

## Using Google Earth Engine in Monitoring and Trend Analysis of Hydrological Drought Time Series Based on SWSI Index in Western Sub-Basins of Lake Urmia

A. Ghorbanzade<sup>1\*</sup>, N. Mirhaji<sup>2</sup>, and H. Rezaie<sup>3</sup>

### Abstract

Drought as a natural phenomenon is one of the most important challenges in water supply, especially in arid and semi-arid climates such as Iran. In this study, the hydrological drought has been investigated in the western sub-basins of Lake Urmia using the Surface Water Supply Index (SWSI) from Oct. 2009 to Sep. 2019. For this purpose, annual precipitation data, snow water equivalent, surface runoff, and reservoir storage (or changes in groundwater storage) have been used. The methodology of the study is based on the SWSI index, remote sensing using Google Earth Engine, determining the snow cover area using the NDSI index, and analyzing the drought trend using the Mann-Kendall trend test. The results showed that according to the weights of the components obtained by the Analytic Hierarchy Process (AHP), precipitation is the most important factor in the study area in hydrological droughts. Also, according to the SWSI index, during the 10 water year period, wet, extreme drought, and severe drought conditions have not occurred in the study area and generally, in 54% of the cases near-normal conditions, in 19% of the cases incipient drought conditions prevail and in the next ranks are abundant and moderate drought conditions with respectively 14% and 13% incidence. Also, the wettest water year was from Oct. 2018 to Sep. 2019 and the driest water years were from Oct. 2016 to Sep. 2017 and from Oct. 2011 to Sep. 2012. In addition, in all studied sub basins except Zolachay, the near-normal hydrological condition was the most common condition during the study period. Also, the results of Mann-Kendall non-parametric trend test showed that only in the Baranduzchay and Rashkan-Talkhab sub basins, the trend of hydrological drought time series has been increasing (increasing humidity).

**Keywords:** Drought, Google Earth Engine, Mann-Kendall, NDSI Index, SWSI Index, Urmia Lake.

Received: May 3, 2022

Accepted: October 16, 2022

## استفاده از سامانه گوگل ارث انجین در پایش و تحلیل روند سری زمانی خشکسالی هیدرولوژیکی به ازای شاخص SWSI در زیرحوضه‌های غرب دریاچه ارومیه

رامین قربانزاده<sup>۱\*</sup>، ناهید میرحاجی<sup>۲</sup> و حسین رضائی<sup>۳</sup>

### چکیده

خشکسالی به عنوان یک پدیده طبیعی در مناطق مختلف به ویژه در مناطقی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک مانند ایران یکی از چالش‌های بسیار مهم در تأمین آب هست. در این مطالعه، خشکسالی هیدرولوژیکی در زیرحوضه‌های آبریز غرب دریاچه ارومیه به کمک شاخص تأمین آب‌های سطحی (SWSI) از سال آبی ۸۹-۸۸ تا سال آبی ۹۸-۹۷ (از اکتبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۹) بررسی شده است که در آن از داده‌های بارش، آب معادل برف، رواناب‌های سطحی و حجم مخازن سطحی (یا تغییرات حجم ذخایر آب زیرزمینی)، در مقیاس سالانه استفاده شده است. روش‌شناسی تحقیق مبتنی بر شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی SWSI، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در سامانه تحت وب گوگل ارث انجین، تعیین سطح پوشش برف با استفاده از شاخص NDSI و در نهایت تحلیل روند خشکسالی با استفاده از آزمون روند من-کندال است. نتایج حاصل از تعیین اوزان مؤلفه‌های فوق‌الذکر با استفاده از روش رتبه‌دهی سلسله مراتبی (AHP)، نشان داد که در زیرحوضه‌های مورد مطالعه، بارش مهمترین عامل در خشکسالی‌های هیدرولوژیکی است. همچنین، نتایج حاصل از شاخص SWSI، نشان داد که طی دوره آماری ۱۰ سال آبی مورد مطالعه، در هیچ یک از زیرحوضه‌های مورد مطالعه شرایط مرطوب، خشکسالی زیاد و خشکسالی شدید رخ نداده و بطور کلی در ۵۴ درصد موارد شرایط نزدیک نرمال، در ۱۹ درصد موارد شرایط خشکسالی کم، حاکم بوده و شرایط نیمه‌مرطوب و خشکسالی متوسط به ترتیب با ۱۴ درصد و ۱۳ درصد در رتبه‌های بعدی قرار دارند. همچنین، سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ (از اکتبر ۲۰۱۸ تا سپتامبر ۲۰۱۹) مرطوب‌ترین سال آبی و سال‌های آبی ۹۶-۱۳۹۵ (از اکتبر ۲۰۱۶ تا سپتامبر ۲۰۱۷) و ۹۱-۱۳۹۰ (از اکتبر ۲۰۱۱ تا سپتامبر ۲۰۱۲) خشک‌ترین سال‌های آبی بوده‌اند. مضافاً در تمامی زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه به استثنای زیرحوضه آبریز زولاچای، وضعیت هیدرولوژیکی نزدیک نرمال بیشترین وضعیت رخ داده در طول دوره آماری مورد مطالعه بوده است. همچنین، نتایج حاصل از آزمون روند ناپارامتری من-کندال نشان داد که تنها در زیرحوضه‌های آبریز باراندوزچای و رشکان-تلخاب، روند وضعیت هیدرولوژیکی حوضه افزایشی (افزایش رطوبت) بوده است.

**کلمات کلیدی:** خشکسالی، دریاچه ارومیه، شاخص NDSI، شاخص SWSI، گوگل ارث انجین، من-کندال.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۲/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۷/۲۴

1- Ph.D. Student in Water Engineering, Department of Science and Water Engineering, College of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: ramini.hydrogeology@gmail.com

2- Ph.D. Student in Water Engineering, Department of Science and Water Engineering, College of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

3- Professor, Department of Science and Water Engineering, College of Agriculture, Urmia University, Iran. Email: h.rezaie@urmia.ac.ir

\*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1401.18.4.9.3](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1401.18.4.9.3)

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۲ امکانپذیر است.



