.

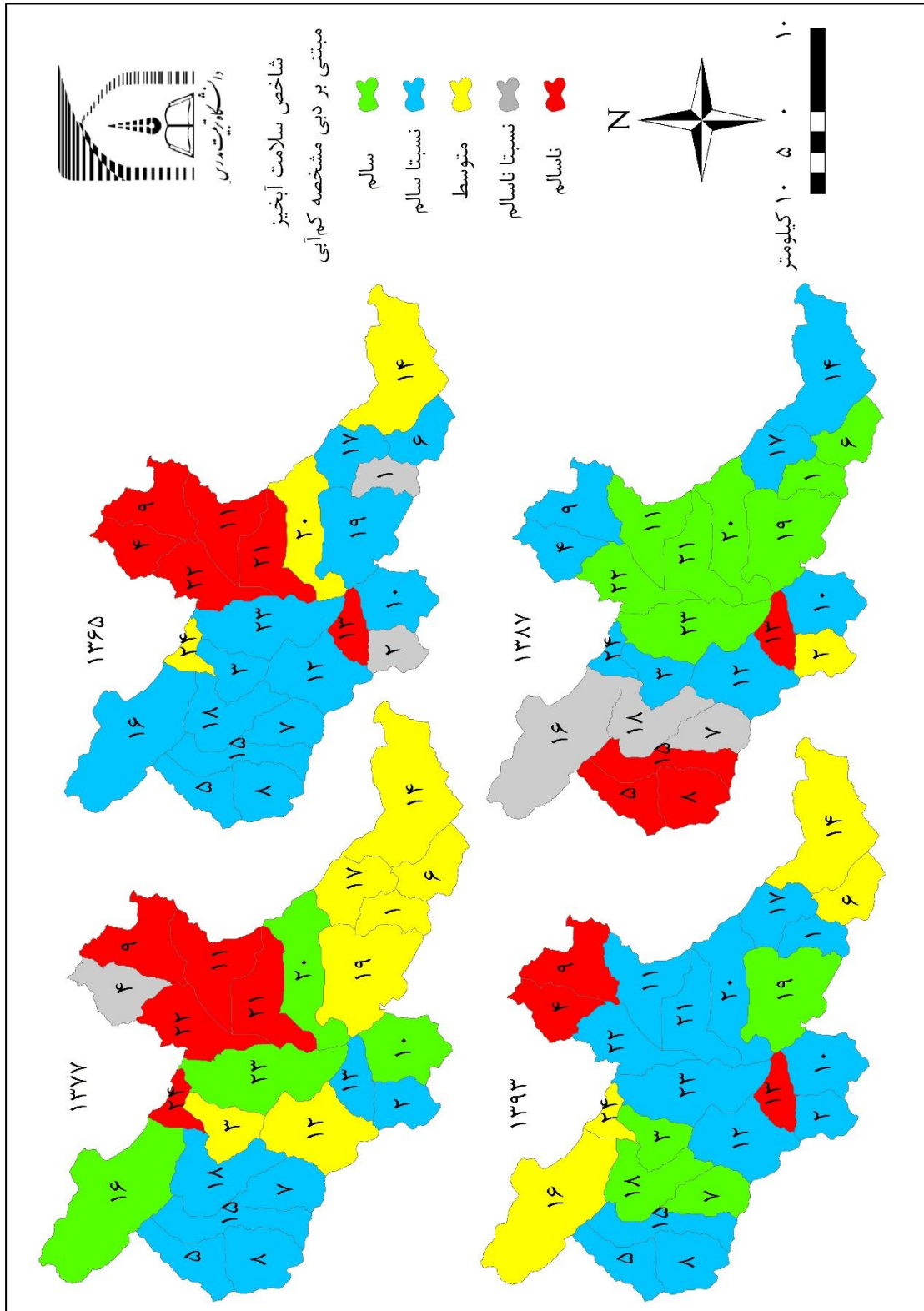
با کاهش گستره ناسالم آبخیز شازند (از ۲۲ درصد در سال ۱۳۶۵ به نه درصد در سال ۱۳۹۳) و افزایش مساحت سالم (از صفر درصد در سال ۱۳۶۵ به ۳۱، ۳۶ و ۱۷ درصد به ترتیب برای مقطع‌های زمانی ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳) و متوسط (از ۱۵ درصد در سال ۱۳۶۵ به ۲۵ درصد در سال ۱۳۹۳) می‌توان جمع‌بندی نمود که روند سلامت آبخیز شازند از لحاظ شاخص خشک‌سالی هیدرولوژیکی متناسب با تحلیل نتایج مدل مفهومی مطالعاتی، شرایط داده‌ای موجود و بازه زمانی مورد مطالعه رو به افزایش ارزیابی شد. هر چند برای نتیجه‌گیری جامع و کامل نیاز به لحاظ سایر شرایط داده‌ای از جمله آب زیرزمینی آبخیز شازند نیاز می‌باشد. همچنین، مقدار شاخص سلامت آبخیز مبتنی بر دبی مشخصه کم‌آبی به ترتیب برای مقطع‌های زمانی اول تا



