



مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سمنان

# پژوهش‌های آب‌بخزرداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

## بررسی اثرات خشک‌سالی روی الگوی زمانی تغذیه آبخوان‌ها در آبخیز دامغان رود

مهین خسروی<sup>۱</sup>، محمدرضا یزدانی<sup>۲\*</sup>

۱- پژوهشگر پسادکتری، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب کشاورزی و شرب به‌شمار می‌آید و به‌شدت تحت تأثیر عامل‌های محیطی و اقلیمی است. دانش محدود ما از فرآیندهای آب‌شناختی به‌ویژه منابع آب زیرزمینی، شناخت سنج‌ها و الگوهای مؤثر بر تغذیه آب‌های زیرزمینی برای مدیریت بهینه منابع آب ضروری است. بررسی الگوی زمانی تغذیه آب‌های زیرزمینی زمینه‌ای را برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی به‌منظور کاهش اثرات خشک‌سالی روی منابع آب فراهم می‌آورد.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش کمی‌سازی تغذیه آب‌های زیرزمینی در دوره زمانی ۲۰۱۸-۲۰۰۸ با استفاده از مدل SWAT در آبخیز دامغان رود در استان سمنان انجام شد. واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از مدل SWATCUP و دستورالعمل SUFI2 انجام شد. از شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI)، شناسایی خشک‌سالی RDI و رواناب استاندارد شده SRI برای بررسی اثرات خشک‌سالی روی تغذیه آبخوان‌ها استفاده شدند. بررسی روند تغذیه آبخوان‌ها با استفاده از آزمون ناپرامتری من-کندال و روش برآوردگر شیب سن محاسبه شد.

#### نتایج و بحث

بررسی نتایج ضریب نش-ساتکلیف (NSE) در دوره واسنجی (۰/۷۷) و اعتبارسنجی (۰/۶۹) در مدل SWAT نشان داد که کارایی این مدل در شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی نسبتاً خوب بود. یافته‌ها نشان داد، در مقیاس ماهانه اثرات خشک‌سالی بر تغذیه آبخوان روند خاصی نداشت، اما در فصل‌های زمستان، بهار و تابستان روند افت تغذیه آبخوان افزایشی بود. در فصل‌های بارش، کاهش اندازه بارش و رواناب و افزایش اندازه دما و تبخیر تعرق منجر به افزایش خشک‌سالی و افت تغذیه آبخوان‌ها شد.

#### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m\_yazdani@semnan.ac.ir

استناد: خسروی، م.، یزدانی، م.ر. ۱۴۰۴. بررسی اثرات خشک‌سالی روی الگوی زمانی تغذیه آبخوان‌ها در آبخیز دامغان رود.

پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۸ (۱): ۳۸-۶۰.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2024.365662.1585

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴، دوره ۳۸، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۴۶، بهار ۱۴۰۴، صفحه‌های ۳۸ تا ۶۰.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تجزیه و تحلیل الگوی زمانی آبخوان‌ها نشان داد در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تغییرات متغیرهای اقلیمی ارتباط نزدیکی با یکدیگر و با پدیده خشک‌سالی دارند. نتایج این پژوهش نشان داد الگوی زمانی تغذیه آبخوان‌ها تحت تأثیر تغییرات متغیرهای گوناگون در آبخیز تغییر کرد و اندازه این تغییرات براساس همبستگی متغیرها بود. روندیابی خشک‌سالی‌ها روی تغذیه آبخوان‌ها نشان داد که در دوره ترسالی روند افزایشی و در دوره خشک‌سالی روند کاهش‌ی بود. از این یافته می‌توان برای بهبود تغذیه آبخوان‌ها در ترسالی‌ها و کاهش اثرات خشک‌سالی‌ها روی تغذیه آبخوان‌ها با مدیریت و برنامه‌ریزی بهینه منابع آب موجود استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود برای بهبود تغذیه آبخوان‌ها و کاهش اثرات خشک‌سالی، برنامه‌ریزی جامع و مدیریت بهینه منابع آب در دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی انجام شود. همچنین، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و تقویت نظارت و پایش منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ضروری است تا به‌موقع از کاهش غیرمنتظره تغذیه آبخوان‌ها جلوگیری شود.

## واژگان کلیدی: آب‌زیرزمینی، آزمون من-کندال، شاخص خشک‌سالی، مدل SWAT

## مقدمه

پرشماری تأثیر متغیرهای اقلیمی را بر تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی تأیید می‌کند (بوهای بوکتون و همکاران ۲۰۲۲؛ حشماوی و همکاران ۲۰۲۲؛ منگیستو و همکاران ۲۰۲۲). از این‌رو، برای بهره‌برداری پایدار از منابع آب‌های زیرزمینی، شناسایی عامل‌های اقلیمی مؤثر بر تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی ضروری است. عامل مهم دیگر، شرایط محلی آبخیز است که بر تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی تأثیرگذار است. شاه و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی بازیابی آب‌های زیرزمینی در مناطق نیمه‌خشک هند را با استفاده از حوضچه‌ها و سدهای محلی بررسی کردند. نتایج نشان داد که اقدام‌های محلی باعث افزایش تغذیه آب‌های زیرزمینی شد. شرایط محلی با خصوصیات مانند پستی‌بلندی و کاربری زمین‌ها بر فرایندهای آب‌شناختی آبخیز تأثیرگذارند (هرسی و همکاران ۲۰۲۳؛ نوری و سینگ ۲۰۲۴).

مدل‌های آب‌شناختی مبتنی بر فیزیک آبخیز، ابزارهای قدرتمندی برای برآورد تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی هستند و امکان برآورد اندازه‌های تغذیه آبخوان‌ها را به‌شکل کاربردی فراهم می‌آورند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل آب‌شناختی SWAT اشاره کرد (ساهو و همکاران ۲۰۲۳). این مدل با تقسیم‌بندی آبخیز بر اساس کاربری زمین‌ها، خاک و شیب، واحدهایی

آب‌های زیرزمینی نقش حیاتی در تأمین نیازهای آبی بوم‌نظام‌ها در سراسر جهان دارند و یکی از مهم‌ترین منابع آب برای کشاورزی و شرب به‌شمار می‌آیند. این منابع با ماهیتی پویا به شدت تحت تأثیر عامل‌های محیطی و اقلیمی هستند (بارمن و همکاران ۲۰۲۳). افزایش تقاضا ناشی از رشد سریع جمعیت، صنعتی شدن و توسعه کشاورزی، منجر به برداشت بی‌رویه آب از این منابع شده است و نبودن مدیریت صحیح آن‌ها فشارهای دو‌چندانی را بر منابع آب‌های زیرزمینی وارد کرده است (بوور ۲۰۰۰؛ تولارام و کریشنا ۲۰۰۹؛ وانگ و همکاران ۲۰۱۸؛ جیا و همکاران ۲۰۲۰).

رخداد پدیده‌های حدی اقلیمی مانند خشک‌سالی باعث کاهش تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی شده است و اثرات برداشت از این منابع را تشدید می‌کند (پایوا و همکاران ۲۰۲۰؛ بوسیکو و همکاران ۲۰۲۱). این اثرات به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که تغییرپذیری بارش بیشتری دارند، شدیدتر است. سندستروم (۱۹۹۵) گزارش داد که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاهش ۱۵٪ سالانه بارش سبب افت ۴۰ تا ۵۰٪ تغذیه سالانه سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود. بررسی بحران آب در منطقه کیپ‌تاون نشان داد کاهش بارش، مدیریت نادرست و مصرف بیش از حد منابع آبی عامل اصلی بحران بود (کیلی و همکاران ۲۰۱۹). پژوهش‌های

محیط‌های آب‌زمین‌شناختی گوناگون تغییر می‌کند و شدت خشک‌سالی‌ها، الگوهای تغذیه آب زیرزمینی را به‌طور قابل توجهی تغییر می‌دهند. وایت و همکاران (۲۰۲۳) پیامدهای تغییرات ناشی از خشک‌سالی بر تغذیه آب زیرزمینی برای امنیت آبی کشاورزی در درهٔ مرکزی کالیفرنیا را با استفاده از مدل‌های آب‌شناختی بررسی کردند و برای شبیه‌سازی فرآیندهای تغذیه از سناریوهای گوناگون خشک‌سالی استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که شدت‌های گوناگون خشک‌سالی باعث شدت کاهش دسترسی به آب زیرزمینی شد. از این‌رو، در مدیریت منابع آب باید تغییرات الگوی تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی تحت شرایط گوناگون خشک‌سالی برای استفاده پایدار از آب‌های زیرزمینی مدنظر قرار داد. یکی از بهترین روش‌ها برای روندیابی شاخص‌های اقلیمی و آب‌شناختی، روش برآوردگر سن و آزمون ناپارامتری من-کندال است (عبداللهی ۲۰۱۵). در سال‌های گذشته در آبخیز دامغان‌رود سمنان به‌سبب تداوم خشک‌سالی، حجم بارش و افت تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی کاهش قابل توجهی داشته است. از این‌رو، ایجاد درک عمیق‌تری از الگوی زمانی تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی و بررسی روند آن با استفاده از مدل آب‌شناختی SWAT و روش‌های آماری پیشرفته تحت اثر خشک‌سالی‌های گوناگون ضروری به‌نظر می‌رسد. در این پژوهش، از مدل آب‌شناختی SWAT به‌دلیل دقت، توانمندی و انعطاف‌پذیری زیاد در شبیه‌سازی فرآیندهای آب‌شناختی و تعیین تأثیر گوناگون تغییرات اقلیمی، کاربری زمین‌ها، خصوصیات خاک و خصوصیات آبخیز بر شبیه‌سازی فرآیندهای آب‌شناختی استفاده شد.

جغرافیایی "۴۹°۱۸'۳۶" تا "۴۸°۲۱'۵۸" درجه و ۱۸ دقیقه و ۳۶ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه و ۵۸ ثانیه شرقی است (شکل ۱). میانگین سالانهٔ بارش و دما در بخش‌های گوناگون آبخیز به‌ترتیب از ۱۶۰ تا ۴۴۶ میلی‌متر و از ۱۶ تا ۲۳ °C متغیر است. بلندی آبخیز از ۱۰۵۰ تا ۳۹۵۰ متر از سطح دریا متغیر است. آب و

مشابهی با عنوان واحد پاسخ آب‌شناختی (HRU) را تشکیل می‌دهد و در این واحدها به‌شکل یکسان عمل می‌کند و فرایندهای آب‌شناختی را برآورد می‌کند (آرنولد و همکاران ۱۹۹۸). با این ویژگی، مدل SWAT می‌تواند تأثیر خصوصیات آبخیز بر فرایندهای آب‌شناختی را نشان دهد. در پژوهش‌های پرشماری از مدل SWAT برای ارزیابی تأثیر جنبه‌های گوناگون عامل‌های اقلیمی و خصوصیات آبخیز (کاربری زمین‌ها) بر فرایندهای آب‌شناختی استفاده شده است (سعید و همکاران ۲۰۲۱؛ منگیستو و همکاران ۲۰۲۲؛ تویسا و همکاران ۲۰۲۰).