حالی که میزان بارندگی‌ها و بارش برف در حدود ۱۶-۱۲ درصد کاهش یافته‌اند که امر حاکی از تأثیر منفی فعالیت‌های بشر بر منابع آبی است (Shaban, 2009). (Shahrokh Vand et al. (2009) در مقاله‌ای به بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی و ارتباط آن با بارش در حوضه رودخانه خرم‌آباد پرداختند. با بررسی نتایج مشخص شد که خشکسالی‌های اقلیمی حداکثر با تداوم‌های یک تا سه ماهه و خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در تداوم‌های پنج تا دوازده ماهه مشاهده می‌شوند. جونغون و همکاران از شاخص SWSI اصلاح‌شده برای بررسی و پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی در کره جنوبی استفاده کردند. نتایج نشان داد که بزرگترین خشکسالی ثبت شده در منطقه، مربوط به سال ۲۰۰۱ است (Kwon and Kim, 2010; Kim et al., 2012). (Araghinejad (2011) در مقاله‌ای روشی را برای پیش‌بینی و کنترل خشکسالی هیدرولوژیکی حوضه رودخانه زاینده‌رود ارائه داد که به گفته وی می‌تواند نقایص شاخص ذخایر آب سطحی SWSI را بهبود ببخشد. (Rahimi and Mohammadi (2017) خشکسالی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز سد زاینده‌رود را با استفاده از شاخص SWSI بررسی نمودند؛ تحلیل مقایسه‌ای داده‌های بارش، دبی، حجم ذخیره‌ای دریاچه، یک روند افزایشی برای دما و مقادیر آب معادل برف نشان می‌دهد، همچنین، نتایج بدست آمده نشان داد که مابین متغیرهای مدل SWSI و خشکسالی هواشناسی، یک همبستگی مناسب برقرار است. از نتایج دیگر این تحقیق تبیین تأثیر خشکسالی‌های هواشناسی بر روی رفتار هیدرولوژیکی حوضه در سطح اطمینان ۰/۹۵ با ضریب همبستگی ۰/۷۸ است. (Azizi et al. (2017) به بررسی روند ماهانه پوشش برف در دامنه‌های جنوبی البرز پرداختند؛ نتایج بدست آمده نشان داد که پوشش برف در اواخر پاییز و اوایل زمستان رو به افزایش و در فصل بهار به میزان فزاینده‌ای در حال کاهش است؛ به‌طوریکه مقادیر آماره من-کندال در ماه می به ۲/۲- می‌رسد. این وضعیت نشان‌دهنده کوتاه شدن دوره تداوم پوشش برف و افزایش دوره ذوب آن است. از نظر ارتفاعی، پوشش برف در حال پسروی بوده؛ به‌طوریکه روند تغییرات آن در تمامی طبقات ارتفاعی، به ویژه در ارتفاعات ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متر، رو به کاهش است. مقایسه وضعیت پوشش برف با شرایط دما و بارش نشان داد که در بیشتر مواقع، ناهنجاری‌های منفی پوشش برف با ناهنجاری مثبت دما و منفی بارش تطابق دارد. (Khosravi et al. (2017) در پژوهشی با عنوان بررسی تغییرات سطوح پوشش برف در ارتفاعات زردکوه بختیاری با استفاده از سنجش از دور، تغییرات پوشش برف را در ارتفاعات زردکوه بررسی کرده و بدین نتیجه رسیدند که سطوح برف در ارتفاعات زردکوه بختیاری در سال ۲۰۱۱ نسبت به سال ۱۹۹۱ روند کاهشی داشته است. (Wambua et al. (2017)

خشکسالی حادثه طبیعی و آرامی می‌باشد که به اعتقاد بسیاری دارای مکانیسمی پیچیده است که ماهیت آن نسبت به انواع دیگر حوادث طبیعی، کمتر شناخته شده است. گرچه بسیاری از مردم به اشتباه خشکسالی را واقعه‌ای تصادفی و نادر می‌پندارند، ولی این پدیده، حالتی نرمال و مستمر از اقلیم است که مشخصات آن از یک منطقه به منطقه دیگر کاملاً متفاوت بوده و تقریباً در تمامی مناطق اقلیمی رخ می‌دهد (Maheras et al., 1992). تداوم خشکسالی ممکن است منجر به بیابان‌زایی و خشکسالی کشاورزی در نواحی آسیب‌پذیر (شکستنده) مانند نواحی خشک و نیمه‌خشک و حتی نیمه مرطوب گردد. در داخل اکوسیستم‌های ضعیف، ذخایر آب، ساختمان و حاصلخیزی خاک به شدت در نتیجه خشکسالی تنزل پیدا خواهند کرد (Wambua et al., 2017). بطور کلی چهار نوع خشکسالی تعیین شده است که شامل خشکسالی‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی است (Barua, 2010). خشکسالی هیدرولوژیکی به تأثیرات ناشی از کاهش ریزش‌های جوی (شامل باران و برف) بر منابع آب زیرزمینی یا سطحی شامل جریان رودخانه‌ها، مخازن سدها، دریاچه‌ها و آب‌های زیرزمینی اطلاق می‌شود و تناوب و شدت آن را باید در محدوده حوضه آبریز بررسی نمود. خشکسالی هیدرولوژیکی مدتی پس از وقوع خشکسالی اقلیمی رخ می‌دهد؛ به نحوی که کاهش بارندگی‌ها، باعث کاهش ذخایر برف، آب‌های جاری و زیرزمینی می‌شود (Maroofi, 2003) و دارای تأثیرات مخربی در تأمین مواد غذایی، آب و تولید برق هست.

با توجه آشکار شدن سریع اثرات مخرب ناشی از خشکسالی اقلیمی بر منابع آبی، خشکسالی‌های هیدرولوژیکی همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است؛ از جمله می‌توان به کار بنیادی شفر و دژمان اشاره نمود. این دو به منظور اصلاح شاخص پالمر برای شرایط رطوبتی اراضی ایالت کلرادو، شاخص SWSI<sup>1</sup> را پیشنهاد نمودند که برای آب‌های سطحی طراحی شده بود که با توجه به اهمیت مؤلفه برف کوهستان‌ها در آن، به عنوان "شاخص وابسته به آب کوهستان" نیز توصیف شده است (Shafer and Dezman, 1982). گارن از شاخص SWSI جهت پایش خشکسالی در غرب ایالات متحده استفاده کرد و نشان داد که این شاخص به دلیل در نظر گرفتن نقش برف در رواناب مناطق کوهستانی، شاخص مناسبی جهت پایش خشکسالی است (Garen, 1993). شبان خشکسالی هیدرولوژیکی را در لبنان مطالعه کرد و نشان داد که منابع تحت تأثیر فعالیت‌های انسان مانند رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی، در حدود ۲۹-۲۳ درصد کاهش داشته‌اند؛ در

مناسب، بسیار مفید می‌باشد. در این تحقیق از دو روش NDSI و نسبت باندها، برای تعیین نواحی برفی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استفاده گردید که نتایج نشان داد که هر دو روش جهت آنالیز برف، از دقت کافی برخوردار می‌باشند. (Sikandar et al. (2020) در تحقیقی از تصاویر روزانه و ۸ روزه ماهواره مادیس برای تعیین تغییرات مکانی و زمانی پوشش برف در حوضه ایندوس هندوستان در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۰۸ استفاده نمودند. پوشش‌های برفی استخراج شده از شاخص NDSI در تصاویر مادیس با ماهواره لندست مقایسه گردید و نتایج نشان داد که آستانه ۰/۳۴ برای شاخص NDSI در تصاویر ماهواره مادیس نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. (Jabbar et al. (2020) در حوضه سند علیا در شمال پاکستان نسبت به بررسی روند زمانی پوشش برف با توجه به تغییرات زمانی و مکانی دمای سطح زمین و ارزیابی دقت تصاویر لندست برای تشخیص دمای سطح زمین پرداختند و بدین منظور از تصاویر ماهواره لندست برای دوره زمانی ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۹ میلادی و شاخص تفاوت نرمال شده برف (NDSI) به منظور تعیین پوشش برف استفاده گردید. نتایج نشان داد که حداکثر پوشش برف حدود ۲۰۶۷۵ کیلومتر مربع، مربوط به آوریل سال ۲۰۱۷ بوده و پس از آن بیشترین پوشش برفی با رقم حدود ۱۸۸۰۰ کیلومتر مربع مربوط به سال‌های ۱۹۹۶ و ۱۹۹۹ میلادی است. (Nyokabi et al. (2021) تحقیقی با هدف ارزیابی مکانی و زمانی خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص تأمین آب سطحی (SWSI) در حوضه آبریز رودخانه مالوا انجام دادند؛ آن‌ها در این تحقیق از داده‌های آب و هواشناسی که شامل بارندگی، سطح آب دریاچه نایواشا و جریان رودخانه مالوا برای سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۸ میلادی بود، استفاده نمودند. بالاترین درصد طبقه‌بندی برای ایستگاه‌ها با میانگین ۰/۹- تا ۰/۱ به ترتیب با ۳۴ درصد برای منطقه مالو و ۳۰ درصد برای منطقه توراها بود. در تجزیه و تحلیل توزیع مکانی، بالاترین شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در امتداد قسمت جنوبی حوضه و کمترین آن در نواحی شرقی و شمال شرقی مشاهده گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه آبریز مورد مطالعه و در طول مسیر جریان رودخانه از نظر تحلیل‌های زمانی و مکانی افزایش یافته‌است. (Nouri et al. (2021) در تحقیقی به بررسی تغییرات مکانی و زمانی روند دما و بارش حوضه آبریز ارس با استفاده از آزمون‌های پارامتری من-کندال و شیب سنس پرداختند؛ نتایج نشان داد که روند تغییرات بارش در مقیاس سالانه، جزء در قسمت‌های مرکزی حوضه، در سایر نواحی حوضه به صورت افزایشی بوده است. این تغییرات در مقیاس فصلی بیشتر خود را نشان می‌داد، به نحوی که در فصل بهار روند تغییرات به صورت کاهشی و در فصل پاییز به صورت افزایشی بوده است. دما نیز