مقطع زمانی مطالعاتی

شکل ۶- نتایج شاخص سلامت آبخیز میبنتی بر دبی مشخصه کم آبی در زیرآبخیزهای مختلف (۳۴-۱) سازند و مقطع‌های زمانی مطالعاتی

فصلی مشخصه کم آبی در زیرآبخیزهای مختلف سازند و مقطع‌های زمانی مطالعاتی



شکل ۷- پهنه‌بندی شاخص سلامت آبخیز شازند مبتنی بر معیار دبی مشخصه کم‌آبی حاصل از مدل مفهومی R_{III}R_{III} در مقطع‌های زمانی مختلف

جدول ۱- خلاصه‌ای از تجزیه و تحلیل وضعیت سلامت آبخیز شازند مبتنی بر معیار دبی مشخصه کم‌آبی

وضعیت سلامت				سال	مقطع زمانی مطالعاتی
نسبتاً ناسالم	متوسط	نسبتاً سالم	نسبتاً ناسالم		
۱۳، ۱۱، ۹، ۴	۲۴، ۲۰، ۱۴	۱۶، ۱۵، ۱۲، ۱۰، ۸، ۷، ۶، ۵، ۳	۲۳، ۱۹، ۱۸، ۱۷	-	زیرآبخیز
۲۲، ۲۱	۲				۱۳۶۵
۲۲	۴	۱۵	۵۹	-	وسعت مشارکت (درصد)
۲۲، ۲۱، ۱۱، ۹	۱۷، ۱۴، ۶، ۳، ۱	۱۸، ۱۵، ۱۳، ۸، ۷، ۵، ۲	۲۳، ۲۰	۱۶، ۱۲، ۱۰	زیرآبخیز
۲۴	۴	۱۹			۱۳۷۷
۱۸	۳	۲۶	۲۲	۳۱	وسعت مشارکت (درصد)
۱۵، ۱۳، ۸، ۵	-	۱۸، ۱۶، ۷، ۲	۲۴، ۱۷، ۱۴، ۱۲، ۱۰، ۹، ۴، ۳	۱۹، ۱۱، ۶، ۱، ۲۳، ۲۲، ۲۱، ۲۰	زیرآبخیز
					۱۳۸۷
۱۲	-	۲۰	۳۲	۳۶	وسعت مشارکت (درصد)
۱۳، ۹، ۴	-	۲۴، ۱۶، ۱۴، ۶، ۲	۱۵، ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۸، ۵، ۱	۱۹، ۱۸، ۷، ۳	زیرآبخیز
			۲۳، ۲۲، ۲۱، ۲۰، ۱۷		۱۳۹۳
۹	-	۲۵	۴۹	۱۷	وسعت مشارکت (درصد)

از نتایج شکل‌های ۸ و ۹ مشهود است که قسمت‌های مرکزی و جنوبی آبخیز شازند از وضعیت نامناسبی از سلامت آبخیز بر اساس معیار دبی مشخصه پرآبی قرار دارند. به‌طوری‌که زیرآبخیزهای ۲، ۳، ۱۲، ۱۳ و ۲۴ در غالب مقطع‌های زمانی مطالعاتی دارای وضعیت ناسالم بودند و وضعیت آن‌ها طی زمان حفظ نشده و مورد تهدید سیل قرار گرفته است. همچنین، بخش شرقی آبخیز طی مقطع‌های زمانی مختلف به‌جز ۱۳۸۷ از وضعیت مناسبی برخوردار نبود. با این‌که در سال ۱۳۸۷ آبخیز مطالعاتی توانست در برابر تهدید سیل وضعیت مناسبی پیدا کند اما مجدداً در سال ۱۳۹۳ توانایی خود را از دست داده است. برای معیار دبی جریان پرآبی نیز ناهمگونی زیاد ناشی از پویایی آبخیز مطالعاتی نسبت به عوامل هیدرولوژیکی مشاهده شد.