با این حال، در پژوهش‌های اندکی تأثیر هم‌زمان پدیدهٔ خشک‌سالی و خصوصیات آبخیز بر تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی بررسی شده است. برای مثال، اسدی و همکاران (۲۰۲۲) اثرات خشک‌سالی‌های پرتکرار بر تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی را در گجرات غربی بررسی کردند و نشان دادند که تغییرات شدید بارش و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی باعث کاهش قابل توجه تغذیهٔ آبخوان‌ها شد. لی و همکاران (۲۰۲۳) پیش‌بینی تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های سنجش از دور ارزیابی کردند و تأثیرگذاری استفاده از داده‌های مکانی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی و پیش‌بینی اثرات خشک‌سالی را تأیید کردند. با توجه به افزایش نرخ شش برابری استخراج آب‌های زیرزمینی در مقیاس جهانی در ۵۰ سال گذشته و روند رو به رشد ۱-۲٪ سالانه آن (هرسی و همکاران ۲۰۲۳) و دانش محدود ما از فرایندهای آب‌شناختی به‌ویژه منابع آب زیرزمینی، شناخت سنجه‌ها و الگوهای مؤثر بر تغذیه آب‌های زیرزمینی ضروری است. نتایج پژوهش‌ها نشان داده‌اند که نرخ‌های تغذیهٔ آب زیرزمینی تحت شرایط خشک‌سالی در

#### مواد و روش‌ها

##### معرفی منطقهٔ مطالعه‌شده

آبخیز دامغان‌رود با مساحت ۱۳۰۰۰۰ هکتار در منطقهٔ نیمه‌خشک در مرکز ایران با بلندهای متنوع و بارش انتخاب شد. این آبخیز میان عرض‌های جغرافیایی "۳۶°۲۱'۳۶" تا "۴۸°۲۱'۳۶" شمال و طول

بررسی شده در آبخیز به ترتیب شامل ایستگاه‌های فولاد محله، دامغان، چهارده دامغان، سمنان و شاهرود بودند. بر اساس داده کاربری خاک عمده کاربری‌های آبخیز شامل زمین‌های کشاورزی، زمین‌های باغی، جنگل با تراکم خیلی کم، جنگل با تراکم کم، جنگل با تراکم متوسط، مرتع متراکم، مرتع با تراکم کم، بوته‌زار و بیشه‌زار و مناطق شهری بودند. کدهای کاربری زمین‌های آبخیز دامغان رود در مدل SWAT در شکل ۲ نشان داده شده است. در آبخیز مطالعه شده چهار رده خاک شناسایی شدند که شامل مولی‌سویل<sup>۱</sup> انتی‌سویل<sup>۲</sup>، آردیسویل<sup>۳</sup> و اینسپتی‌سویل<sup>۴</sup> بودند (شکل ۳). بر اساس مدل SWAT، آبخیز مطالعه شده به ۱۲ زیرآبخیز و ۶۶ واحد پاسخ آب‌شناختی تقسیم شد. بزرگ‌ترین زیرآبخیز با مساحت ۱۷۳/۷۸۱ کیلومترمربع و نه واحد پاسخ آب‌شناختی و کوچک‌ترین زیرآبخیز با مساحت ۹۷/۹۳ کیلومترمربع و هفت واحد پاسخ آب‌شناختی بود. همچنین، منطقه مطالعه شده در ۵ طبقه شیب (۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و >۴۰٪) تقسیم‌بندی شد. نقشه‌های رقمی ارتفاع، نقشه شیب، نقشه خاک، نقشه کاربری زمین‌ها در آبخیز دامغان رود در شکل ۳ نشان داده شده است.

هوای آبخیز بر اساس روش دومارتن به شکل سرد خشک تا نیمه مرطوب است (رحیمی جوادیان ۲۰۱۸). انواع اصلی کاربری زمین‌ها شامل جنگل (بیشه‌زار و بوته‌زار، جنگل‌های با تراکم بسیار کم، کم و متوسط)، مراتع (مراتع با تراکم زیاد، متوسط و کم)، زمین‌های کشاورزی (کشاورزی آبی و زمین‌های باغی) و زمین‌های بایر (زمین‌های بدون پوشش و زمین‌های صخره‌ای) است. خاک‌های منطقه مطالعه شده عمدتاً روی رسوبات آبرفتی کواترنر گسترش یافته‌اند. این خاک‌ها روی سازندهای زمین شناسی غنی از سنگ آهک که عمدتاً از لایه‌های سنگ آهک و مارن تشکیل شده است، تشکیل شده‌اند (رحیمی جوادیان ۲۰۱۸). روندنمای مراحل انجام پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

### داده‌های ورودی مدل SWAT

داده‌های ورودی لازم برای اجرای مدل SWAT در جدول ۱ نشان داده شده است.

برای بررسی صحت و درستی داده‌های اندازه‌گیری رواناب، همبستگی میان داده‌های آب‌دهی و بارش بررسی شد. ایستگاه‌های باران‌سنجی و همدید

جدول ۱- داده‌های لازم و مشخصات آن‌ها برای اجرای مدل SWAT.

Table 1- Required data and their specifications for SWAT model implementation.

Type data	Scale	Source	Description
Digital Elevation Map	30-meter	Extracted from the watershed topography	-
Land Use/Land Cover Map	1:25000m	Country Mapping Organization with a resolution of 30 meters	It was investigated by the General Department of Natural

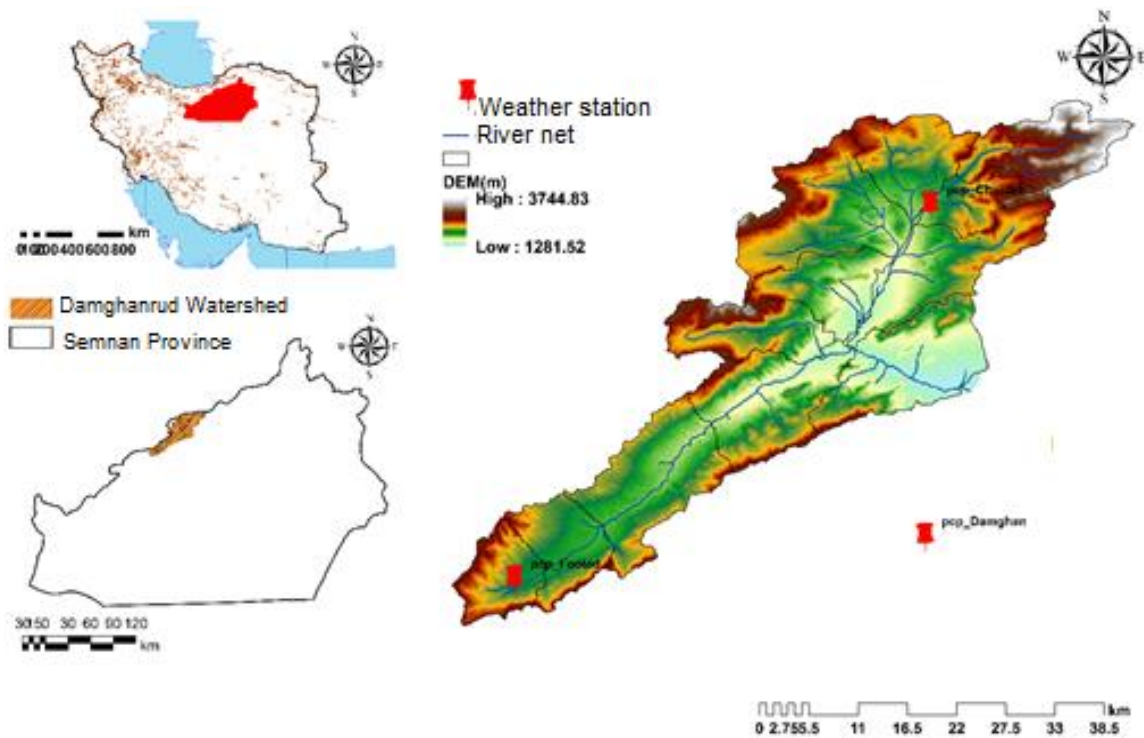
3- Ardisoil

4- Inceptisoil

1- Molisoil

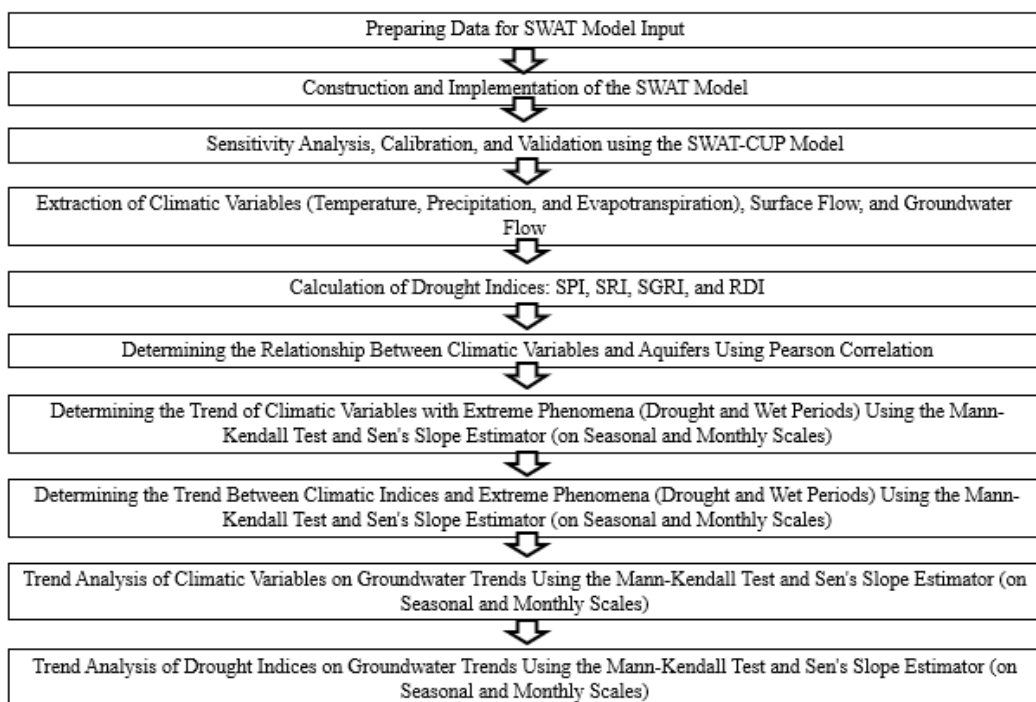
2- Entisoil

Soil Map	30-meter	World soil map	Resources of Semnan Province using field studies. Some physical and chemical properties along with soil groups in the global soil map used in the SWAT model
meteorological data	climatology 5 stations and one hydrometer station,	Semnan Regional Meteorological and Water Organization	Minimum and maximum temperature and daily precipitation for a period of 30 years (1992-2022)
observational runoff	11 years of daily runoff data,	Semnan Regional Water Organization	(2008-2018)



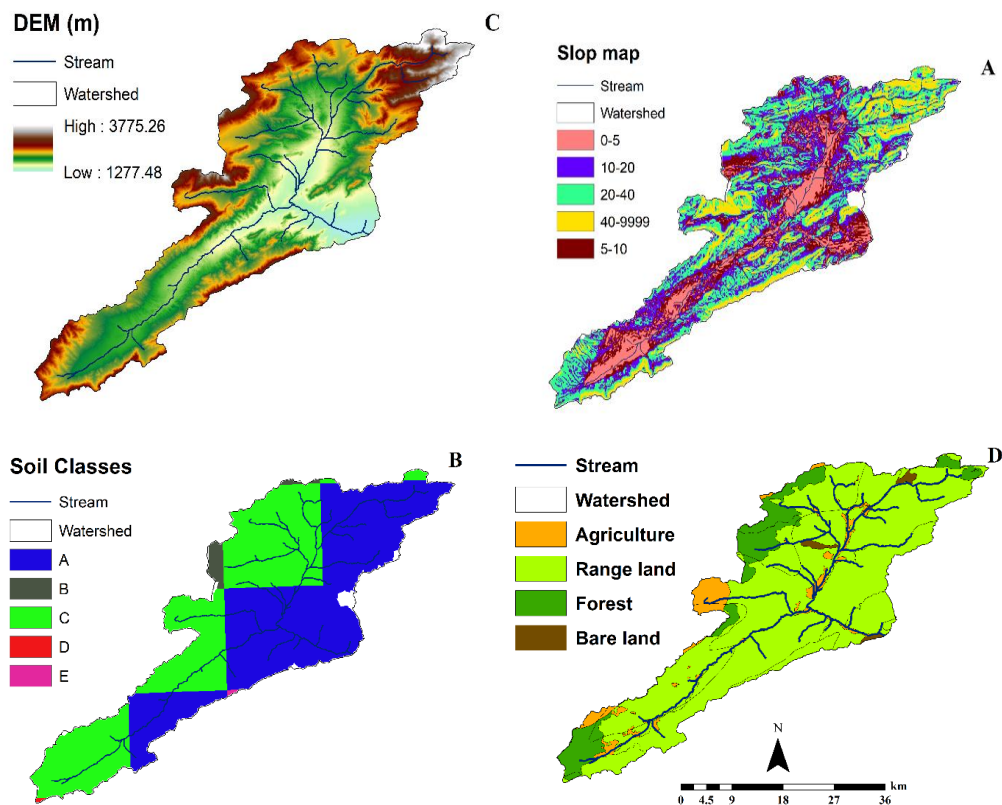
شکل ۱- موقعیت منطقهٔ مطالعه‌شده در استان سمنان و ایران.