تحقیقی به بررسی توزیع زمانی و مکانی ریسک خشکسالی با استفاده از شاخص تأمین آب سطحی (SWSI) در حوضه رودخانه تانا پرداختند. آنها در این تحقیق با استفاده از شاخص اصلاح شده مذکور، ریسک خشکسالی در حوضه رودخانه تانا را طی سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ با استفاده از داده‌های هواشناسی برای ارتفاعات بالا، متوسط، نسبتاً پایین و پایین در هشت ایستگاه هیدرومتری مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از بررسی توزیع مکانی خشکسالی با استفاده از درون‌یابی کریجینگ و آنالیز روند خشکسالی با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال نشان داد که نواحی جنوب شرقی حوضه به لحاظ فراوانی و شدت، بسیار مستعد خشکسالی هستند. (Moghipi et al. (2018) خشکسالی ماهانه را با استفاده از شاخص استاندارد بارش و زنجیره مارکوف در جنوب شرق ایران پیش‌بینی نمودند. آنها در این تحقیق خشکسالی ماهانه را در ۱۲ ایستگاه موجود در منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ محاسبه و با استفاده از زنجیره مارکوف اقدام به پیش‌بینی خشکسالی ماهانه برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ نمودند. نتایج به دست آمده نشان داد که اغلب ایستگاه‌ها از نظر خشکسالی در وضعیت نرمال، متوسط و شدید هستند. همچنین، نتایج پیش‌بینی در ایستگاه‌های مختلف نشان داد که بیشترین احتمال وقوع خشکسالی مربوط به وضعیت‌های نرمال، متوسط و شدید است. در مطالعه انجام شده توسط (Parhizkari et al. (2020) برای تحلیل اقتصادی اثرات بالقوه خشکسالی هیدرولوژیکی بر وضعیت کشاورزی، بازده درآمدی و مصارف آبی کشاورزان استان تهران، از الگوی برنامه‌ریزی ریاضی مثبت چند دوره‌ای (MP-PMP)<sup>2</sup> و اطلاعات آماری مربوط به دوره پنج‌ساله ۱۳۹۷-۱۳۹۲ استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوی فعلی کشت در استان تهران بهینه نیست و با وقوع خشکسالی، تمایل کشاورزان برای کشت محصولات پرآب‌طلب مانند هندوانه و آفتابگردان کاهش می‌یابد. همچنین، نتایج نشان داد که در صورت وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی، حدود ۹/۱۳ درصد از تقاضای آب بخش کشاورزی استان تهران، بدون پاسخ مانده و تأمین نخواهد شد که این امر ضرورت اصلاح الگوی کشت در منطقه را نشان می‌دهد. کاهش ۷/۲۸ درصدی بازده درآمدی کشاورزان و افزایش ۳۸/۲ درصدی ارزش اقتصادی آب آبیاری نسبت به دوره مبنای دیگر پیامدهای وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی در استان تهران بود. (Patel and DippalIsrani (2020) با استفاده از شاخص NDSI<sup>3</sup> و روش نسبت‌ها نسبت به تعیین نواحی دارای پوشش‌های برفی در حوضه باگشوار هند با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ اقدام نمودند. نتایج حاصل نشان داد که داده‌های ماهواره سنتینل ۲ در استخراج نواحی دارای پوشش برفی بدلیل داشتن کیفیت و قدرت تفکیک مکانی

بطور یکسان در کل منطقه مطالعاتی سیر صعودی داشت. باتوجه به نتایج تحقیق، ملاحظه شد که عوامل اقلیمی برای توجیه کاهش ورودی‌ها به سد ارس کافی نیستند و بررسی عوامل انسانی به همراه اثر ذوب برف نیز لازم به توجه هست. Abbaszadeh Tehrani et al. (2022) در تحقیقی به بررسی سلامت اکوسیستم حوضه آبریز دریاچه ارومیه با معرفی مدل ارزیابی سلامت اکوسیستم مبتنی بر سنجش از دور<sup>4</sup> (RSEHA) پرداختند، آن‌ها در این تحقیق با اعمال ۱۰ شاخص مکانی-زمانی، سلامت اکوسیستم حوضه دریاچه ارومیه را طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۳ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که وضعیت سلامت حوضه آبریز مورد مطالعه در بخش‌های مختلف آن از «بسیار قوی» تا «بسیار ضعیف» متغیر است به نحوی که سلامت حوضه دریاچه، فدای توسعه مناطق شده‌است. Janalipour et al. (2022) با استفاده از محصول هشت روزه دمایی سطح زمین، برای اندازه‌گیری تغییرات دما و پوشش اراضی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سه ماه ژوئن، جولای و آگوست در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۸ استفاده نموده و سلامتی اکوسیستم حوضه آبریز دریاچه ارومیه را بررسی نمودند. آن‌ها در این تحقیق به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های سری زمانی از روش‌های رگرسیون خطی، سری فوریه و آزمون من-کندال استفاده نمودند. همچنین شاخص موران برای تحلیل تغییرات الگوی فضایی شاخص‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مدل سلامت کل اکوسیستم با معرفی شاخص‌های نرمال شده پوشش گیاهی، دمای دریاچه، شاخص موران و دمای حوضه به ترتیب به عنوان شاخص‌های قدرت، ساختار، تاب‌آوری و خدمات اکوسیستمی، معرفی گردید. بر اساس خروجی مدل، ۴۱، ۵۴ و ۴ درصد از منطقه، به ترتیب از لحاظ سلامت اکوسیستم در وضعیت ضعیف، متوسط و قوی قرار دارند. همچنین نتایج نشان داد که علیرغم نقش تعدیل‌کننده دریاچه ارومیه به‌عنوان تنظیم‌کننده دما برای مناطق اطراف آن (به‌ویژه در فاصله ۱۰ کیلومتری)، کاهش وضعیت سلامت اکوسیستم در ۹۵ درصد مناطق طی سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۸ رخ داده است.