همان‌گونه که در شکل‌های ۸ و ۹ و جدول ۲ مشاهده می‌شود، در مقطع زمانی ۱۳۶۵، حدود ۷۷ درصد آبخیز از وضعیت متوسطی از سلامت آبخیز (۴۱-۶۰) برخوردار بود. همچنین، ۱۹ درصد آن دارای

ارزیابی سلامت آبخیز بر اساس دبی مشخصه پرآبی: نتایج حاصل از مدل‌سازی و پهنه‌بندی سلامت آبخیز شازند مبتنی بر مدل مفهومی $R_{el}R_{es}V_{ul}$ در چهار مقطع زمانی ۱۳۶۵، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ در شکل‌های ۸ و ۹ برای معیار دبی مشخصه پرآبی و برای کلیه زیرآبخیزهای (۱ تا ۲۴) شازند ارائه شده است. همچنین، خلاصه‌ای از تحلیل به‌عمل آمده از نتایج محاسباتی برای معیار دبی مشخصه پرآبی در جدول ۲ ارائه شده است.

بر اساس نتایج به‌دست آمده، مقدار شاخص سلامت آبخیز شازند مبتنی بر دبی مشخصه پرآبی برای سال‌های مطالعاتی ۱۳۶۵، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ به‌ترتیب برابر با $0/16 \pm 0/56$ ، $0/18 \pm 0/52$ ، $0/35 \pm 0/55$ و $0/27 \pm 0/56$ بوده است. همچنین، غالب آبخیز شازند برای سال‌های مطالعاتی نام‌برده به‌ترتیب در وضعیت متوسط (۷۷ درصد)، متوسط (۷۱ درصد)، سالم (۳۳ درصد) و نهایتاً متوسط (۳۵ درصد) بوده است.

۱۴۷/۷۶ کیلومتر مربع و دارای مقدار شاخص سلامت آبخیز ۰/۶۴، ۰/۵۷، ۰/۹۴ و ۰/۷۹ طی مقطع‌های زمانی ۱۳۶۵، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ غالباً از وضعیت خوبی برخوردار بوده است. زیرآبخیزهای ۱ و ۵ نیز علی‌رغم برخورداری از وضعیت متوسط تا سالم از لحاظ معیار دبی مشخصه پرآبی طی سه مقطع زمانی اول مطالعاتی، در مقطع زمانی آخر تنها به سبب کاهش مقدار شاخص پایایی آبخیز و ناشی از افزایش تعداد شکست‌های آن‌ها در مقابله با سیل به وضعیت نسبتاً ناسالم در مقطع زمانی آخر تغییر حالت دادند.