Figure 1- Location of the study area in Semnan province and Iran.



شکل ۲- روندنمای مراحل پژوهش.

Figure 2-Trend Chart of Research Steps



شکل ۳- نقشه رقومی ارتفاع (C)، نقشه شیب (A)، نقشه کاربری زمین‌ها (D)، نقشه خاک (B).

Figure 3- Digital Elevation Map (C), Slope Map (A), Land use Map (D), Soil Map (B).

### ساختار مدل SWAT

در این پژوهش از ArcSWAT2012 برای مدل‌سازی فرایندهای آب‌شناختی استفاده شد. برای رسم آبخیز، آبراهه‌ها و شیب آبخیز از DEM با وضوح ۳۰ متر استفاده شد. واحدهای آب‌شناختی آبخیز (HRU)<sup>۵</sup> به‌وسیله نقشه‌های شیب، کاربری زمین‌ها و خاک محلی رسم شد. واحدهای HRU زیرمجموعه‌های منحصر به فردی از مدل بودند که از لحاظ خاک، کاربری زمین‌ها و شیب مشابه بودند. این واحدها اساس محاسبات دقیق تعادل آب و رسوب در آبخیز بودند (بیلی و همکاران ۲۰۱۶؛ تیگابو و همکاران ۲۰۲۰). محاسبه فرایندهای آب‌زمین‌شناختی بر اساس درصد هر HRU در آبخیز انجام شد (بیلی و همکاران ۲۰۱۶). در این پژوهش فرآیند آب‌زمین‌شناختی شبیه‌سازی‌شده در مدل SWAT بر اساس معادله تعادل آب و با استفاده از رابطه ۱ تعیین شد. (وو و همکاران ۲۰۱۵).

$$SW_t = (SW_0 + \sum_{i=1}^t R_{day}(i) - Q_{surf}(i) - E_{sub}(i) - W_{seep}(i) - Q_{gw}(i)) \quad (1)$$

$SW_t$ : محتوای آب نهایی،  $SW_0$ : محتوای آب اولیه خاک (میلی‌متر در روز  $i$ ),  $R_{day}$ ,  $Q_{surf}$ ,  $E_{sub}$ ,  $W_{seep}$  و  $Q_{gw}$ : به ترتیب اندازه بارندگی، رواناب، ET، نشت آب به لایه بالایی خاک و جریان برگشتی (میلی‌متر در روز  $i$ ) است. واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت مدل SWAT واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده از رواناب ماهانه (۲۰۱۸-۲۰۰۸) در ایستگاه آب‌سنجی در خروجی آبخیز انجام شد. برای گرم کردن مدل از داده‌های رواناب ماهانه (۲۰۰۹-۲۰۰۸) استفاده شد. واسنجی مدل با استفاده از داده‌های رواناب ماهانه (۲۰۱۴-۲۰۱۰) انجام شد. برای اعتبارسنجی مدل از داده‌های رواناب ماهانه (۲۰۱۸-۲۰۱۵) استفاده شد. واسنجی، نبودن قطعیت و تجزیه و تحلیل حساسیت مدل SWAT در نرم افزار (SWAT-CUP) با استفاده از دستورالعمل SUFI2 و تحلیل حساسیت برای تعیین سنجه‌های مؤثر بر شبیه‌سازی جریان انجام شد (عباسپور ۲۰۱۱). سنجه‌های استفاده‌شده در مرحله

واسنجی با اندازه‌های مرزی سنجه‌ها بر پایه پیشنهاد (عباسپور ۲۰۱۱) برای تکرار اولیه انتخاب شدند و سنجه‌های حساس و مهم بر اساس اندازه‌های آماره  $t$ -stat بیشتر و  $p$ -value کمتر تعیین شدند (وانگ و همکاران ۲۰۲۰). سپس، سنجه‌های حساس آب‌شناختی انتخاب و اندازه‌های آنها در طول واسنجی اصلاح شد. برای ارزیابی عملکرد مدل، ضریب‌های کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، ضریب تبیین  $R^2$  درصد سوگیری (PBIAS)<sup>۴</sup> استفاده شد. (موریاسی و همکاران ۲۰۰۷) گزارش دادند،  $NSE > 0.50$ ،  $R^2 > 0.70$  برای داده‌های جریان، قابل قبول است (جدول ۴).

### محاسبه داده‌های آب زیرزمینی

در بررسی تأثیر پدیده خشک‌سالی روی آب‌های زیرزمینی، در نظر گرفتن تعاملات میان متغیرهای مؤثر روی آب‌های زیرزمینی در آبخیزها بسیار با اهمیت است (آلن و همکاران ۲۰۱۰). در ساختارهای جریان آبخوان‌ها به شکل یک ساختار دو عضوی که ساز و کار پاسخ را تشکیل می‌دهند، طبقه‌بندی می‌شوند. این ساختار شامل؛ ساختار مبتنی بر تغذیه و ساختار جریان محور است. در ساختار مبتنی بر تغذیه، تغذیه پراکنده روی ردپای آبخوان باعث افزایش سطح آب‌های زیرزمینی می‌شود. از این رو، پاسخ افزایش سطح آب زیرزمینی سبب هدایت جریان در ساختارهای جریان محور می‌شود و جریان را افزایش می‌دهد و کاهش در جریان باعث کاهش سطح آب زیرزمینی می‌شود. در این ساختار، تغییرات اندازه‌های جریان، پاسخ سطح آب زیرزمینی را هدایت می‌کند (آلن و همکاران ۲۰۱۰). در این پژوهش نیز معیار عملکرد و تعاملات آبخوان و متغیرهای اقلیمی ساختار نامبرده در نظر گرفته شد. بر این اساس در این پژوهش برای شبیه‌سازی ساختار آبخوان و جریان از مدل SWAT استفاده شد. به این ترتیب که اندازه‌های رواناب ماهانه و میانگین تغذیه آب زیرزمینی ماهانه برای دوره پایه (۲۰۱۸-۲۰۰۸) برآورد شد. از آنجایی که مدل SWAT در شبیه‌سازی سفره‌های آب زیرزمینی آبخوان‌های کم‌ژرفا و ژرف را

خشک‌سالی (RDI) برای پایش تأثیر تبخیر-تعرق روی خشک‌سالی استفاده شد (تارکی و ایوک ۲۰۲۲؛ مولینا و همکاران ۲۰۲۲)

#### شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) شاخص SPI را برای پایش خشک‌سالی در دوره‌های مرطوب و خشک ارائه دادند. این شاخص برای تجزیه و تحلیل خشک‌سالی‌های هواشناسی بسیار رایج و مرسوم است و برای تجزیه و تحلیل خشک‌سالی آب‌شناختی نیز در بازه‌های زمانی (۱۲، ۲۴ ماه) استفاده می‌شود (یلماز ۲۰۱۹). در این پژوهش از این شاخص خشک‌سالی برای پایش خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی (۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ ماهه) استفاده شد. برای محاسبه شاخص SPI، داده‌های بارش تجمعی برای هر یک از مقیاس‌های زمانی تعیین شد و با تابع توزیع احتمال گاما برازش داده شد (موکا و مورکام ۲۰۲۲؛ بارکر و همکاران ۲۰۱۶). داده‌های بارش به یک توزیع بهنجار معمولی با میانگین و انحراف معیار ۰ و ۱ تبدیل شدند (موکا و مورکام ۲۰۲۲). سرانجام، از شاخص SPI برای نشان دادن تغییرپذیری خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی گوناگون استفاده شد. در این پژوهش با استفاده از رابطه ۴ شاخص SPI محاسبه شد.

$$SPI = \left( \frac{X_i - X_m}{\sigma} \right) \quad (4)$$

$X_m$ : میانگین بارندگی (ماهانه، فصلی یا سالانه (میلی‌متر))،  $\sigma$ : انحراف استاندارد بارندگی ثبت‌شده،  $X_i$ : اندازه بارندگی (ماهانه، فصلی یا سالانه (میلی‌متر)) است.

#### شاخص رواناب استاندارد شده (SRI)

با توجه به ورودی‌های لازم برای شاخص‌های خشک‌سالی، شاخص‌های تجزیه و تحلیل خشک‌سالی آب‌شناسی محدودتر هستند. شاخص رواناب استاندارد شده (SRI) از ساده‌ترین و پرکاربردترین

به‌شکل مجزا در HRU ها در نظر می‌گیرد و تأثیر کمتر سفره‌های ژرف در تغذیه آبخوان‌ها در آبخیز مطالعه‌شده، در این پژوهش، اندازه‌های تغذیه آب‌های زیرزمینی قبل از تقسیم اندازه‌های تغذیه در آبخوان‌های کم‌ژرفا و ژرف در نظر گرفته شد. اندازه‌های تغذیه آبخوان با استفاده از معادله‌های ۲ و ۳ محاسبه شد (هرسی و همکاران ۲۰۲۳).

$$\begin{aligned} wrchrg.i &= \left( 1 - e^{(-1/\delta_{gw})} \right) wseep \\ &+ \left( e^{(-1/\delta_{gw})} . wrchrg.i - 1 \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$wrchrg.i = wrchrg.sh + wdeep \quad (3)$$

$Wrchrg.i$ : اندازه تغذیه ورودی به سفره‌های زیرزمینی در روز  $i$  (میلی‌متر)،  $\delta_{gw}$ : زمان تأخیر (روزها)،  $wseep$ : اندازه کل آب خروجی از کف نیمرخ خاک در روز  $i$  (میلی‌متر)،  $Wrchrg.i-1$ : اندازه تغذیه ورودی به سفره‌های آب زیرزمینی در روز قبل از روز  $i$  (میلی‌متر)،  $Sh$ : اندازه تغذیه آبخوان کم‌ژرفا در روز  $i$  (میلی‌متر)،  $wdeep$ : اندازه تغذیه آبخوان ژرف در روز  $i$  (میلی‌متر) است.

#### شاخص‌های پایش خشک‌سالی

اساسی‌ترین راه برای پایش خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناختی، شاخص‌های خشک‌سالی است (ندایراگیجه و لی ۲۰۲۲)، انتخاب شاخص مناسب خشک‌سالی تحت تأثیر متغیرهای پرشماری است که شامل حجم داده‌های ورودی لازم، در دسترس بودن داده‌ها، هدف پژوهش، اقلیم، منحصر به فرد بودن شاخص و اعتبار آن‌ها است (تارکی و ایوک ۲۰۲۲). در این پژوهش از چهار شاخص، بارش استاندارد شده (SPI)<sup>۷</sup>، برای پایش خشک‌سالی هواشناسی، شاخص رواناب استاندارد شده (SRI)<sup>۸</sup>، برای پایش خشک‌سالی آب‌شناختی، شاخص آب زیرزمینی استاندارد شده (SGRI)<sup>۹</sup> برای پایش خشک‌سالی آب زیرزمینی و شاخص شناسایی

10- Drought Index Recognition

7- Drought Index Precipitation- Standard

8- Streamflow Drought Index

9- Standard groundwater recharge index



GW: میانگین تغذیهٔ آبخوان (ماهانه، فصلی یا سالانه (میلی‌متر))،  $\sigma$ : انحراف استاندارد تغذیهٔ آبخوان ثبت‌شده،  $GW_i$ : اندازهٔ تغذیهٔ آبخوان (ماهانه، فصلی یا سالانه (میلی‌متر)) است (بلوم‌فیلد و مارچنت ۲۰۱۳).