بخش غربی حوضه دریاچه ارومیه به دلیل رودخانه‌های زیادی که دارد یکی از قطب‌های مهم کشاورزی در ایران است. بخشی از منطقه، آب موردنیاز خود را به ویژه برای کشاورزی از رودخانه‌ها تأمین می‌کند و در بخش دیگر که به رودخانه‌ها دسترسی ندارند از آب‌های زیرزمینی به شکل چاه، قنات و چشمه استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، به دلیل بهره‌برداری بی‌رویه و نیز کاهش بارندگی‌ها، مقدار آب رودخانه‌ها و سطح آب زیرزمینی دشت‌های منطقه به شدت کاهش یافته است. پژوهش حاضر در پی آشکارسازی وضعیت خشکسالی منطقه مورد

مطالعه و تعیین مشخصات زمانی و مکانی خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص تأمین آب سطحی (SWSI) در طی دوره زمانی سال‌های آبی ۸۸-۱۳۸۷ تا ۹۸-۱۳۹۷ (از اکتبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۹) و بررسی روند موجود در سری زمانی خشکسالی هیدرولوژیکی منطقه با استفاده از آزمون روند من-کندال انجام شد. بازه زمانی فوق‌الذکر بدلیل محدودیت سنوات آماری مربوط به ذخایر منابع آب سطحی انتخاب گردید. در این تحقیق برخلاف روش‌های مرسوم در تعیین آب معادل برف و استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده، از روش‌های مبتنی بر سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است که بدین منظور تمامی مراحل مربوط به تعیین سطح پوشش برف با استفاده از شاخص NDSI و ارتفاع آب معادل برف، در سامانه تحت وب گوگل ارث انجام شد. مضافاً اینکه وزن هر یک از مؤلفه‌های تعریف شده در شاخص مورد استفاده، با استفاده از نظرات کارشناسان خبره و به روش رتبه‌دهی سلسله مراتبی (AHP<sup>5</sup>) تعیین شد.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

با توجه به وضعیت خشکسالی حاکم بر دریاچه ارومیه و کاهش سالانه و مستمر سطح و تراز آب آن، زیرحوضه‌های آبریز درجه ۳ رودخانه‌های بخش غربی حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع در استان آذربایجان غربی به عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب گردید که از ۴۴/۲۲ تا ۴۷/۳۷ درجه طول شرقی و از ۳۵/۶۸ تا ۳۸/۳۸ درجه عرض شمالی امتداد یافته‌اند (شکل ۱). محدوده مورد مطالعه از سمت شمال به حوضه آبریز رودخانه ارس، از سمت شرق به دریاچه ارومیه، از جنوب به حوضه آبریز رودخانه‌های سفیدرود و سیروان و از غرب به حوضه آبریز رودخانه زاب و مرز ایران و ترکیه محدود شده است. حداکثر ارتفاع محدوده ۳۶۸۶ متر و حداقل ارتفاع آن ۱۲۳۷ متر از سطح آب‌های آزاد می‌باشد. در محدوده مورد مطالعه رودخانه‌های پر آب و مهمی نظیر زولاچای، نازلولاچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای، زرینه‌رود، سیمینه‌رود، گادارچای و مهابادچای جاری می‌باشد که پایاب آن‌ها به دریاچه ارومیه منتهی می‌شود. رژیم بارندگی در محدوده مورد مطالعه از نوع مدیترانه‌ای و در بعضی مناطق به علت وجود بارندگی تابستانه، شبه‌مدیترانه‌ای است. دمای متوسط سالانه برابر ۹/۴ درجه سانتیگراد و افت دمای متوسط سالانه به ازای هر کیلومتر افزایش ارتفاع ۵/۲ درجه سانتیگراد است. از سازه‌های مهم ذخیره و انتقال آب در این محدوده می‌توان به سد‌های زولا، دریک و شهرچای، مهاباد، بوکان و حسنلو اشاره نمود. مشخصات هر یک از زیرحوضه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

کرده و از تمامی توابع ابری گوگل برای انجام پردازش‌ها استفاده نمایند (Gorelick et al., 2017).

## ۲-۲- روش‌شناسی تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش از نوع اسنادی و تحلیل روابط آماری بر روی داده‌های بارش، ذخیره برف، دبی و مخازن سدهاست و برای این منظور از نرم‌افزارهای ArcGIS, Excel, ExpertChoice, سامانه Google Earth Engine و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های Landsat7, Landsat8 و محصولات سازمان فضایی ناسا استفاده گردید. روش کلی انجام تحقیق در نمودار شکل ۲ ارائه شده است.

## ۳-۲- مبانی نظری تحقیق

### ۱-۳-۲- سامانه Google Earth Engine

ارث انجین شامل یک کاتالوگ داده‌ای آماده و آنالیز چند پتابیتی مکان‌مند با قابلیت کاربری بالا و سرویس‌های محاسباتی موازی است که از طریق اینترفازهای برنامه‌نویسی کاربردی (API) قابل دسترس و کنترل است و مبتنی بر محیط توسعه تعاملی تحت وب است که نمونه‌سازی و نمایش سریع نتایج را امکان‌پذیر می‌سازد. کاتالوگ داده‌ها شامل مجموعه‌ای از داده‌های جغرافیایی شامل تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی، متغیرهای اقلیمی و پیش‌بینی هوا، پوشش‌های گیاهی، داده‌های اقتصادی-اجتماعی و توپوگرافی با دسترسی ساده است که کاربران قادراند تا داده‌های خود را به آن اضافه

## ۲-۳-۲- شاخص نرمال‌شده تفاضل برف (NDSI)

شاخص NDSI برای تفکیک پدیده‌هایی که بازتابش آن‌ها در طیف الکترومغناطیسی نزدیک برف است (مانند ابر) به کار می‌رود. مقادیر این شاخص بین -۱ و +۱ متغیر است و مناطقی که دارای NDSI بین -۱ و صفر هستند، نشان‌دهنده عدم پوشش برف در آن منطقه است. این شاخص بر این اصل استوار است که برف دارای بازتابندگی بالا در ناحیه مرئی و بازتابندگی پایین در مادون قرمز میانی است (Nolin and Liang, 2000). این شاخص مطابق رابطه (۱) از نسبت تفاضل بازتابندگی باند (Green) و باند (Shortwave infrared 1) بر مجموع بازتابندگی در این دو باند بدست می‌آید (Hall et al., 1995). برای شناسایی برف از سایر پدیده‌ها، علاوه بر اینکه مقدار شاخص NDSI بایستی بیش از ۰/۴ باشد، باید مقدار بازتابش باند SWI1 بیش از ۰/۱۱ و مقدار بازتابش باند Green ماهواره لندست ۷ و ۸ بزرگتر از ۰/۱ باشد (Hall et al., 2002; Poon, 2004; Salomonson and Appel, 2004).

$$NDSI = \frac{band_{Green} - band_{SWI1}}{band_{Green} + band_{SWI1}} \quad (1)$$

Table 1- Characteristics of the studied sub basins

جدول ۱- مشخصات زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه

Sub basin	Area (km <sup>2</sup> )	Mean Elevation (m)	Geographical coordinates of the center of sub basins		Number of rain gauge stations	Hydrometric station	Dams
			Latitude	Longitude			
Zola Chay	2225	1976	38.1	44.6	10	Yalghoozaghaj	Zola and Dirik
Kharkhareh Chay	488	1695	38.1	44.9	5	Tamar	-
Shivsan Chay	572	1659	37.9	45	5	-	-
Nazloo Chay	1880	1836	37.7	44.8	11	Abajalooye Sofla	-
Roze Chay	457	1657	37.6	45	7	Pole Ozbak	-
Shahar Chay	712	1843	37.5	44.9	7	Kashtiban	Shahar Chay
Barandooz Chay	1362	1796	37.3	45	10	Babarood	-
Rashakan-Talkhab	375	1583	37.2	45.3	8	Eslamabad	-
Gadar Chay	2091	1714	37	45.3	22	Pole Bahramloo	Hasanloo
Mahabad Chay	1507	1638	36.7	45.7	16	Ghardyaghoob	Mahabad
Simineh Rood	3783	1568	36.6	46	21	Pole Miandoab	-
Leylan Chay	1936	1685	37.3	46.3	5	-	-
Zarrineh Rood	11825	1887	36.5	46.6	29	Nezamabad	Kazemi and Saroogh