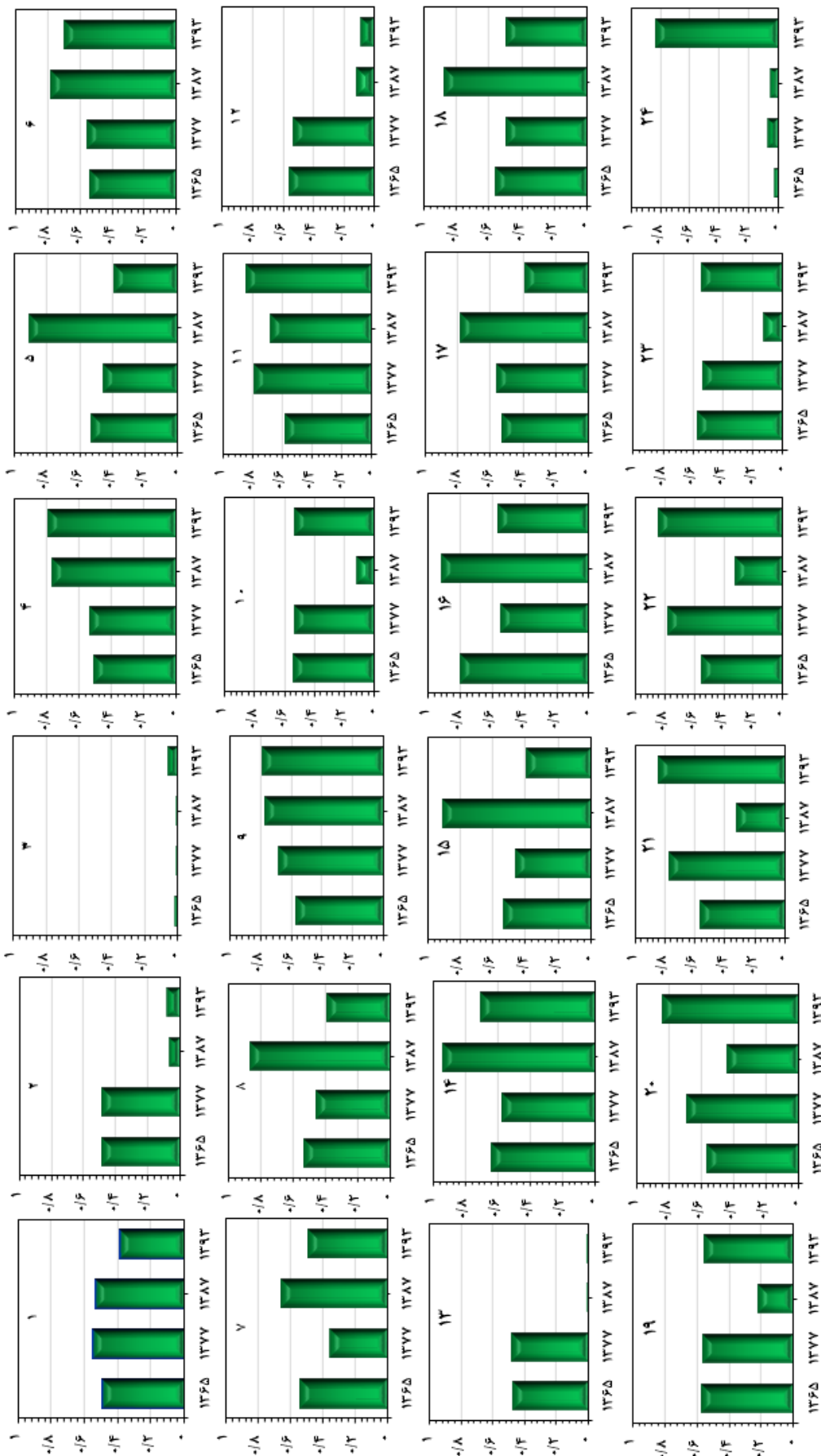
زیرآبخیزهای ۱۸ و ۱۹ تنها آبخیزهایی بودند که توانستند طی چهار مقطع زمانی مطالعاتی در مقابل تغییرات عامل هیدرولوژی آبخیز به خوبی حفظ وضعیت (طبقه متوسط) نمایند. علاوه بر آن زیرآبخیزهای ۷، ۸ و ۱۷ از جمله مناطقی بودند که به‌طور مقطعی دارای حالت گذر از وضعیت‌های مختلف سلامت آبخیز (سالم تا نسبتاً ناسالم) بودند.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر با نتایج مطالعه Sadeghi و همکاران (۲۰۱۸) مبنی بر وجود تخریب زیاد از لحاظ شاخص منطقه حساس محیطی (ESAI) در مناطق شرقی و مرکزی آبخیز شازند مطابقت دارد. این پژوهش‌گران بیان کردند که در دوره ۱۳۶۵-۱۳۷۷ در مناطق شرقی آبخیز مطالعاتی که به شهر اراک نیز نزدیک‌تر می‌باشد، میزان تخریب با وضعیت شکننده و بحرانی دیده می‌شود. سپس با گذشت زمان دخالت‌های انسانی به تدریج توسعه پیدا کرده و قسمت‌های مرکزی و شرق حوضه با تراکم عمده صنایع و شبکه‌های ارتباطی مواجه شده است. حداکثر میزان تأثیرپذیری شاخص منطقه حساس محیطی از عامل انسانی و مدیریتی به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۹۳ بوده است که با روند بهبود وضعیت شاخص سلامت آبخیز مبتنی بر شاخص دبی پرآبی هم‌خوانی دارد. همچنین، مطالعات متعددی (برای مثال، Phillips و همکاران، ۲۰۱۶؛ Boulay و همکاران، ۲۰۱۸؛ Butchart-Kuhlmann و همکاران، ۲۰۱۸) به اهمیت لحاظ دبی مشخصه پرآبی در ارزیابی سلامت رودخانه‌ها و سایر محیط‌های انسانی اشاره کرده‌اند.

وضعیت نسبتاً سالم و فقط چهار درصد در وضعیت ناسالم قرار داشت. سپس در مقطع زمانی دوم (۱۳۷۷) مقدار ناچیزی از درصد مساحت دارای وضعیت متوسط کاسته شده و به درصد مساحت با وضعیت نسبتاً سالم و نسبتاً ناسالم افزوده شد. همچنین، مشاهده شد که آبخیزهای ۱۴ و ۱۶ به ترتیب به سبب کاهش ۵۰ درصدی در وضعیت شاخص‌های پایایی و تاب‌آوری آن‌ها، مقدار شاخص سلامت آن‌ها افت پیدا کرده و در وضعیت متوسط دسته‌بندی شدند. کاهش مقدار d در سال‌های بعدی موجب شد زیرآبخیز ۱۴ و به مقدار کم‌تر زیرآبخیز ۱۶ قوت خود را در برابر تهدید سیل بازیابند.