#### شاخص شناسایی خشک‌سالی (RDI)

برای غلبه بر ناتوانی SPI در درک اثرات غیرمستقیم دما بر تعادل آب، شاخص RDI، به‌وسیلهٔ تساکیریس و ونجلیس به‌عنوان یک نسخه توسعه‌یافته از شاخص خشک‌سالی ارائه شد (تساکیریس و ونجلیس ۲۰۰۵). این شاخص در مناطق گرم و خشک با شاخص SPI همبستگی ۹۹٪ داشت. این شاخص در مقایسه با شاخص SPEI (با همبستگی کمتر از ۵۰٪) می‌تواند نقش تبخیرتعلق در تشدید خشک‌سالی را به‌خوبی نشان دهد. در ایران در اقلیم‌های گوناگون نتایج مشابهی (بنی‌مهد و خلیلی ۱۳۹۲) گزارش شده است. در ترکیه کاتی‌پوغلو و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از شاخص‌های RDI و SPEI خشک‌سالی را پایش کردند. نتایج الگوهای خشک‌سالی پایش‌شده در این پژوهش با دو شاخص RDI و SPEI مشابه یکدیگر بودند. بذرافشان و همکاران (۲۰۱۹) از شاخص‌های SPI، SPEI، RDI برای پایش خشک‌سالی در شرایط آب و هوایی خشک، فراخشک و سرد استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد در مناطق خشک و فراخشک، شاخص RDI در مقایسه با شاخص SPEI شاخص کارآمدتری برای محاسبه شدت، مدت و فراوانی خشک‌سالی بود. از این رو در این پژوهش از شاخص RDI استفاده شد. با استفاده از شاخص RDI می‌توان هم بارش و هم دما را به‌عنوان داده‌های ورودی در نظر گرفت (اسدی زارچ و همکاران ۲۰۱۱). تبخیرتعلق یک عامل مرتبط با دما است که RDI آن را در نظر می‌گیرد. در این پژوهش برای محاسبه RDI از نسبت کل بارش به تبخیر و تعلق بالقوه استفاده شد (رابطهٔ ۷). تبخیرتعلق بالقوه با استفاده از اندازه‌های دما در بیشترین و کمترین نقطهٔ محاسبه می‌شود (زارعی و همکاران ۲۰۱۱). شرایط خشک‌سالی با استفاده از محدوده SPI طبقه‌بندی شد.

شاخص‌های خشک‌سالی آب‌شناختی است که به‌وسیلهٔ پژوهشگران بسیاری برای پایش خشک‌سالی آب‌شناختی استفاده شده است (جهانگیر و یاراحمدی ۲۰۲۰؛ وامبوا ۲۰۱۹؛ ووبنه و همکاران ۲۰۲۳). این شاخص به‌وسیلهٔ نال‌بانته و تساکیریس (۲۰۰۹) برای توصیف خشک‌سالی آب‌شناختی ارائه شد. شاخص SRI با محاسبهٔ حجم جریان ماهانه این قابلیت را دارد که کمبود تأمین آب در بازه‌های زمانی گوناگون را محاسبه کند (بوداد و همکاران ۲۰۱۸). در این پژوهش شاخص SRI در زمان‌های مرجع گوناگون q در سال آب‌شناختی n با استفاده از رابطهٔ ۵ محاسبه شد.

$$SRI = \frac{V_{nq} - V_{qm}}{\sigma} \quad (5)$$

$V_{qm}$ : میانگین رواناب (ماهانه، فصلی یا سالانه (میلی‌متر))،  $\sigma$ : انحراف استاندارد رواناب،  $V_{nq}$ : رواناب (ماهانه، فصلی و سالانه (میلی‌متر)) است (بوداد و همکاران ۲۰۱۸).

#### شاخص تغذیه آب‌زیرزمینی استاندارد (SGRI)

این شاخص بر اساس شاخص SPI تدوین شده است و محاسبهٔ این شاخص بر اساس تبدیل نمرهٔ بهنجار ناسنجه‌ای برای هر ماه از میانگین سطح آب زیرزمینی است (بلوم‌فیلد و مارچنت ۲۰۱۳). این شاخص به‌دلیل سادگی و انعطاف‌پذیری در مقیاس‌های زمانی گوناگون در مقایسه با دیگر شاخص‌ها کارایی بیشتری دارد. این شاخص بر اساس علامت SGRI به دورهٔ خشک‌سالی و ترسالی طبقه‌بندی می‌شود و شدت خشک‌سالی براساس منفی بودن شاخص SGRI تفکیک می‌شود. در این پژوهش برای محاسبهٔ تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی از این شاخص استفاده شد. این شاخص در دسته‌هایی با سری زمانی مشابه سازمان‌دهی شد و برای تشکیل یک سری زمانی پیوسته، ترکیب شد و نتایج آن با شاخص SPI، RDI و SRI بررسی شد. سرانجام، همبستگی میان SGRI، RDI، SPI و SRI در آبخیز در مقیاس‌های زمانی (ماهانه، فصلی و سالانه) تجزیه و تحلیل شد.

$$SGRI = \left( \frac{GW_i - GW_m}{\sigma} \right) \quad (6)$$

باران‌سنج دوم و مشاهده ژام (میلی‌متر) است (تساکیریس و ونجلیس ۲۰۰۵).  
برای طبقه‌بندی آب و هوا با توجه به معیار (مک‌کی و همکاران ۱۹۹۳)، SPI، SRI، SGRI و RDI به هفت سطح تقسیم شد (جدول ۲).

$$RDI = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{P_{ij}}{PET_{IJ}} \right) \quad (7)$$

PET<sub>IJ</sub>: تبخیر بالقوه فصلی در ایستگاه باران‌سنج و مشاهده ژام (میلی‌متر)، P<sub>ij</sub>: بارش فصلی در ایستگاه

جدول ۲- طبقه‌بندی آب و هوا بر اساس اندازه‌های SPI، SRI و SGRI (مک‌کی و همکاران ۱۹۹۳).  
Table 2- Climate classification based on SPI, SRI and SGRI values (McKay et al., 1993).

Classification of drought	Index value
Extremely wet (EW)	>2
Very wet (VW)	1.99-1.5
Moderately wet (MW)	1.49-1
Near normal (NN)	99.0 to- 0.99
Moderate drought (MD)	-1 to -1.49
Severe drought (SD)	-1.5 to -1.99
Extreme drought (ED)	-2<

اندازه‌های متغیر X می‌تواند هریک از شاخص‌های DRI، RI، SPI و SGRI باشد و براساس نوع شاخص روند آن سنجه تعیین می‌شود.  
سری زمانی X<sub>i</sub> از n، 1، 2، ...، n از X<sub>j</sub> از j = i + 1 ... n است. در این پژوهش آمار آزمون بهنجار شده با استفاده از معادله ۱۰ محاسبه شد.

$$Z_c = \left\{ \begin{array}{l} \frac{s-1}{\sqrt{Var(s)}} \cdot S \leq 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{Var(s)}} \cdot S > 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

Z<sub>c</sub>: آزمون آماری است و وقتی  $|Z_c| > Z_{1-\alpha/2}$  باشد، که در آن  $Z_{1-\alpha/2}$  متغیرهای بهنجار استاندارد و  $\alpha$  اهمیت است. سطح برای آزمون، H<sub>0</sub> رد خواهد شد. اندازه روند به شکل زیر آورده شده است.

$$Var(s) = \frac{m(-1)(2m+5) - \sum_{k=1}^m k_1(k_1-1)(2k_1+5)}{18} \quad (11)$$

Var(s): واریانس، m: اندازه سری‌های زمانی SPI، SRI و SGRI، k<sub>i</sub>: پیوندهای میان سری‌های زمانی نمونه هستند (پین‌گال و همکاران ۲۰۱۶: مان ۱۹۴۵).

ب- روش برآوردگر شیب سن  
برآوردگر Theil-Sen estimator (SS) در ارزیابی بزرگی روند در مقایسه با روش‌های وایزی خطی قدرتمندتر عمل می‌کند، زیرا تحت تأثیر اندازه‌های

تحلیل روند الگوی زمانی خشک‌سالی

الف- روش آزمون من-کندال

برای شناسایی الگوهای جریان و بارندگی از روش‌های گوناگونی مانند رویکردهای آماری و آزمون‌های مبتنی بر رتبه استفاده می‌شود (پین‌گال و همکاران ۲۰۱۶).  
روش‌های آماری شامل آزمون‌های مبتنی بر شیب، وایزی خطی حداقل مربعات، برآوردگر شیب سن و آزمون‌های مبتنی بر رتبه مانند آزمون من-کندال (MK) هستند (پین‌گال و همکاران ۲۰۱۶: مان ۱۹۴۵).  
در این پژوهش از آزمون من-کندال برای تشخیص روند الگوی پدیده خشک‌سالی (خشک‌سالی هواشناسی، آب‌شناختی) روی تغذیه سفره آب زیرزمینی در سطح اعتماد ۹۵٪ بر اساس ارزش توالی‌های زمانی DRI، SRI، SPI و SGRI استفاده شد.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(X_j - X_i) \quad (8)$$

$$\text{sgn}(X_k - X_i) = \begin{cases} 1. \text{if}(X_j - X_i) > 0 \\ 0. \text{if}(X_j - X_i) = 0 \\ -1. \text{if}(X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

شاخص SRI (اثرات بارش و رواناب) و شاخص SGRI (اثرات تغذیه سفره آب زیرزمینی) بررسی شد.

### نتایج و بحث

#### تحلیل حساسیت سنج‌های مؤثر بر رواناب

بررسی نتایج آزمون حساسیت بر اساس اندازه‌های  $t$ -stat به‌دست آمده برای هر سنج نشان داد بیشترین اندازه حساسیت مربوط به سنج‌های شماره منحنی (CN<sub>2</sub>)، میانگین طول شیب (SLSUBBSN)، ضریب زبری کانال مانینگ (CH\_N<sub>2</sub>)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (SOL\_K)، ژرفای خاک از لایه سطحی تا لایه زیرین خاک (SOL\_Z)، ضریب جریان پایه آلفا (ALPHA\_BF) فرآیندهای حداقل ژرفای لازم سطح ایستابی در سفره‌های کم‌ژرفا برای رخداد جریان بازگشتی (GWQMN)، عامل جبران‌کننده تبخیر از خاک (ESCO)، ضریب مانینگ برای جریان روی سطح زمین (OV\_N)، بود. سنج‌های CN<sub>2</sub>، SOL\_K، SOL\_Z و OV\_N، در تولید رواناب سطحی، GWQMN و ALPHA\_BF بر حرکت زیرسطحی آب و ESCO بر تبخیر و تعرق مؤثر بودند. در این راستا، هرسی و همکاران (۲۰۲۳) نیز سنج‌های مشابهی را در تحلیل حساسیت رواناب با مدل SWAT گزارش کردند.

#### واسنجی و اعتبارسنجی رواناب

پس از شناسایی سنج‌های حساس، واسنجی مدل SWAT با اجرای ۲۵۰۰ بار در چندین مرحله تنظیم شد و اجرای آن به تکرارهای چندگانه تقسیم شد. نتایج مدل بر اساس معیارهای ارزیابی در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی جریان نسبتاً خوب ارزیابی شد. نتایج ضریب‌های کارایی مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۳ نشان داده شده است.