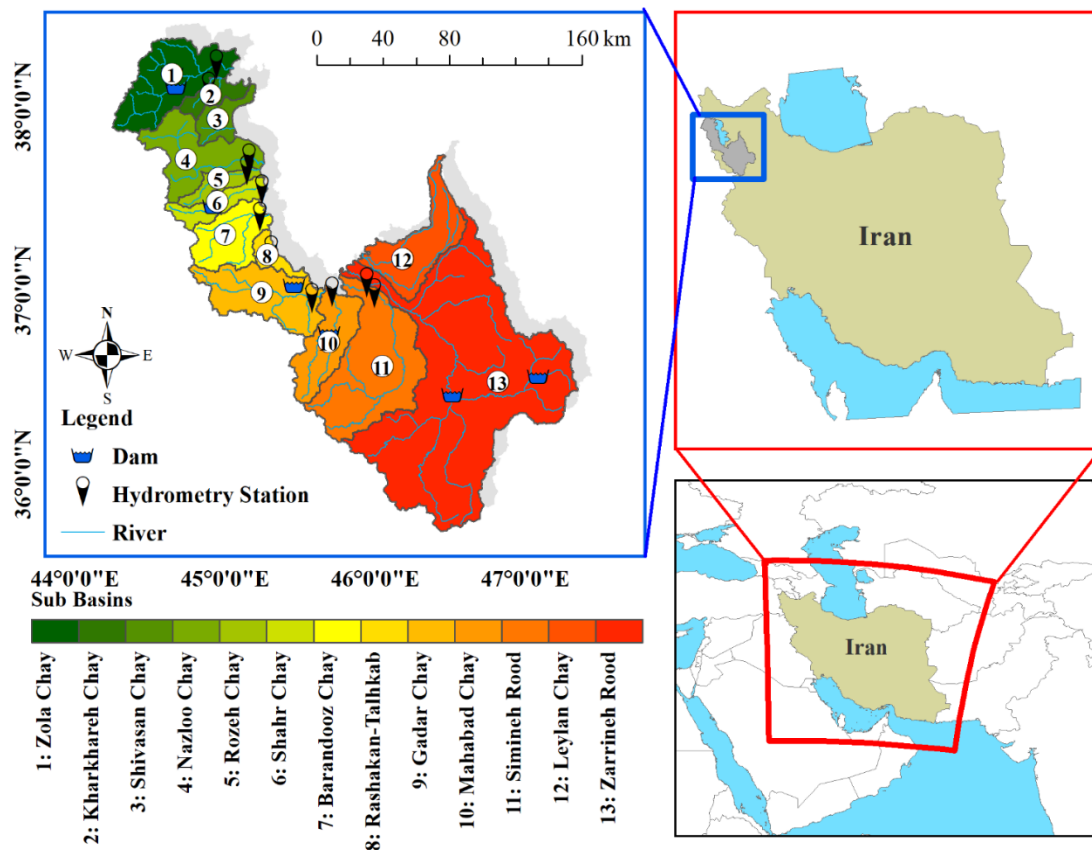


Fig. 1- The studied sub basins  
 شکل ۱- زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه

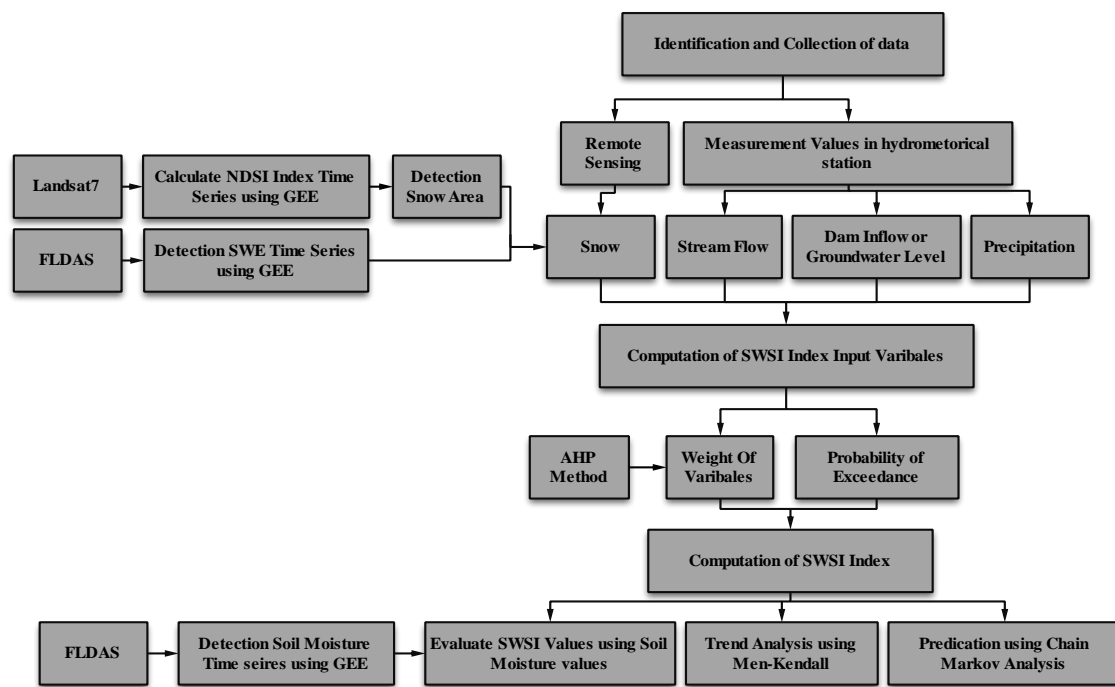


Fig. 2- Diagram of research process  
 شکل ۲- مراحل انجام تحقیق

### ۲-۳-۳- ارتفاع آب معادل برف (SWE<sup>7</sup>)

ارتفاع آب معادل برف، حجم آب ذخیره شده در توده برف و رواناب حاصل از ذوب آن را نشان می‌دهد. آب معادل برف را علاوه بر استفاده از روش وزن‌سنجی، می‌توان با استفاده از رابطه عمق و چگالی برف و از طریق از رابطه (۲) تعیین نمود (Bavera and De Michele, 2009):

$$SWE = d_{snow} \times \frac{\rho_{snow}}{\rho_{water}} \quad (2)$$

در رابطه فوق  $d_{snow}$  عمق برف (متر)،  $\rho_{snow}$  چگالی برف ( $kg.m^{-3}$ ) و  $\rho_{water}$  چگالی آب برف در حال ذوب ( $10^3 kg.m^{-3}$ ) است. رابطه (۲) بطور معمول برای تعیین آب معادل برف، در نقاط اندازه‌گیری عمق و چگالی برف، قابل استفاده است، لذا قادر به ترسیم توزیع مکانی آن در سطح حوضه نیست و تنها در نقاط اندازه‌گیری نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. از سوی دیگر استفاده از روش‌های درون‌یابی جهت تعیین توزیع مکانی مؤلفه‌های فوق‌الذکر، بدلیل ارائه نتایج متفاوت در صورت استفاده از روش‌های درون‌یابی مختلف، دارای محدودیت است (Hassan et al., 2007) که برای مرتفع نمودن ایرادات مذکور، می‌توان از روش‌های مبتنی بر سنجش از دور استفاده نمود که قابلیت اجرایی آن در مطالعات مربوط به برف به اثبات رسیده است (Bavera and De Michele, 2009; Kuchment et al., 2010; Sekhon et al., 2010). در تحقیق حاضر، مقدار ارتفاع آب معادل برف در زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه با استفاده از محصول SWE مجموعه تصاویر داده‌ای FLDAS سازمان فضایی ناسا در سامانه گوگل ارث انجین، استخراج گردید.

### ۲-۳-۴- روش رتبه‌دهی سلسله مراتبی (AHP)

فرآیند رتبه‌دهی سلسله مراتبی که در سال ۲۰۰۸ توسط توماس ساعتی ارائه شده است یک تئوری رتبه‌دهی از طریق مقایسه‌های زوجی است که به منظور تعیین اولویت‌ها، بر قضاوت‌های متخصصان تکیه می‌کند (Saaty, 2008) و یکی از ابزارهای ارزشمند در تجزیه و تحلیل مسائل پیچیده و مناسب‌ترین روش در آنالیزهای چند متغیره مکانی و غیرمکانی است (Haji Azizi et al., 2011). در این روش پس از تعیین گزینه‌های تصمیم‌گیری، عناصر هر سطح نسبت به سایر عناصر مربوط به خود در سطح بالاتر به صورت زوجی مقایسه شده و ماتریس‌های مقایسات زوجی تشکیل و در نهایت وزن نهایی گزینه‌ها محاسبه می‌شود (Jalao et al., 2014).