زیرآبخیزهای دو، ۱۲ و ۱۳ واقع در جنوب شرقی آبخیز شازند از جمله آبخیزهایی هستند که به سبب کاهش معنی‌دار در مقادیر هر سه شاخص پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری طی دو سال ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ از طبقه متوسط به طبقه ناسالم تغییر وضعیت دادند. بدین معنی که دبی جریان آب در این آبخیزها طی دو سال اخیر حداقل به مدت نه ماه از سال از مقدار آستانه دبی مشخصه پرآبی تجاوز کرده (افزایش مقدار d) و نیز از مقدار M کاسته شده بود. در واقع در معرض قرار گرفتن آن‌ها برای چندین ماه متوالی تحت جریان بالاتر از آستانه دبی مشخصه پرآبی، موجب پایین آمدن مقدار تاب‌آوری و در نتیجه آسیب‌پذیر شدن آن‌ها نسبت به سیل شده است.

به‌طور کلی قسمت‌های مرکزی آبخیز شازند از جمله زیرآبخیز ۳ در وضعیت مناسبی از لحاظ شاخص سلامت آبخیز (۰/۰۲، ۰/۰۷، ۰/۰۱ و ۰/۳۹ برای سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳) قرار نداشت. قسمت‌های شرق و شمال شرق آبخیز شازند شامل زیرآبخیزهای ۴، ۶، ۹، ۱۱، ۲۰، ۲۱ و ۲۲ علی‌رغم تجربه وضعیت‌های مختلف، به‌طور کلی از جمله مناطقی هستند که به خوبی طی زمان توانستند وضعیت سلامت خود را ارتقا بدهند. این ارتقا عمدتاً از طریق افزایش تاب‌آوری آبخیز و در نتیجه کاهش آسیب‌پذیری آن در برابر جریان دبی مشخصه پرآبی حاصل شده است. همچنین، زیرآبخیز ۱۴ با مساحت



مقطع زمانی مطالعاتی

شکل ۸- نتایج شاخص سلامت آبجیز مبتنی بر دبی مشخصه برای در زیرآبجیزهای مختلف (۱-۲۴) سازند و مقطع‌های زمانی مطالعاتی

نتایج شاخص سلامت آبجیز مبتنی بر دبی مشخصه برای در زیرآبجیزهای مختلف (۱-۲۴) سازند و مقطع‌های زمانی مطالعاتی

جدول ۲- خلاصه‌ای از تجزیه و تحلیل وضعیت سلامت آبخیز سازند مبتنی بر معیار دبی مشخصه پربابی

وضعیت سلامت					مقطع زمانی مطالعاتی
ناسالم	نسبتاً ناسالم	متوسط	نسبتاً سالم	سالم	
		۱۰، ۹، ۸، ۷، ۶، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱			زیرآبخیز ۱۳۶۵
۲۴، ۳	-	۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱۵، ۱۳، ۱۲، ۱۱	۱۶، ۱۴	-	
		۲۳، ۲۲، ۲۱، ۲۰			وسعت مشارکت (درصد)
۴	-	۷۷	۱۹	-	
		۱۲، ۱۰، ۸، ۷، ۶، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱			زیرآبخیز ۱۳۷۷
۲۴، ۳	۷	۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱۶، ۱۵، ۱۴، ۱۳، ۱۲، ۱۱، ۹	۲۲، ۲۱، ۲۰	-	
		۲۳			وسعت مشارکت (درصد)
۴	۳	۷۱	۲۲	-	
		۱۲، ۱۰، ۸، ۷، ۶، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱			زیرآبخیز ۱۳۸۷
۲۴، ۲۳، ۱۳	۲۲، ۲۱، ۱۹	۲۰، ۱	۱۷، ۱۱، ۹، ۷، ۶، ۴	۱۵، ۱۴، ۸، ۵ ۱۸، ۱۶	
		۷			وسعت مشارکت (درصد)
۲۴	۱۵	۷	۲۱	۳۳	
		۲۱، ۱۷، ۱۱، ۱، ۲۰، ۷، ۶، ۵، ۳، ۱۸، ۱۶، ۱۵، ۱۲، ۹، ۸			زیرآبخیز ۱۳۹۳
			۲۳، ۲۲، ۱۴، ۴	۱۳، ۱۰، ۲ ۲۴، ۱۹	
		۳۵			وسعت مشارکت (درصد)
۱۲	۱۵	۳۵	۱۹	۱۹	