بزرگ نیست (سن ۱۹۶۸). بر اساس مشاهده‌های  $X_1, X_2, \dots, X_n$  بارندگی در زمان‌های  $t_1, t_2, \dots, t_n$  با  $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$ ، برای هر  $N$  جفت مشاهده  $X_i$  و  $X_j$  که در زمان‌های  $t_j$  و  $t_i$  بودند، شیب  $Q_k$  با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه شد.

$$Q_k = \frac{X_j - X_i}{t_j - t_i} \quad (12)$$

for  $K = 1, \dots, N$   
( $1 \leq i \leq j \leq n$ ) and  $t_1 \leq t_2$ .

برآورد روندها در گروه داده‌های  $X_1, X_2, \dots, X_n$  را می‌توان به‌عنوان  $Q_{med}$  شیب میانه  $N$  با استفاده از اندازه‌های شیب  $Q_k$  که از کوچک‌ترین به بزرگ‌ترین رتبه‌بندی می‌شود، محاسبه کرد.

$$Q_{med} = \begin{cases} Q_{[N+1/2]} & \text{if N is odd} \\ Q_{[N/2]} + Q_{[N+2/2]}/2 & \text{if N is even} \end{cases} \quad (13)$$

$$Q_{med} = \begin{cases} Q_{[N+1/2]} & \text{if N is odd} \\ Q_{[N/2]} + Q_{[N+2/2]}/2 & \text{if N is even} \end{cases} \quad (14)$$

$Q_{med}$  نشان‌دهنده روند است و اندازه آن بزرگی روند را نشان می‌دهد (سن ۱۹۶۸).

#### شناسایی ارتباط متغیرهای اقلیمی روی تغذیه آبخوان‌ها

تغییرات متغیرهای اقلیمی بارش و دما در یک دوره ۳۰ ساله بررسی شد. افزون بر این، رواناب و تبخیر-تعرق در دوره زمانی (۲۰۱۸-۲۰۱۰) با رخداد‌های خشک‌سالی و ترسالی در مقیاس‌های زمانی گوناگون (ماهانه، فصلی و سالانه) نیز بررسی شد. با استفاده از روش همبستگی پیرسون ارتباط این متغیرها با تغذیه سفره‌های آب‌زیرزمینی تعیین شد. اثرات خشک‌سالی روی این متغیرها و روی تغذیه سفره‌های آب‌زیرزمینی با استفاده از شاخص RDI (اثرات تبخیر-تعرق)، شاخص SPI و

جدول ۳- نتایج ضریب‌های کارایی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی.

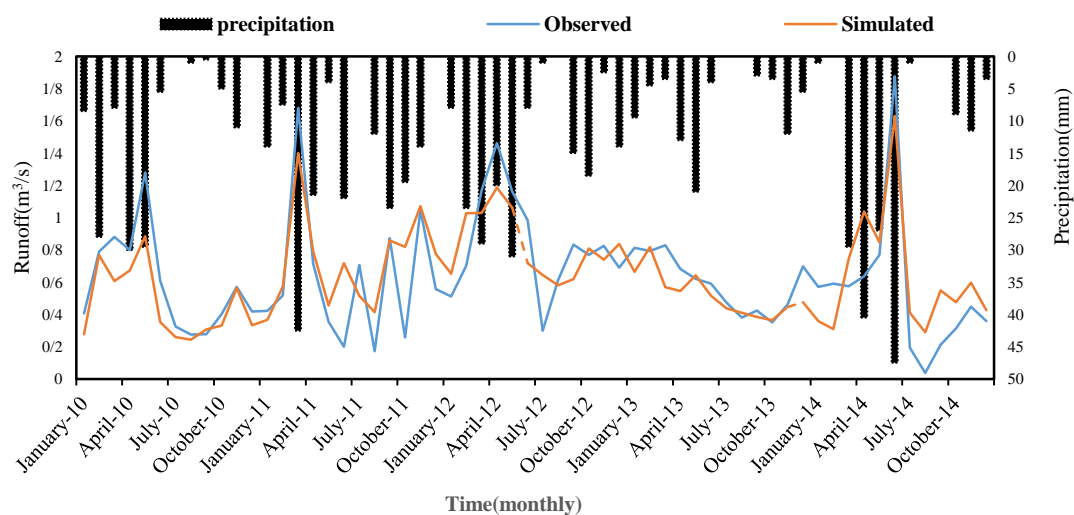
Table 3- The results of efficiency coefficients in the calibration and validation period.

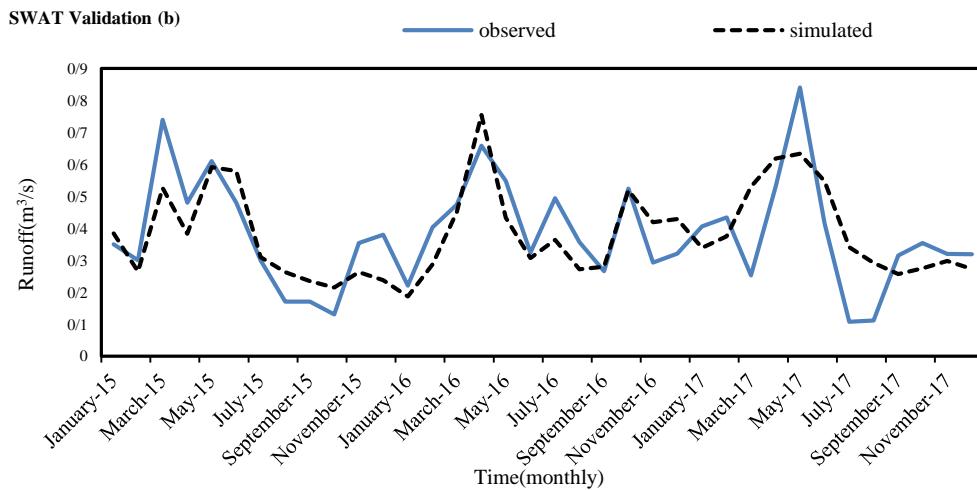
Statistical indicators	Calibration	validation
Nash-Sutcliffe coefficient	0.69	0.77
Coefficient of explanation	0.74	0.79
PBIAS	9.9	9.2
Average annual precipitation	150	130
Runoff standard deviation	0.21	0.14
Standard deviation of precipitation	12.1	10.72

سال‌های خشک دانست (عباس‌پور و همکاران ۲۰۰۷). زیرا جریان رواناب در سال‌های خشک و کم‌باران در اکثر شرایط اندک بود و اصولاً وضعیت جریان گسسته بود و فقط برای بارش‌های با اندازه‌های زیاد، جریان رواناب به شکل پیوسته بود. در حالی‌که در سال‌های مرطوب پیوستگی وضعیت جریان برای شبیه‌سازی جریان رواناب کافی بود. از این‌رو، در سال‌های مرطوب مدل عملکرد بهتری نشان داد. در این راستا علی‌زاده (۲۰۱۳) و خسروی و همکاران (۲۰۲۰) نتایج مشابهی از واسنجی مدل در سال‌های مرطوب و خشک گزارش کرده‌اند. تغییرات الگوی زمانی تغذیه آب‌های زیرزمینی در مقیاس ماهانه در شکل ۶ ارائه شده است.

اندازه‌های رواناب ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که بر اساس بارش، مدل توانست رخداد اندازه‌های بیشترین رواناب را به خوبی شبیه‌سازی کند و این موضوع نشان‌دهنده توانایی مدل در اصلاح اندازه‌های نفوذ متناسب با آب در دسترس در کل نیم‌رخ خاک است. همچنین، بر پایه شکل ۴ شبیه‌سازی اندازه‌های رواناب در سال‌های ۲۰۱۱، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۴ با اندازه‌های بارش به ترتیب ۲۱۰، ۱۵۲ و ۱۷۰ میلی‌متر به دست آمد که در مقایسه با اندازه بارش عادی (۱۵۰ میلی‌متر) بهتر بود. یکی از دلایل آن را می‌توان پیوستگی جریان در سال‌های مرطوب در مقایسه با

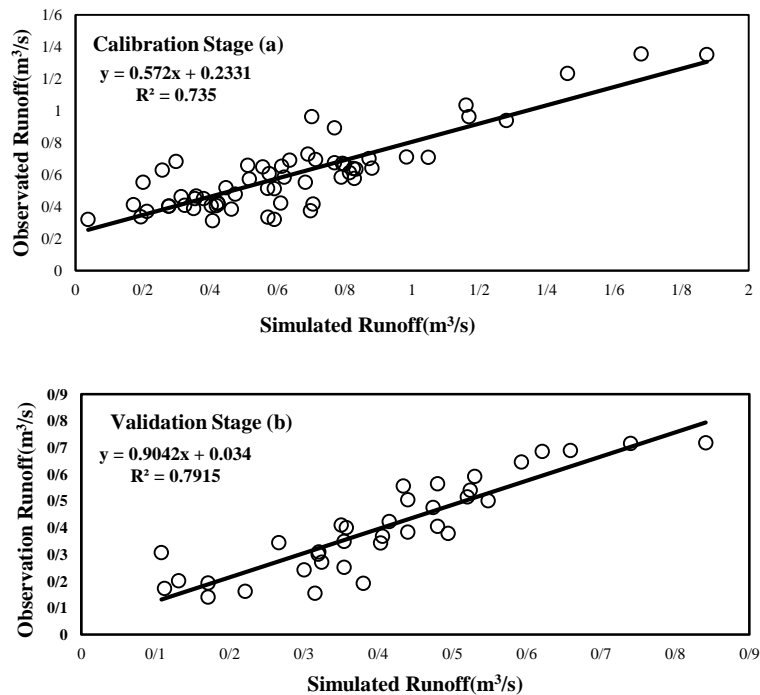
SWAT Calibration (a)





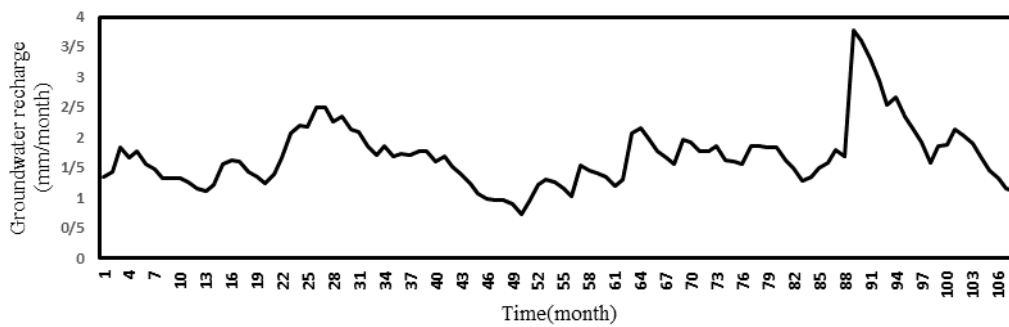
شکل ۴- اندازه‌های رواناب ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با بارش هم‌زمان با آن در دوره‌های واسنجی (الف)، اعتبارسنجی (ب).

Figure 4- Observed and simulated monthly runoff values with concurrent rainfall during the calibration periods(a), and validation period(b).



شکل ۵- همبستگی و اندازه‌های ضریب‌های تبیین میان اندازه‌های رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مدل SWAT در مرحلهٔ واسنجی (الف) و اعتبارسنجی (ب).

Figure 5- Correlation and the values of explanatory coefficients between observed and simulated runoff values in the SWAT model in the calibration periods(a) and validation periods(b).



شکل ۶- الگوی زمانی تغذیه ماهانه آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در دوره زمانی مطالعه‌شده.

Figure 6- Time pattern of monthly groundwater recharge simulated in the SWAT model in the calibration and validation periods.