### ۲-۳-۵- آزمون من-کندال

این آزمون که ابتدا توسط من<sup>۸</sup> در سال ۱۹۴۵ ارائه و سپس توسط کندال<sup>۹</sup> در سال ۱۹۷۵ توسعه یافته و کاربرد آن توسط سازمان جهانی هواشناسی (۱۹۶۶) توصیه شده است، از متداول‌ترین آزمون‌های ناپارامتری جهت بررسی وجود یا عدم وجود روند در مجموعه سری داده‌ها است (Asadi et al., 2018). از نقاط قوت این روش، می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند و خصوصاً برای سری‌هایی که چولگی یا کشیدگی زیادی دارند، اشاره نمود (Önöz and Bayazit, 2003). اثرپذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی از سری‌های زمانی مشاهده می‌گردند، از دیگر مزایای استفاده از این روش است (Partal and Kahya, 2006). مراحل محاسبه آماره این آزمون به شرح زیر است:

۱- محاسبه اختلاف بین تک تک مشاهدات با یکدیگر و اعمال تابع علامت و استخراج پارامتر S با استفاده از رابطه (۳):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (3)$$

که در رابطه فوق، n تعداد مشاهدات در سری زمانی و  $x_j$  و  $x_k$  به ترتیب داده‌های زام k و m سری می‌باشند. تابع علامت نیز با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

۲- محاسبه واریانس داده‌ها با استفاده از یکی از روابط (۵) یا (۶):

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18} : n > 10 \text{ اء} \quad (5)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} : n \leq 10 \text{ اء} \quad (6)$$

که n تعداد مشاهدات سری و m معرف تعداد سری‌هایی است که در آنها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. t نیز بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان است.

۳- استخراج آماره Z با استفاده از رابطه (۷):

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

فرض صفر در این آزمون، بر تصادفی بودن داده‌ها و عدم وجود روند در سری زمانی دلالت دارد. در یک آزمون دو دامنه‌ای جهت روندیابی سری داده‌ها، فرض صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که رابطه (۸) برقرار باشد:

$$|Z| \leq Z_{\alpha/2} \quad (8)$$

که در رابطه فوق،  $a$  سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و  $Z_a$  آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری  $a$  می‌باشد که با توجه به دو دامنه بودن آزمون، از  $a/2$  استفاده می‌شود که برای سطح اطمینان ۹۵ درصد، مقدار آن برابر  $1/96$  است. در صورتیکه مقدار آماره  $|Z|$  بیش از  $1/96$  باشد؛ آنگاه فرض صفر رد و روند صعودی یا نزولی موجود در سری داده‌ها، به ترتیب با مقادیر مثبت و منفی  $Z$  تعیین می‌شود.

## ۲-۴- متدولوژی

### ۲-۴-۱- شاخص تأمین آب سطحی (SWSI)

متداول‌ترین شاخص ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی در مناطقی که برف منشأ عمده جریانات سطحی است، شاخص SWSI هست و استفاده از این شاخص نخستین بار توسط Shafer and Dezman (1982) برای تکمیل پایش خشکسالی پالمر در ایالت کلرادو در آمریکا پیشنهاد گردید. در یک مقیاس حوضه‌ای مقدار شاخص SWSI از مقادیر متوسط بارندگی، ذخایر آب سطحی (سد)، آب معادل برف و جریان‌های رودخانه‌ای تعیین می‌شود. احتمال تجاوز از حد برای هر یک از داده‌ها محاسبه می‌شود و ضرایب وزنی هر یک از مؤلفه‌ها براساس شناخت از رفتارهای هیدرولوژیکی حوضه، مشخصات فیزیوگرافی و نظرات کارشناسی مبتنی بر مطالعات پایه هیدرولوژی و اقلیم‌شناسی و مدیریت منابع آب تعیین می‌شود که مجموع ضرایب برابر یک خواهد بود. هدف از تعیین شاخص SWSI، بدست آوردن معیاری برای تعیین مقدار آب موجود در مناطق کوهستانی و فراهم نمودن معیاری برای امکان مقایسه مناطق مختلف با هم به لحاظ خشکسالی هیدرولوژیکی است. این روش علاوه بر مزیت‌های یادشده، دارای محدودیتی است، بنحوی که هر تغییر در مدیریت آب در داخل یک حوضه، منجر به تغییر در الگوریتم خواهد شد که این تغییر می‌تواند بدلیل اضافه شدن ذخایر آبی جدید و یا احداث آب‌بند باشد (Wambua et al., 2017).

در این تحقیق، داده‌های موردنیاز برای محاسبه شاخص SWSI شامل بارش، رواناب، ذخایر آب سطحی و آب معادل برف برای یک دوره ۱۰ ساله از سال آبی ۸۸-۸۹ تا سال آبی ۹۷-۹۸ (از اکتبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۹) است. به منظور تعیین متوسط بارندگی سالانه در هر یک از زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه، از مقادیر اندازه‌گیری شده باران در ایستگاه‌های هواشناسی وزارت نیرو استفاده گردید. میزان رواناب سطحی در هر یک از زیرحوضه‌های آبریز دارای ایستگاه هیدرومتری، از مقادیر اندازه‌گیری شده دبی در ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در

منتهی‌الیه حوضه‌ها استخراج شد و در زیرحوضه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری، مقدار رواناب سطحی با استفاده از روش نسبت مساحت‌ها برآورد شد. سدهای در حال بهره‌برداری موجود در زیرحوضه‌های مورد مطالعه مطابق جدول ۱ شامل هفت سد بزرگ و کوچک با احجام متفاوت بوده که عمدتاً به منظور تأمین آب کشاورزی احداث شده‌اند. لازم به توضیح است که در زیرحوضه‌های فاقد سد، با توجه به اینکه در صورت کاهش رواناب‌های سطحی، برقراری تعادل بین میزان عرضه و تقاضای مصرف آب جهت مصارف مختلف، از طریق بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی تا حدودی برقرار و کمبود منابع آب سطحی ناشی از کاهش بارندگی‌ها و بروز خشکسالی‌ها از طریق منابع آب زیرزمینی جبران می‌گردد، لذا در تحقیق حاضر در زیرحوضه‌های فاقد سد، از تغییرات مخازن آب زیرزمینی بجای این مؤلفه استفاده گردید (Noroozi and Mohammadi, 2016). با توجه به نبود ایستگاه‌های برف‌سنجی با توزیع مکانی مناسب در ارتفاعات زیرحوضه‌های مورد مطالعه و همچنین با توجه به محدودیت مورد اشاره در استفاده از روش‌های درون‌یابی جهت تعیین پویایی تغییرات برف در سطح ارتفاعات زیرحوضه‌های مورد مطالعه، میزان آب حاصل از ذوب برف از حاصلضرب مساحت نواحی دارای پوشش‌های برفی استخراج شده توسط شاخص NDSI، در ارتفاع آب معادل برف استخراج شده از محصولات سازمان فضایی ناسا برآورد گردید. این برآورد با استفاده از تکنولوژی سنسجس از دور و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های لندست ۷ و ۸ و مدل کاربردی FLDAS<sup>10</sup> محصول سازمان فضایی ناسا، در سامانه تحت وب Google Earth Engine انجام شد. مقادیر شاخص SWSI با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود (Shafer and Dezman, 1982):

$$SWSI = \frac{[(a \times P_{perc}) + (b \times P_{strm}) + (c \times P_{resv}) + (d \times P_{snow}) - 50]}{12}$$

در رابطه فوق ضرایب  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  وزن هر یک از اجزاء در نظر گرفته شده در محاسبه شاخص SWSI است که در تحقیق حاضر از روش وزن‌دهی سلسله مراتبی AHP برای تعیین اوزان هر یک از مؤلفه‌ها استفاده گردید. در رابطه (۹) تفاضل عدد ۵۰ در صورت کسر، برای آن است که مقادیر شاخص حول صفر متقارن باشد. همچنین، با تقسیم بر عدد ۱۲، مقادیر شاخص بین  $-4/2$  و  $+4/2$  قرار می‌گیرد.