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر مؤید پویایی عامل هیدرولوژیکی آبخیز سازند و بالطبع حاکی از گوناگونی شاخص سلامت آبخیز طی مقطع‌های زمانی و زیرآبخیزهای مطالعاتی بوده است. به نحوی که علی‌رغم عدم یکنواختی آبخیز از لحاظ پراکنش وضعیت سلامت مبتنی بر دو معیار دبی مشخصه کم‌آبی و پربابی، تغییرپذیری زمانی سلامت آبخیز نیز مورد تأیید قرار گرفت. بدین‌صورت که طی چهار مقطع زمانی مطالعاتی ۱۳۶۵، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ دامنه تغییرات مقدار شاخص سلامت آبخیز سازند مبتنی بر دبی مشخصه کم‌آبی به ترتیب ۰/۷۹ - ۰/۰۵، ۰/۹۰ - ۰/۰۱، ۰/۸۸ - ۰/۰۱ و ۰/۹۶ - ۰/۰۱ بوده است. در حالی که دامنه تغییرات مقدار شاخص سلامت آبخیز مبتنی بر دبی مشخصه پربابی برای مقطع‌های زمانی اول تا چهارم به ترتیب برابر با ۰/۸۰ - ۰/۰۱، ۰/۷۹ - ۰/۰۱، ۰/۹۴ - ۰/۰۱ و ۰/۸۵ - ۰/۰۱ به دست آمد. مقدار شاخص سلامت آبخیز برای سال‌های مطالعاتی

۱۳۶۵، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ بر اساس دبی مشخصه کم‌آبی به ترتیب برابر با ۰/۲۸ ± ۰/۵۸، ۰/۲۹ ± ۰/۶۶ و ۰/۲۶ ± ۰/۶۳ و برای دبی مشخصه پربابی برابر با ۰/۱۶ ± ۰/۵۶، ۰/۱۸ ± ۰/۳۵ و ۰/۵۵ ± ۰/۲۷ بوده است. نحوه توزیع درصد غالب منطقه به طبقات مختلف شاخص سلامت آبخیز نیز برای سال‌های مطالعاتی اول تا چهارم مطالعاتی، برای دبی مشخصه کم‌آبی به ترتیب وضعیت نسبتاً سالم (۵۹ درصد)، سالم (۳۱ درصد)، ناسالم (۳۶ درصد) و نسبتاً سالم (۴۹ درصد) بوده و برای دبی مشخصه پربابی به ترتیب وضعیت متوسط (۷۷ درصد)، متوسط (۷۱ درصد)، سالم (۳۳ درصد) و نهایتاً متوسط (۳۵ درصد) برآورده شده است.

همچنین، طی چهار مقطع زمانی مطالعاتی اختصاص ۵۹، ۵۳، ۶۸ و ۶۶ درصد و نیز ۲۲، ۱۹، ۵۴ و ۳۸ درصد از آبخیز سازند به ترتیب برای شاخص سلامت آبخیز مبتنی بر دو معیار دبی مشخصه کم‌آبی و پربابی به وضعیت نسبتاً سالم به بالا مؤید وضعیت

آمده در اثر گذشت زمان می‌باشد. استفاده از نتایج پژوهش حاضر به‌عنوان ابزار مدیریتی مطمئن و مناسب برای بررسی مسائل حاکم بر حوزه‌های آبخیز کشور توسط مدیران، برنامه‌ریزان و سیاست‌گزاران حوزه منابع طبیعی توصیه می‌شود. شناسایی و طبقه‌بندی آبخیزهای سالم اهمیت و کاربرد فراوانی در مطالعات حوزه علوم منابع طبیعی دارد که توسط پژوهش حاضر محقق شده است. در همین‌راستا با اهمیت ارزیابی سلامت آبخیز در انجام مطالعات تفصیلی-اجرایی آبخیزداری و شناسایی و طبقه‌بندی واحدهای همگن حوزه‌های آبخیز بسیار مهم است و پایه و اساس مطالعاتی مانند خاک‌شناسی، فرسایش رسوب، پوشش گیاهی و زمین‌شناسی را تشکیل می‌دهد. اگرچه پژوهش‌های ارزیابی سلامت آبخیز هنوز در مراحل ابتدایی خود قرار گرفته و به انجام پژوهش‌های گسترده‌تر و جامع‌تر و یقیناً با استفاده از معیارهای بیش‌تر و جامع‌تر برای دستیابی به الگوهای جامع ارزیابی سلامت آبخیز نیاز می‌باشد.