دما و بارش نیز با اندازه‌های همبستگی به ترتیب ۱۵٪ و ۱۰٪ در درجات بعدی اهمیت تأثیر بر تغذیه آبخوان‌ها بودند. ارتباط میان بارش و رواناب مستقیم و تبخیر تعرق و دما معکوس بود. ضریب همبستگی پیرسون میان متغیرهای اقلیمی و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی در جدول ۴ نشان داده شده است.

شناسایی ارتباط سنج‌های اقلیمی با تغذیه آبخوان‌ها برای تعیین ارتباط میان متغیرهای بارش، رواناب، دما و تبخیر تعرق با تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. نتایج نشان داد جریان‌های سطحی با همبستگی حدود ۴۵٪ بیشترین تأثیر را بر تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی داشتند و تبخیر تعرق با همبستگی ۳۰٪ در درجه دوم اهمیت بود.

جدول ۴- ضریب همبستگی پیرسون میان متغیرهای اقلیمی و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی.

Table 4- Pearson's correlation coefficient between climate variables and underground water.

climate variable	Pearson's correlation coefficient
Precipitation	10%
Runoff	45%
Temperature	15%
Evaporation	30%

و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند ویژگی‌های دما و تبخیر، محرک‌های اصلی در ایجاد روند خشک‌سالی بود و سبب تغییرات بیشتر بارندگی در فصل مرطوب (فصل بارش) در مقایسه با فصل‌های خشک شدند. فورماتا و پیانوسی (۲۰۲۰) گزارش دادند که افزایش فراوانی و شدت خشک‌سالی‌ها باعث کاهش قابل توجهی در اندازه تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی شد. نتایج تحلیل روند داده‌های جریان سطحی نشان داد که روند این متغیر در سطح ماهانه معنی‌دار نبود. در فصل بهار اندازه‌های رواناب افزایش یافت و در فصل زمستان و پاییز کاهش یافت که با توجه به اندازه‌های بارش قابل انتظار بود. از این رو، اندازه‌های رواناب آبخیز می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر خشک‌سالی روی فرایندهای آب‌شناختی آبخیز

الگوی زمانی متغیرهای اقلیمی در سطوح ماهانه، فصلی

نتایج بررسی روند رواناب، بارش، دما و تبخیر تعرق و تغذیه آبخوان‌ها با استفاده از آزمون من-کندال نشان داد در گروه داده‌های بارش ماهانه در سطح اطمینان ۹۵٪، روند معنی‌داری مشاهده نشد. روند بارش در فصل‌های پاییز و زمستان کاهشی بود. بیشترین کاهش بارش در فصل پاییز با ۳۰٪ و کمترین کاهش بارش در فصل زمستان با ۱۰٪ مشاهده شد. دلیل روند کاهش بیشتر بارش در فصل پاییز در مقایسه با فصل زمستان می‌تواند به سبب تأثیر بلندمدت افزایش دما در فصل گرم باشد که سبب کاهش بیشتر بارش در فصل پاییز شد. در این راستا سماواتی و همکاران (۲۰۲۳)، آچیت

کمیود آبی (خشک‌سالی) در فصل‌های خشک در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شود. این یافته‌ها نشان‌دهندهٔ این است که واکنش فصل‌های خشک در مقایسه با فصل‌های مرطوب در برابر تغییرات تبخیرتغرق شدیدتر است. احمدی و همکاران (۲۰۲۳) در بررسی روند ماهانه تبخیرتغرق در ایران گزارش کردند در مناطق خشک و مرکزی ایران به سبب کمیود بارندگی، نیاز آبی گیاهان افزایش یافت که شدت افزایش آن در فصل‌های خشک بیشتر بود.

### تعیین تأثیر خشک‌سالی روی الگوی زمانی ماهانه و فصلی تغذیهٔ آبخوان‌ها

نتایج بررسی متغیرهای اقلیمی تحت تأثیر خشک‌سالی (کاهش بارش و جریان‌های سطحی و افزایش دما و تبخیرتغرق) روی افت تغذیهٔ آبخوان‌ها نشان داد در مقیاس ماهانه میان تغییرات متغیرهای اقلیمی تحت خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناختی و تغذیهٔ سفره‌های آب‌زیرزمینی روند معنی‌داری وجود نداشت. فروتن و گلپایگانی (۲۰۲۰) نتایج مشابهی را در بررسی تأثیر متغیرهای اقلیمی روی افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی گزارش کردند. در مقیاس فصلی روند افت تغذیهٔ آبخوان در فصل‌های زمستان، بهار و تابستان افزایشی بود که دلیل آن می‌تواند تأثیر کاهش بارش و رواناب و افزایش دما و تبخیرتغرق باشد. بیشترین افت تغذیهٔ آبخوان در فصل تابستان و بهار مشاهده شد که دلیل آن می‌تواند تأثیر افزایشی دما و تبخیرتغرق و برداشت بی‌رویه از این منابع برای مصارف کشاورزی و آب شرب در فصل‌های تابستان و بهار باشد. باراتی و مصلح‌زاده (۲۰۱۹) تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی ایران بررسی کردند و دریافتند که اثر افزایشی دما و کاهش بارندگی بر تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی کاهشی بود و مشکلات کم‌آبی را تشدید کرد. اندازه‌های Z به دست‌آمده با روش MK و اندازه‌های SS برای متغیرهای بارش، رواناب و آب زیرزمینی در جدول ۵ نشان‌دهنده شده است.

به‌طور کلی، در آبخیز بررسی‌شده، در فصل‌های بارش روند متغیرهای بارش و رواناب کاهشی بود و روند متغیرهای دما و تبخیرتغرق افزایشی بود که این رخداد

باشد. در این راستا بای و همکاران (۲۰۲۳) نتایج مشابهی را از تغییرات فصلی آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر عامل‌های اقلیمی و پوشش گیاهی در نواحی خشک گزارش کرده‌اند.

نتایج روندیابی دما روی تغذیهٔ آبخوان‌ها با استفاده از آزمون من-کندال نشان داد در گروه داده‌های دمای ماهانه در سطح اطمینان ۹۵٪، روند معنی‌داری مشاهده نشد. روند دما در تمام فصل‌های سال افزایشی بود، به‌طوری‌که بیشترین افزایش دما در فصل تابستان و کمترین افزایش دما در فصل بهار مشاهده شد. تغییرات افزایش دما از فصل زمستان شروع شد که به نظر می‌رسد سبب کاهش بارش‌های زمستان و شاید جابه‌جایی بارش به فصل بهار شده است که این موضوع نشان‌دهندهٔ ارتباط نزدیک میان متغیرهای دما و بارش است. در این راستا سماواتی و همکاران (۲۰۲۳)، قفوسه و گروسی (۲۰۲۴)، نتایج مشابهی را از تأثیر افزایشی دما در فصل‌های پاییز و تابستان در مقایسه با فصل‌های بهار و زمستان گزارش کرده‌اند. بای و همکاران (۲۰۲۳) دریافتند که افزایش دما و تغییر الگوهای بارندگی به‌طور قابل توجهی بر تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار بود و تغذیهٔ آب زیرزمینی را کاهش داد.

نتایج روندیابی تبخیرتغرق روی تغذیهٔ آبخوان‌ها با استفاده از آزمون من-کندال نشان داد در گروه داده‌های تبخیرتغرق ماهانه در سطح اطمینان ۹۵٪، روند معنی‌داری مشاهده نشد. بررسی نتایج نشان داد روند معنی‌داری در سطح ماهانه میان متغیرهای اقلیمی و افت سفره‌های آب زیرزمینی مشاهده نشد. روند تبخیرتغرق در فصل‌های تابستان، بهار و پاییز افزایشی بود. بیشترین روند افزایشی تبخیرتغرق در فصل تابستان (۲۵٪) مشاهده شد که با توجه به کم بودن اندازهٔ بارش و زیاد بودن دما می‌تواند سبب کاهش بیشتر منابع آبخوان شده باشد. کمترین افزایش تبخیرتغرق ۱۰٪ و در فصل بهار مشاهده شد که با توجه به اندازه‌های زیاد بارش و اندازه‌های کم دما، سبب نوسانات کمتری در منابع آبخوان شد. می‌توان گفت روند افزایشی دما و تبخیرتغرق در فصل‌های خشک در مقایسه با فصل‌های مرطوب می‌تواند سبب تشدید اثر

می‌تواند سبب خشک‌سالی هواشناسی، آب‌شناختی و افت تغذیه آبخوان شده باشد. در پژوهشی هولز و همکاران (۲۰۰۱) گزارش کردند که کمیت آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر تغییرات متغیرهای اقلیمی (دوره‌های خشک و مرطوب) تغییر کرد. در این راستا، بای و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی تأیید کردند و افزایش دما و تغییر الگوهای بارندگی را به عنوان ویژگی مؤثر بر کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی معرفی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد با استفاده از مدل آب‌شناختی SWAT و روش‌های آماری مانند آزمون من-کندال، نشان‌دهنده ارتباط نزدیک میان متغیرهای اقلیمی (بارش، دما و تبخیر/تعرق) و روند تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی است.

یافته‌های این پژوهش نشان داد که جریان‌های سطحی بیشترین تأثیر را بر تغذیه آبخوان‌ها داشتند و متغیرهای تبخیر/تعرق، دما و بارش به ترتیب بیشترین اهمیت را در این روند داشتند. همچنین، افزایش دما و تبخیر/تعرق در فصل‌های خشک، خشک‌سالی‌ها را تشدید کرد و در فصل‌های مرطوب نیز تأثیر بیشتری بر بارندگی داشت. در این راستا سماواتی و همکاران (۲۰۲۳) دما و تبخیر/تعرق را به عنوان محرک‌های اصلی خشک‌سالی معرفی کردند. آپیت و همکاران (۲۰۲۳) نیز گزارش کردند افزایش دما و تبخیر/تعرق در فصل‌های خشک، خشک‌سالی‌ها را تشدید کرد و تأثیر بیشتری بر بارندگی در فصل‌های مرطوب داشت. این نتایج با یافته‌های این پژوهش هماهنگی دارد. باراتی و مصلح‌زاده (۲۰۱۹) دریافته‌اند که در مقیاس ماهانه، ارتباط خاصی میان متغیرهای اقلیمی و خشک‌سالی وجود نداشت، اما در مقیاس فصلی، افزایش رخداد خشک‌سالی و افت تغذیه آبخوان‌ها را سبب شد. نتایج پژوهش فورمنتا و پیانوسی (۲۰۲۰) نشان داد که افزایش فراوانی و شدت خشک‌سالی‌ها باعث کاهش قابل توجهی در اندازه تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی شد. یافته‌های تیلر و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان داد که تغییرات اقلیمی بر تغذیه سفره‌های آب‌های زیرزمینی در مقیاس فصلی و منطقه‌ای مؤثر بود.

بای و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که تغییرات فصلی در منابع آب زیرزمینی تحت تأثیر عامل‌های اقلیمی و پوشش گیاهی در نواحی خشک بود. این پژوهش نشان داد که روند افزایشی دما و تبخیر/تعرق در فصل‌های خشک در مقایسه با فصل‌های مرطوب، باعث تشدید اثر کمبود آبی (خشک‌سالی) در مناطق خشک و نیمه‌خشک شد. یافته‌های احمدی و همکاران (۲۰۲۳) نیز نشان داد که نیاز آبی گیاهان در فصل‌های خشک به دلیل کمبود بارش افزایش یافت. یافته‌های داوامانی و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که در مناطق نیمه‌خشک، کاهش بارش و افزایش تبخیر/تعرق باعث کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی شد. نتایج پژوهش‌های بای و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که تغییرات در الگوی بارندگی و افزایش دما، منجر به کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی شد. برگویجس و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که با افزایش خشکی، نرخ‌های تغذیه آب‌های زیرزمینی به‌طور چشمگیری تغییر یافت و بر دسترسی به آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار بود. اسدی و همکاران (۲۰۲۲) دریافته‌اند که تغییرات بارندگی و افزایش دما باعث کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی شد. لی و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر افزایش دما و تغییر الگوهای بارندگی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی را بررسی کردند و گزارش کردند که این عامل‌ها به‌طور قابل توجهی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار بودند و سبب کاهش آن شدند. یافته‌های این پژوهش با نتایج فروتن و گلپایگانی (۲۰۲۰) که تأثیر متغیرهای اقلیمی بر افت تغذیه آبخوان‌ها را بررسی کردند، هم‌راستا است. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات الگوی زمانی تغذیه آبخوان‌ها تحت تأثیر متغیرهای اقلیمی بود و اندازه این تغییرات بستگی به همبستگی این متغیرها دارد. این یافته‌ها می‌تواند در بهبود برنامه‌ریزی برای مصرف بهینه منابع آب و حفاظت از منابع در مناطق خشک و نیمه‌خشک مؤثر باشد. برای مدیریت پایدار منابع آب در مواجهه با تغییرات اقلیمی، شناسایی دقیق روند تغذیه آبخوان‌ها و استفاده از مدل‌های آب‌شناختی و روش‌های آماری ضروری است.