P احتمال تجاوز از حد مربوط به هر یک از داده‌های موجود در مجموعه داده‌های هر مؤلفه (برحسب درصد) و اندیس‌های  $perc$ ،  $strm$ ،  $resv$  و  $snow$  به ترتیب مربوط به مؤلفه بارندگی، رواناب‌های سطحی، ذخایر



## ۲-۴-۲- جمع‌آوری داده‌های موردنیاز

### الف) بارندگی

متوسط بارندگی سالانه در سطح هر یک از زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه از مجموع میانگین بارندگی در محدوده دشت و ارتفاعات هر زیرحوضه تعیین شد (جدول ۳). تعیین متوسط بارندگی در محدوده دشت‌ها از طریق متوسط‌گیری وزنی مقدار اندازه‌گیری شده باران با استفاده از شبکه تیسن، صورت گرفت و متوسط بارندگی سالانه در ارتفاعات زیرحوضه‌ها نیز، از طریق رابطه طول، عرض جغرافیایی و ارتفاع با بارش و با استفاده از لایه رقومی ارتفاع برآورد شد.

### ب) جریان‌های سطحی

رواناب حوضه، برآیند متغیرهای اقلیم‌شناسی، هیدرولوژیکی، کاربری اراضی و پوشش گیاهی می‌باشد؛ به عبارت دیگر دبی، تغییر عناصر مؤثر بر خشکسالی هیدرولوژیک را نشان می‌دهد (Rahimi and Mohammadi, 2017). در جدول ۴ مقدار رواناب‌های سطحی تولیدی در زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه ارائه شده است. همانگونه که قبلاً نیز عنوان شده است، مقدار رواناب تولیدی در زیرحوضه‌های دارای ایستگاه هیدرومتری فعال، از طریق مقادیر اندازه‌گیری شده و در زیرحوضه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری، از طریق رابطه نسبت‌ها برآورد شد.

منابع آب سطحی (سد) و آب معادل برف می‌باشد که با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$P = 1 - \frac{r}{n + 1} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)،  $r$  رتبه هر داده در مجموعه داده‌ای مرتب شده به ترتیب نزولی در هر مؤلفه و  $n$  تعداد داده‌های مورد استفاده است. مقادیر این شاخص براساس نظرات شفر و دژمن مطابق جدول ۲ در ۷ کلاس طبقه‌بندی می‌شوند.

Table 2- Drought classification based on SWSI

جدول ۲- کلاس‌بندی خشکسالی براساس شاخص SWSI

Class	Criterion	Drought description
A	4.00 or more	Wet
B	3.99 to 1.99	Abundant supply
C	2.00 to -0.99	Near normal
D	-1.00 to -1.99	Incipient drought
E	-2.00 to -2.99	Moderate drought
F	-3.00 to -3.99	Severe drought
G	-4.00 and less	Extreme drought

Table 3- Average rainfall in the studied sub basins (MCM)

جدول ۳- متوسط بارندگی در سطح زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه (میلیون مترمکعب)

Sub basins	Period									
	Oct 2009 to Sept 2010	Oct 2010 to Sept 2011	Oct 2011 to Sept 2012	Oct 2012 to Sept 2013	Oct 2013 to Sept 2014	Oct 2014 to Sept 2015	Oct 2015 to Sept 2016	Oct 2016 to Sept 2017	Oct 2017 to Sept 2018	Oct 2018 to Sept 2019
Zola Chay	808.1	645.2	593.1	940.5	541.2	792.3	807.9	511.4	972.9	873.6
Kharkhareh Chay	186.7	147.7	121.8	153.0	101.1	161.1	156.3	96.4	165.3	166.7
Shivsan Chay	208.6	181.3	135.7	181.0	123.4	184.5	161.4	109.3	194.2	207.5
Nazloo Chay	698.7	621.1	486.0	663.2	466.0	634.7	630.4	447.8	722.4	833.5
Rozeh Chay	193.9	157.2	126.4	152.3	126.2	167.2	159.7	109.5	172.8	220.4
Shahar Chay	292.0	249.4	218.8	278.1	223.9	299.6	298.6	214.4	305.5	386.4
Barandooz Chay	572.4	474.5	508.6	630.6	497.0	652.4	664.9	551.3	667.9	883.0
Rashakan-Talkhab	108.6	105.4	73.8	130.2	103.1	133.6	125.1	96.0	159.6	197.4
Gadar Chay	686.3	665.7	563.2	807.4	660.1	872.2	813.2	638.7	841.0	1189.6
Mahabad Chay	665.9	615.0	479.4	663.8	522.5	678.6	626.6	489.6	732.5	919.2
Simineh Rood	1355.9	1238.0	1142.1	1416.0	1085.1	1628.5	1561.1	1134.7	1710.4	2189.3
Leylan Chay	741.7	615.9	388.9	547.1	494.9	612.6	577.1	349.4	623.5	809.9
Zarrineh Rood	3311.7	2675.4	2652.0	2583.3	2289.1	2742.1	2878.2	2291.0	3499.9	4286.0

**Table 4- Runoff in the studied sub basins (MCM)**  
**جدول ۴- رواناب‌های سطحی تولیدی در زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه (میلیون مترمکعب)**

Sub basin	Period									
	Oct 2009 to Sept 2010	Oct 2010 to Sept 2011	Oct 2011 to Sept 2012	Oct 2012 to Sept 2013	Oct 2013 to Sept 2014	Oct 2014 to Sept 2015	Oct 2015 to Sept 2016	Oct 2016 to Sept 2017	Oct 2017 to Sept 2018	Oct 2018 to Sept 2019
Zola Chay	8.6	3.7	4.9	2.9	10.0	0.0	4.5	11.6	0.4	68.6
Kharkhareh Chay	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.8	0.4
Shivsan Chay	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.9	0.4
Nazloo Chay	178.1	164.7	69.2	159.8	43.7	55.9	145.8	165.4	112.3	337.2
Rozeh Chay	19.6	13.7	9.9	18.2	10.5	18.1	18.8	17.0	17.8	42.5
Shahar Chay	29.0	11.8	31.8	34.8	14.3	8.4	5.4	30.0	48.6	76.3
Barandooz Chay	210.2	144.6	127.0	164.4	87.1	117.9	148.6	202.6	159.4	306.9
Rashakan-Talkhab	1.1	0.8	1.0	1.6	1.0	1.0	1.8	2.3	4.2	2.7
Gadar Chay	154.1	110.6	124.4	189.7	56.1	117.8	232.1	188.2	67.5	378.9
Mahabad Chay	33.5	25.8	32.5	53.0	17.8	13.3	251.1	104.6	75.4	364.2
Simineh Rood	171.4	254.7	261.2	403.4	157.8	220.0	506.7	287.0	294.5	728.4
Leylan Chay	8.3	5.8	4.2	7.7	4.4	7.7	8.0	7.2	7.5	18.0
Zarrineh Rood	710.0	514.4	1183.1	218.6	103.3	166.2	1511.6	771.1	559.9	2040.9

**ج) ذخایر منابع آب سطحی (یا تغییرات ذخایر آب زیرزمینی در زیرحوضه‌های فاقد ذخایر آب سطحی)**

سدهای موجود در محدوده مورد مطالعه، همگی از نوع خاکی با احجام ذخایر متفاوت هستند. بزرگترین سد موجود، سد شهید کاظمی بوکان واقع در زیرحوضه آبریز زرینه رود است (جدول ۵). با توجه به اینکه آب‌های زیرزمینی تابع تغذیه از آب‌های سطحی و جریان‌های زیرزمینی ورودی است، لذا در زیرحوضه‌های فاقد سد، تغییرات ذخایر آب زیرزمینی در آبخوان‌های واقع در هر زیرحوضه در بازه زمانی مورد مطالعه، جایگزین ذخایر آب سطحی شد (Noroozi and Mohammadi, 2016) و مقادیر آن با استفاده از تغییرات تراز آب زیرزمینی در آبخوان‌های موجود در هر حوضه و ضرایب آبدهی ویژه آبخوان‌ها محاسبه شد (جدول ۶).