بهرتر آبخیز مطالعاتی از لحاظ مقاومت در برابر تهدید خشک‌سالی نسبت به سیل می‌باشد. استفاده از نتایج پژوهش حاضر برای اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی سازگار و راهبردی مورد نیاز برای قسمت‌های مختلف آبخیز شازند و اطلاع از سیر قهقراپی یا بهبود آن از لحاظ عامل هیدرولوژی کاربردی و حائز اهمیت می‌باشد. اگر چه بومی‌سازی مدل مفهومی $RelResV_{ul}$ برای سایر معیارهای ارزیابی سلامت آبخیز از جمله وضعیت فرسایش، رسوب، پوشش گیاهی و غیره و نیز ترکیب آن‌ها برای ارائه جمع‌بندی‌های تکمیلی و نهایی ضروری است. یکی از مزیت‌های یافته‌های حاصل از پژوهش حاضر می‌توان به استفاده از شاخص‌های چندجانبه در مدل مفهومی $RelResV_{ul}$ اشاره نمود که به‌خوبی وضعیت آبخیز شازند را از ابعاد مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار داده است. ارزیابی وضعیت سلامت آبخیز شازند با استفاده از مدل مفهومی مطالعاتی به‌عنوان یک ابزار شناسایی و کاربردی مهم در علم مهندسی و مدیریت منابع طبیعی، دارای نقش و جایگاه خاصی در تشخیص میزان انحرافات به وجود

منابع مورد استفاده

1. Butchart-Kuhlmann, D., S. Kralisch, M. Fleischer, M. Meinhardt and A. Brenning. 2018. Multicriteria decision analysis framework for hydrological decision support using environmental flow components. *Ecological Indicators*, 93: 470-480.
2. Chanda, K., R. Maity, A. Sharma and R. Mehrotra. 2014. Spatiotemporal variation of long-term drought propensity through reliability-resilience-vulnerability based drought management index. *Water Resources Research*, 50(10): 7662-7676.
3. Darabi, H., K. Shahedi, K. Solaimani and M. Miryaghoubzadeh. 2014. Prioritization of subwatersheds based on flooding conditions using hydrological model, multivariate analysis and remote sensing technique. *Water and Environment Journal*, 28: 382-392.
4. Davudirad, A.A., S.H.R. Sadeghi and A. Sadoddin. 2015. Monitoring temporal and spatial changes in land use in the Shazand Watershed. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 2(4): 405-415.
5. Davudirad, A.A., S.H.R. Sadeghi and A. Sadoddin. 2016. The impact of development plans on hydrological changes in the Shazand Watershed, Iran. *Land Degradation and Development*, 27(4): 1236-1244.
6. Foushee, A. 2010. Identifying ecological indicators of climate change and land use impacts to a coastal watershed. University of Vermont, Project, 60 p.
7. Hashimoto, T., D.P. Loucks and J. Stedinger. 1982. Reliability, resilience and vulnerability for water resources system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18(1): 14-20.
8. Hazbavi, Z., B. Jantieni, J.P. Nunes, S.D. Keesstra and S.H.R. Sadeghi. 2018a. Changeability of reliability, resilience and vulnerability indicators with respect to drought patterns. *Ecological Indicators*, 87: 196-208.
9. Hazbavi, Z., S.D. Keesstra, J.P. Nunes, B. Jantieni, M. Gholamalifard, and S.H.R. Sadeghi. 2018b. Health comparative comprehensive assessment of watersheds with different climates. *Ecological Indicators*, 93: 781-790.
10. Hazbavi, Z. and S.H.R. Sadeghi. 2016. Watershed health (Part two): pressure, state and response conceptual model. *Extension and Development of Watershed Management*, 4(15): 25-30 (In Persian).