جدول ۵- اندازه‌های Z به‌دست‌آمده با روش MK و اندازه‌های SS برای متغیرهای بارش، رواناب و آب زیرزمینی.  
Table 5- Z values obtained by MK method and SS values for precipitation, runoff and underground water variables.

season	Period	Z(MK)	SS	Period	Z(MK)	SS	Period	Z(MK)	SS
Winter	Precipitation	-0.04	-0.157	Run	-0.17	-0.18	Ground	-0.04	-1.74
Spring		-0.05	-0.34	off	-0.046	-0.275	water	-0.03	-5.43
Summer		-0.15	-0.3		-0.15	-0.21		-0.05	-5.34
Auntum		-0.02	-0.38		-0.074	-0.25		-0.16	-3.83

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تبخیرتعرق به‌ویژه در فصل‌های بارش، منجر به افزایش خشک‌سالی و افت تغذیهٔ آبخوان‌ها شد. روند کاهش بارش و رواناب در فصل‌های مرطوب بیشتر از روند افزایشی دما و تبخیرتعرق در فصل‌های خشک بود. نتایج این پژوهش نشان داد تغییرات الگوی زمانی تغذیهٔ آبخوان‌ها تحت تأثیر متغیرهای گوناگون اقلیمی بود و اندازهٔ این تغییرات بر اساس همبستگی این متغیرها بود. از این نتایج می‌توان در بهبود برنامه‌ریزی برای مصرف بهینه منابع آب و حفاظت از منابع موجود در مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده کرد. مدیریت پایدار منابع آب با شناسایی روند تغذیهٔ آبخوان‌ها و برنامه‌ریزی دقیق در مصرف منابع آبی امکان‌پذیر است. پیشنهاد می‌شود برای بهبود تغذیهٔ آبخوان‌ها و کاهش اثرات خشک‌سالی، برنامه‌ریزی جامع و مدیریت بهینه منابع آب در دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی انجام شود. در دوره‌های ترسالی، می‌توان با ذخیره‌سازی بهینه منابع آب زیرزمینی، بهره‌برداری مؤثری از آب‌ها داشت، در حالی که در دوره‌های خشک‌سالی، باید اقدامات حفاظتی مانند محدود کردن مصرف آب و استفاده از روش‌های مدیریت منابع آب برای کاهش افت تغذیهٔ آبخوان‌ها اجرا شود. همچنین، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و تقویت نظارت و پایش منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ضروری است تا به‌موقع از کاهش غیرمنتظره تغذیهٔ آبخوان‌ها جلوگیری شود.

نتایج این پژوهش نشان داد خشک‌سالی‌های هواشناسی و آب‌شناختی تأثیر چشم‌گیری بر تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی دارند و این تأثیر به متغیرهای اقلیمی گوناگون مانند بارش، دما و تبخیرتعرق بستگی دارد. با استفاده از مدل آب‌شناختی SWAT و شاخص‌های پایش خشک‌سالی، مشخص شد که جریان‌های سطحی با همبستگی ۴۵٪ بیشترین تأثیر را بر تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی داشتند. تبخیرتعرق، دما و بارش به‌ترتیب با ۳۰٪، ۱۵٪ و ۱۰٪ در درجات بعدی اهمیت بودند. ارتباط میان تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی با بارش و جریان‌های سطحی مستقیم بود و با دما و تبخیرتعرق معکوس بود. در سطح ماهانه، متغیرهای اقلیمی ارتباط خاصی با پدیده خشک‌سالی نشان ندادند. اما در فصل‌های گوناگون، کاهش بارش و رواناب و افزایش دما و تبخیرتعرق نشان‌دهندهٔ افزایش رخداد خشک‌سالی در آبخیز بود. افزایش دما در تمام فصل‌ها نشان‌دهندهٔ اهمیت زیاد این متغیر در تشدید خشک‌سالی بود. در مقیاس ماهانه، روند خاصی میان متغیرهای اقلیمی و افت تغذیهٔ آبخوان‌ها مشاهده نشد. اما در فصل‌های زمستان، بهار و تابستان به‌دلیل تغییر نوع بارش و افزایش دما و تبخیرتعرق، روند افت تغذیهٔ آبخوان‌ها افزایشی بود. بیشترین تأثیر افزایش دما و تبخیرتعرق در افت تغذیهٔ آبخوان‌ها در فصل‌های تابستان و بهار مشاهده شد. کاهش بارش و رواناب و افزایش دما و

## مشارکت نویسندگان

مهین خسروی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری و آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله.  
محمد رضا یزدانی: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

## تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

## دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش، از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

## فهرست منابع

- Abbaspour, K. C. 2011. User manual for SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Eawag: Swiss Fed. Inst. of Aquat. Sci. and Technol., Duebendorf, Switzerland, 103 p.
- Abbaspour KC, Vejdani M, Haghightat S, Yang J. 2007. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. In MODSIM 2007 international congress on modeling and simulation, modeling and simulation society of Australia and New Zealand. 10(2): 1596-1602.
- Abdullahi, MG, Toriman ME, Gasim MB. 2015. The application of vertical electrical sounding (VES) for groundwater exploration in Tudun Wada Kano state, Nigeria. Journal of Geology and Geosciences. 4(01): 4-6.
- Achite M, Simsek O, Adarsh S, Hartani T, Caloiero T. 2023. Assessment and monitoring of meteorological and hydrological drought in semiarid regions: The Wadi Ouahrane basin case study (Algeria). Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 130, 103386. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103386>
- Ahmadi Karladani, M, Hezarjaribi, A, Ghorbani, K. 2023. Analysis of the Monthly Trend of Evapotranspiration Changes in Different Climates of Iran. Journal of Climate Research, 1402(53): 81-96.
- Alizadeh M, Yang S, Sharif M, Katti S, McKeown, N, Prabhakar B, Shenker S. 2013. pFabric: Minimal near-optimal datacenter transport. ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 43(4): 435-446. (In Persian).
- Allen DM, Whitfield PH, Werner A. 2010. Groundwater level responses in temperate mountainous terrain: regime classification, and linkages to climate and streamflow. Hydrological Processes. 24(23): 3392-3412.
- Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 34(1): 73-89.
- Asadi Zarch MA, Malekinezhad H, Mobin MH, Dastorani MT, Kousari MR. 2011. Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. Water Resources Management. 25: 3485-3504. (In Persian).
- Asadi MA, Jamnezhad F, Ekhtesasi MR, Hosseini SZ. 2022. Investigating the effects of drought and land-use changes on quantity and quality of groundwater resources: A case study of Darab plain. Desert Ecosystem Engineering. 9(28): 89-102. (In Persian).
- Bai Y, Guo Y, Wang H, Wang N, Wei X, Zhou M, ... Zhang Z. 2023. The Impact of Groundwater Burial Depth on the Vegetation of the Dariyabui Oasis in the Central Desert. Sustainability. 16(1): 351-378.
- Bailey RT, Wible TC, Arabi M, Records RM, Ditty J. 2016. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. Hydrological Processes. 30(23): 4420-4433.
- Banimahd SA, Khalili D. 2013. Factors influencing Markov chains predictability characteristics, utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI drought indices in different climatic zones. Water resources management, 27: 3911-3928.
- Barker LJ, Hannaford J, Chiverton A, Svensson C. 2016. From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. Hydrology and Earth System Sciences. 20(6): 2483-2505.
- Barman J, Biswas B, Soren DDL. 2023. Groundwater trend analysis and regional groundwater drought assessment of a semi-arid

region of Rajasthan, India. *Environment, Development and Sustainability*. pp. 1-25.

Barati R, Mesbahzadeh N. 2019. Evaluating the impact of climate change on groundwater resources in the Middle East: A case study from Iran. *Journal of Climate Change and Water Resources*. 15(3): 210-225.

Bazrafshan O, Mahmoudzadeh F, Asgarinezhad A, Bazrafshan J, Author - Corresponding, Professor A. 2019. Adaptive evaluation of SPI, RDI, and SPEI indices in analyzing the trend of intensity, duration, and frequency of drought in Arid and Semi-Arid Regions of Iran. *Irrigation Sciences and Engineering*. 42(3):117-131. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.22113.1585>

Berghuijs WR, Van den Hurk BJM. 2024. Impacts of increasing drought on groundwater recharge rates: a global assessment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. pp. 1-31.

Bloomfield JP, Marchant BP. 2013. Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences*. 17(12): 4769-4787.

Boudad N, Faizi R, Thami ROH, Chiheb R. 2018. Sentiment analysis in Arabic: A review of the literature. *Ain Shams Engineering Journal*. 9(4): 2479-2490.

Bouwer H. 2000. Integrated water management: emerging issues and challenges. *Agricultural Water Management*. 45(3): 217-228.

Bucton BGB, Shrestha S, Saurav KC, Mohanasundaram S, Virdis SG, Chaowiwat W. 2022. Impacts of climate and land use change on groundwater recharge under shared socioeconomic pathways: A case of Siem Reap, Cambodia. *Environmental Research*, 211, 113070. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113070>

Busico G, Ntona MM, Carvalho SC, Patrikaki O, Voudouris K, Kazakis N. 2021. Simulating future groundwater recharge in coastal and inland catchments. *Water Resources Management*. 35(11): 3617-3632.

Davamani V, John JE, Poornachandhra C, Gopalakrishnan B, Arulmani S, Parameswari E, ... Naidu R. 2024. A Critical Review of Climate Change Impacts on Groundwater Resources: A Focus on the Current Status, Future Possibilities, and Role of Simulation Models. *Atmosphere*. 15(1): 115- 122.

Faquseh H, Grossi G. 2024. Trend analysis of precipitation, temperature and snow water equivalent in Lombardy region, northern Italy. *Sustainable Water Resources Management*.

10(1): 1-14. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00992-2>

Forootan E, Golpaegani F. 2020. The Investigation of the relationship between groundwater level variation and drought index (Case study: Sharifabad Watershed in Qom Province). *Journal of Environmental Science and Technology*. 22 (596): 255-265 (In Persian).

Hachemaoui A, Elouissi A, Benzater B, Fellah S. 2022. Assessment of the hydrological impact of land use/cover changes in a semi-arid basin using the SWAT model (case of the Oued Saïda basin in western Algeria). *Modeling Earth Systems and Environment*. 8(4): 5611-5624.

Hersi NA, Mulungu DM, Nobert J. 2023. Groundwater recharge estimation under changing climate and land use scenarios in a data-scarce Bahi (Manyoni) catchment in Internal Drainage Basin (IDB), Tanzania using Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Groundwater for Sustainable Development*, 22(1), 100921-100957. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100957>

Jahangir MH, Yarahmadi Y. 2020. Hydrological drought analysis and monitoring by using the Streamflow Drought Index (SDI) (case study: Lorestan, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 1-12.

Jia X, Hou D, Wang L, O'Connor D, Luo J. 2020. The development of groundwater research in the past 40 years: A burgeoning trend in groundwater depletion and sustainable management. *Journal of Hydrology*, 587, 125006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125006>

Katipoğlu OM, Acar R, Şengül S. 2020. Comparison of meteorological indices for drought monitoring and evaluating: a case study from Euphrates basin, Turkey. *Journal of Water and Climate Change*. 11(S1): 29-43.

Khosravi M, Zolfaghari AA, Kabuli SH, Ghaffari H. 2022. Investigating the efficiency of the SWAT model in spatial runoff analysis in watersheds lacking local soil data (Case study: Damghanroud Watershed). *Applied Soil Research*. 10 (1): 129-143. (In Persian).

Li X, Wang J, Zhao Y. 2022. Assessment and Prediction of Groundwater using Geospatial Techniques. *Research Square*. Res. 48: 241-249. <https://www.researchsquare.com/article/rs-878665/v1>

Mann H. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13 245-259. Millly PCD, Dunne KA (2002) Macro scale water fluxes 2, water and energy supply control of their inter-annual variability. *Water Research*. 38(1): 241-249.

- Masupha MD, Machacha G. 2021. Evaluating the impact of climate change on groundwater recharge in Semi-Arid Regions: A case study of the Limpopo River Basin, South Africa. *Journal of Hydrology*. 590, pp. 125-138.
- Mengistu TD, Chung IM, Kim MG, Chang SW, Lee JE. 2022. Impacts and implications of land use land cover dynamics on groundwater recharge and surface runoff in East African Watershed. *Water*. 14(13): 2068.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. 17( 22): 179-183.
- Moccia B, Mineo C, Ridolfi E, Russo F, Napolitano F. 2022. SPI-based drought classification in Italy: influence of different probability distribution functions. *Water*. 14(22): 3659-3668.
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 50(3): 885-900.
- Moeck C, Brunner P, Hunkeler D. 2016. The influence of model structure on groundwater recharge rates in climate-change impact studies. *Hydrogeology Journal*. 24(5): 1169-1171.
- Muleta B, Seyoum T, Assefa S. 2022. GIS-based assessment of suitability area of rainwater harvesting in Daro Labu District, Oromia, Ethiopia. *American Journal of Water Science and Engineering*, 8(1): 21-35.
- Nalbantis I, Tsakiris G. 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *Water resources management*. 23: 881-897.
- Ndayiragije JM, Li F. 2022. Monitoring and analysis of drought characteristics based on climate change in Burundi using standardized precipitation evapotranspiration index. *Water*. 14(16): 2494-2511.
- Noori AR, Singh SK. 2024. Delineation of optimal locations for artificial groundwater recharge utilizing MIF and GIS in a semi-arid area. *Environmental Earth Sciences*. 83(1): 1-15. <https://doi.org/10.1007/S12665-023-11338-8/METRICS>
- Petersen-Perlman JD, Aguilar-Barajas I, Megdal, SB. 2022. Drought and groundwater management: Interconnections, challenges, and policy responses. *Current Opinion in Environmental Science and Health*. 28(1): 100349-100364.
- Pingale SM, Khare D, Jat MK, Adamowski J. 2016. Trend analysis of climatic variables in an arid and semi-arid region of the Ajmer District, Rajasthan, India. *Journal of Water and Land Development*. 28(1): 3-15.
- Rahimeh Javadian MN. 2018. Study of thermal comfort in adaptation of architecture to climatic conditions in Semnan city. *Journal of Application of Geographic Information Systems and Remote Sensing in Urban Planning*. 1(12): 74-92. (In Persian).
- Quinn NW, Oster JD. 2021. Innovations in Sustainable Groundwater and Salinity Management in California's San Joaquin Valley. *Sustainability*, 13(12): 6649-6658.
- Rwebugisa RA. 2008. Groundwater recharge assessment in the Makutupora basin, Dodoma Tanzania. *ITC*. 15(1):10-25.
- Sahu MK, Shwetha HR, Dwarakish GS. 2023. State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: A review. *Modeling Earth Systems and Environment*. 9(3): 3029-3051.
- Shah BA, Chatterjee S. 2021. Geospatial assessment of groundwater arsenic contamination in the Holocene aquifers of Bengal Delta from western parts of the Bhagirathi River in West Bengal, India. *Arabian Journal of Geosciences*. 14: 1-14.
- Said M, Hyandye C, Mjemah IC, Komakech HC, Munishi LK. 2021. Evaluation and prediction of the impacts of land cover change on hydrological processes in data constrained Southern slopes of Kilimanjaro, Tanzania. *Earth*. 2(2): 225-247.
- Samavati A, Babamiri O, Rezai Y, Heidarimozaffar M. 2023. Investigating the effects of climate change on future hydrological drought in mountainous basins using SWAT model based on CMIP5 model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 37(3): 849-875. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02319-7>
- Sandström K. 1995. Modeling the effects of rainfall variability on groundwater recharge in semi-arid Tanzania. *Hydrology Research*. 26(4-5): 313-330.
- Sen PK. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. 63(324): 1379-1389.
- Sivapragasam C, Kannabiran K, Karthik G, Raja S. 2015. Assessing Suitability of GP Modeling for Groundwater Level. *Aquatic Procedia*. 4 (December). pp. 693-699. <https://doi.org/10.1016/j.agpro.2015.02.089>
- Tareke KA, Awoke AG. 2022. Hydrological drought analysis using streamflow drought index (SDI) in Ethiopia. *Advances in Meteorology*. 2022(1): 7067900-7067951.
- Taylor RG, Scanlon B, Döll P, Rodell M, Van

Beek R, Wada Y, Treidel H. 2013. Ground water and climate change. *Nature Climate Change*. 3(4): 322-329.

Tigabu TB, Wagner PD, Hörmann G, Fohrer N. 2020. Modeling the spatio-temporal flow dynamics of groundwater-surface water interactions of the Lake Tana Basin, Upper Blue Nile, Ethiopia. *Hydrology Research*. 51(6): 1537-1559.

Tsakiris G, Vangelis HJEW. 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*. 9(10): 3-11.

Tularam GA, Krishna M. 2009. Long term consequences of groundwater pumping in Australia: A review of impacts around the globe. *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*, 4(2): 15-25.

Twisa S, Kazumba S, Kurian M, Buchroithner M. F. 2020. Evaluating and predicting the effects of land use changes on hydrology in Wami river basin, Tanzania. *Hydrology*. 7(1): 5-17.

Wang Y, Zheng C, Ma R. 2018. Safe and sustainable groundwater supply in China. *Hydrogeology Journal*. (5): 1301-1324.

Wang Y, Zhu S, Yuan L, Deng R. 2020. An automatic parameter calibration method for the SWAT model in runoff simulation. *River Research and Applications*. 36(7): 1321-1333.

Wambua RM. 2019. Hydrological drought forecasting using modified surface water supply

index (SWSI) and streamflow drought index (SDI) in conjunction with artificial neural networks (ANNs). *International Journal of Service Science, Management, Engineering and Technology (IJSSMET)*. 10(4): 39-57.

Wubneh MA, Alemu MG, Fekadie FT, Worku TA, Demamu MT, Aman TF. 2023. Meteorological and hydrological drought monitoring and trend analysis for selected gauged watersheds in the Lake Tana basin, Ethiopia: under future climate change impact scenario. *Scientific African*, 20, e01738. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01738>

Wu F, Zhan J, Chen J, He C, Zhang Q. 2015. Water yield variation due to forestry change in the head-water area of Heihe River Basin, northwest China. *Advances in Meteorology*. 2015(1): 786764. <https://doi.org/10.1155/2015/786764>

Yilmaz B. 2019. Analysis of hydrological drought trends in the GAP region (southeastern Turkey) by Mann-Kendall test and innovative sen method. *Applied Ecology and Environmental Research*. 17(2):57-67. [https://doi.org/10.15666/aeer/1702\\_33253342](https://doi.org/10.15666/aeer/1702_33253342)

Zarei AR, Shabani A, Mahmoudi MR. 2021. Susceptibility assessment of winter wheat, barley and rapeseed to drought using generalized estimating equations and cross-correlation function. *Environmental Processes*. 8: 163-197. (In Persian).



## Evaluating the Effect of Drought on the Temporal Recharge Pattern of Aquifers in the Damghanroud Watershed

Mahain Khosravi<sup>1</sup>, Mohammad Reza Yazdani<sup>\*2</sup>

1- Postdoc researcher, Department of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

2- Department of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

Groundwater is considered one of the most important sources for agriculture and drinking water supply, and it is significantly affected by environmental and climatic factors. Our limited understanding of hydrological processes, particularly groundwater resource, makes understanding the metrics and patterns affecting groundwater recharge essential for the optimize water resource management. Examining the temporal patterns of groundwater recharge provides a foundation for sustainable management of groundwater resources to mitigate the effects of drought on water supplies.

#### Materials and Methods

This study quantifies groundwater recharge from 2008 to 2018 using the SWAT model in the Damghanroud watershed located in Semnan Province. Calibration and validation of the model were performed using SWATCUP and the SUFI2 algorithm. The standardized precipitation index (SPI), the reconnaissance drought index (RDI), and the standardized runoff index (SRI) were used to assess the impacts of drought on aquifer recharge. The trend of aquifer recharge was analyzed using the Mann-Kendall non-parametric test and Sen's slope estimator method.

#### Results and Discussion

The analysis of the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient during the calibration (0.77) and validation (0.69) periods in the SWAT model showed that the model's performance in simulation groundwater was relatively good. The findings revealed that, on a monthly scale, the effects of drought on aquifer recharge did not show a specific trend; however, in the winter, spring, and summer seasons, there was an increasing trend in the decline of aquifer recharge. Reduced rainfall and runoff, coupled with increased temperature and evapotranspiration during rainy seasons, intensified drought conditions, leading to decreased groundwater recharge.

#### Conclusion and suggestions

Temporal analysis of aquifers revealed that in arid and semi-arid regions, climatic variable changes are closely linked with drought phenomena.

**Article Type:** Research Article

**\*Corresponding Author E-mail:** m\_yazdani@semnan.ac.ir

**Citation:** Khosravi, M., Yazdani, M.R. 2025. Evaluating the effect of drought on the temporal pattern of groundwater recharge in Damghanroud Watershed. Watershed Management Research. 38(1): 38-60.

**DOI:** 10.22092/wmrj.2024.365662.1585

**Received:** 05 May 2024, **Received in revised form:** 29 May 2024, **Accepted:** 21 September 2024

**Published online:** 21 March 2025

Watershed Management Research, Vol.38, No.1, Ser. No:146, Spring 2025, pp. 38-60.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center

©Author(s)



The results of this study show that the temporal pattern of aquifer recharge changed under the influence of various variable changes in the watershed, and the magnitude of these changes was based on the correlation of the variables. The trend analysis of droughts on aquifer recharge showed an increasing trend during wet periods and a decreasing trend during dry periods. These findings can be used to improve aquifer recharge during wet periods and to mitigate the effects of droughts on aquifer recharge through optimal management and planning of existing water resources. It is recommended to implement comprehensive planning and optimal management of water resources during both wet and dry periods to improve groundwater recharge and mitigate the effects of drought. Additionally, using climate change prediction models and strengthening monitoring of groundwater resources in arid and semi-arid areas is essential to prevent unexpected reductions in aquifer recharge in a timely manner.

**Keywords:** Groundwater, Mann-Kendall test, Drought index, SWAT model

**Article Type:** Research Article

**Conflicts of interest**

The authors of this article declare that they have no conflicts of interest regarding the writing and publication of the content and results of this research.

**Data Availability Statement**

The data and results used in this research will be made available upon request through correspondence with the corresponding author.

**Authors' Contribution**

Mahin Khosravi: Writing - original draft preparation

Mohammad Reza Yazdani: Resources, Software, Manuscript editing