11. Hazbavi, Z. and S.H.R. Sadeghi. 2017a. Watershed health characterization using reliability-resilience-vulnerability conceptual framework based on hydrological responses. *Land Degradation and Development*, 28: 1528-1537.
12. Hazbavi, Z. and S.H.R. Sadeghi. 2017b. Watershed health (part three): vigor, organization and resilience conceptual model. *Extension and Development of Watershed Management*, 5(16): 1-7. (In Persian)
13. Hazbavi, Z., S.H.R. Sadeghi, and M. Gholamalifard, 2018c. Soil erosion-based watershed health dynamic analysis. *The Second International Young Scientists Forum on Soil and Water Conservation and ICCE symposium 2018*, 27-31 August, Moscow (Russia), 23 p.
14. Hoque, Y.M., S. Tripathi, M.M. Hantush and R.S. Govindaraju. 2012. Watershed reliability, resilience and vulnerability analysis under uncertainty using water quality data. *Journal of Environmental Management*, 109: 101-112.
15. Hoque, Y.M., C. Raj, M.M. Hantush, I. Chaubey and R.S. Govindaraju. 2013. How do land-use and climate change affect watershed health? a scenario-based analysis. *Water Quality, Exposure and Health*, 6(1-2): 19-33.
16. Hoque, Y.M., M.M. Hantush and R.S. Govindaraju. 2014. On the scaling behavior of reliability-resilience-vulnerability indices in agricultural watersheds. *Ecological Indicators*, 40, 136-146.
17. Hoque, Y.M., S.Tripathi, M.M. Hantush and R.S. Govindaraju. 2016. Aggregate measures of watershed health from reconstructed water quality data with uncertainty. *Journal of Environmental Quality*. 45(2): 709-719.
18. Kelly, N.E., E.M. O'Connor, R.F. Wilson, J.D. Young, J.G. Winter and L.A. Molot. 2016. Multiple stressor effects on stream health in the Lake Simcoe Watershed. *Journal of Great Lakes Research*, 42(5): 953-964.
19. Liu, Y.B. and F. De Smedt. 2004. *WetSpa Extension, A GIS-based hydrologic model for flood prediction and watershed management. Documentation and User Manual*. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan 2, 1050 Brussel, Belgium. 126 p.
20. Loucks, D.P. 1997. Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences Journal*, 42 (4): 513-530.
21. Newson, M. 1997. *Land, water and development: Sustainable management of river basin systems. Second Edition, ISBN 0-203-44352-7 Master e-book ISBN, London and New York, 460 p.*
22. Mahdavi, M. 2009. *Applied hydrology*. Tehran University Press, 342 p (In Persian).
23. Phillips, I.D., J.-M. Davies, M.F. Bowman and D.P. Chivers. 2016. Macroinvertebrate communities in a Northern Great Plains River are strongly shaped by naturally occurring suspended sediments: implications for ecosystem health assessment. *Freshwater Science*, 35, 1354-1364.
24. Prasannakumar, V., H. Vijith, N. Geetha and R. Shiny. 2011. Regional scale erosion assessment of a sub-tropical highland segment in the Western Ghats of Kerala, South India. *Water Resources Management*, 25: 3715-3727.
25. Rapport, D.J., H. Regier and T. Hutchinson. 1985. Ecosystem behavior under stress. *American Naturalist*, 125: 617-640.
26. Sadeghi, S.H.R., A.A. Davudirad, A. Sadoddin and Sh. Paimozd. 2018. Trend of changes in land degradation index in Shazand Watershed-Markazi Province. *Watershed Engineering and Management*, 9(4): 383-397.
27. Sadeghi, S.H.R. and Z. Hazbavi. 2016. Watershed health (Part one): reliability, resilience and vulnerability conceptual model. *Extension and Development of Watershed Management*, 4(14): 39-42 (In Persian).
28. 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*, 587-588: 168-176.
29. Sadeghi, S.H.R. and Z. Hazbavi. 2018. Watershed adaptive management based on health and sustainability assessment. 3rd National Conference on Soil Conservation and Watershed Management, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran, Tehran, June 19-20, 2018: 10 p.
30. Sadeghi, S.H.R., Z. Hazbavi and M. Gholamalifard. 2019. Interactive impacts of climatic, hydrologic and anthropogenic activities on watershed health. *Science of the Total Environment*, 648: 880-893.
31. Turner, B.L., R.E. Kasperson, P.A. Matson, J.J. McCarthy, R.W. Corell, L. Christensen, N. Eckley, J.X. Kasperson, A. Luers, M.L. Martello, C. Polsky, A. Pulsipher and A. Schiller. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 100 (14): 8074-8079.
32. Van Dyk, D. and X. Meng. 2001. The art of data augmentation. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 10(1): 1-50.

33. Wiegand, A.N., C. Walker, P.F. Duncan, A. Roiko and N. Tindale. 2013. A systematic approach for modelling quantitative lake ecosystem data to facilitate proactive urban lake management. *Environmental Systems Research*, 2(3): 12 p.
34. Yu, G., Q. Yu, L. Hu, S. Zhang, T. Fu, X. Zhou, X. He, Y. Liu, S. Wang and H. Jia. 2013. Ecosystem health assessment based on analysis of a land use database. *Applied Geography*. 44: 154-164.
35. Zhao, Y.Z., X.Y. Zou, H. Cheng, H.K. Jia, Q. Wu, G.Y. Wang, C.L. Zhang and S.Y. Gao. 2006. Assessing the ecological security of the Tibetan Plateau: methodology and a case study for Lhaze County. *Journal of Environmental Management*, 80: 120-131.