**د) آب معادل برف**  
 ذخایر برفی، یک پدیده طبیعی در عرض‌های جغرافیایی بالا در طول فصل زمستان می‌باشد (Bavera and De Michele, 2009; Rodell et al., 2004). یکی از دلایل اصلی اهمیت ذخایر برفی، تأمین آب در حوضه‌ها در طول فصل بهار است که معمولاً همزمان با دوره ذوب برف می‌باشد (Durand and Margulis, 2007). به طور معمول ذخایر برفی می‌توانند توسط ویژگی‌های زیادی مانند عمق برف، آب معادل و چگالی برف توصیف شوند (Kuchment et al., 2010; Veatch et al., 2009).

**Table 5- Surface water resources in the sub basins with dams (MCM)**  
**جدول ۵- ذخایر منابع آب سطحی در زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه دارای سد (میلیون مترمکعب)**

Sub basin	Period									
	Oct 2009 to Sept 2010	Oct 2010 to Sept 2011	Oct 2011 to Sept 2012	Oct 2012 to Sept 2013	Oct 2013 to Sept 2014	Oct 2014 to Sept 2015	Oct 2015 to Sept 2016	Oct 2016 to Sept 2017	Oct 2017 to Sept 2018	Oct 2018 to Sept 2019
Zola Chay	0.0	0.0	5.2	28.1	5.2	18.4	42.4	19.6	57.4	53.8
Shahar Chay	142.6	154.0	153.0	153.0	108.0	110.0	156.0	148.0	126.0	180.0
Gadar Chay	61.7	62.5	53.0	41.0	46.0	47.0	26.0	27.6	43.0	26.5
Mahabad Chay	66.0	69.2	51.4	55.3	43.0	44.8	97.0	77.6	88.2	92.0
Zarrineh Rood	381.0	393.0	425.0	334.0	288.0	296.0	365.0	313.0	329.4	367.0

**Table 6- Groundwater volume changes in the sub basins without dams (MCM)**  
**جدول ۶- تغییرات حجم آب زیرزمینی در زیرحوضه‌های آبریز فاقد سد (میلیون مترمکعب)**

Sub basin	aquifer	Period									
		Oct 2009 to Sept 2010	Oct 2010 to Sept 2011	Oct 2011 to Sept 2012	Oct 2012 to Sept 2013	Oct 2013 to Sept 2014	Oct 2014 to Sept 2015	Oct 2015 to Sept 2016	Oct 2016 to Sept 2017	Oct 2017 to Sept 2018	Oct 2018 to Sept 2019
Kharkhareh Chay	Galgachi, Mastakan	0.66	-0.27	-0.68	-0.04	-0.42	-0.62	-0.33	-0.65	-0.49	1.08
Shivsan Chay	Mastakan Kahriz	3.07	-0.03	-1.37	-3.26	-1.39	-0.60	2.87	-0.91	-0.05	8.99
Nazloo Chay	Ourmieh, Sero, Hovarsin, Mastakan	-4.00	0.15	-6.44	3.35	-12.09	-1.85	9.91	-8.82	-10.17	27.95
Rozeh Chay	Ourmieh	-2.52	-0.10	-3.70	1.73	-7.87	-1.16	6.42	-6.01	-7.08	18.34
Barandooz Chay	Ourmieh, Silvana, Salmas	-2.38	0.25	-4.19	1.97	-8.33	-0.95	6.81	-5.82	-7.66	19.68
Rashakan-Talkhab	Rashakan	0.39	0.72	-1.40	-0.80	-0.06	0.18	-0.16	-0.56	0.96	1.62
Simineh Rood	Bookan, Miandoab	0.77	-0.11	0.54	-1.42	-3.08	-0.72	1.43	-4.08	0.38	5.57
Leylan Chay	Miandoab	1.41	0.47	1.35	-0.70	-4.10	-0.63	1.20	-4.84	-0.30	5.37

مدل عموماً برای مطالعه اتمسفر و زمین در راستای موضوع امنیت غذایی استفاده می‌شوند. یکی از مهم‌ترین محصولات این داده، در ارتباط با پوشش برف است. با استفاده از این محصول میزان بارش برف، سطح مناطق برفی، عمق برف و آب معادل برف بصورت آماده در دسترس کاربران قرار گرفته است (Pervez et al., 2020).

تمامی تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های لندست ۷ و ۸ برای ماه‌های آذر تا فروردین سری زمانی مورد مطالعه و با اعمال فیلتر پوشش ابری کمتر از ۴۵ درصد، در سامانه گوگل ارث انجین فراخوانی و مناطق دارای پوشش برفی، با استفاده از شاخص NDSI و اعمال آستانه‌های یادشده، در سامانه مذکور تعیین شود. در شکل ۳ نواحی دارای پوشش برفی براساس مقدار متوسط شاخص NDSI برای دوره آماری مورد مطالعه نشان داده شده است. ارتفاع آب معادل برف نیز از طریق محصول SWE مجموعه داده‌ای FLDAS سازمان فضایی ناسا در سامانه مذکور استخراج شد. در نهایت حجم آب معادل ذخایر برف ارتفاعات، از حاصلضرب مساحت پوشش برف در ارتفاع آب معادل آن محاسبه شد (جدول ۷).

این ویژگی‌ها شاید بطور دقیق بصورت نقطه‌ای قابل اندازه‌گیری باشند ولی امکان پایش تغییرات مکانی و زمانی را نخواهد داشت (Molotch and Margulis, 2008) و همچنین تحقیقات انجام شده، نشان داده است که استفاده از فناوری سنجنش از دور در مطالعات زیست محیطی، می‌تواند با صرف هزینه و زمان کمتر به نتایج دقیق و قابل اعتمادی منجر شود (Abbaszadeh Tehrani et al., 2022)؛ لذا در تحقیق حاضر از تصاویر ماهواره‌ای و سامانه گوگل ارث انجین جهت تعیین مقدار این پارامتر در طول دوره آماری مورد مطالعه استفاده شد؛ بدین منظور ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های لندست ۷ و ۸ به دلیل داشتن قدرت تفکیک مکانی مناسب (۳۰ متر) و بکارگیری شاخص NDSI، وسعت نواحی پوشش برف تعیین گردید.

به منظور برآورد ارتفاع آب معادل برف از محصول SWE مجموعه داده‌ای FLDAS سازمان فضایی ناسا استفاده گردید. این داده‌ها با استفاده از ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و زمینی با دقت مکانی ۱۰ کیلومتری تهیه شده است که پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی مقدار این شاخص با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بیشتر و با استفاده از الگوریتم‌های مربوطه تعیین شود. داده‌های این

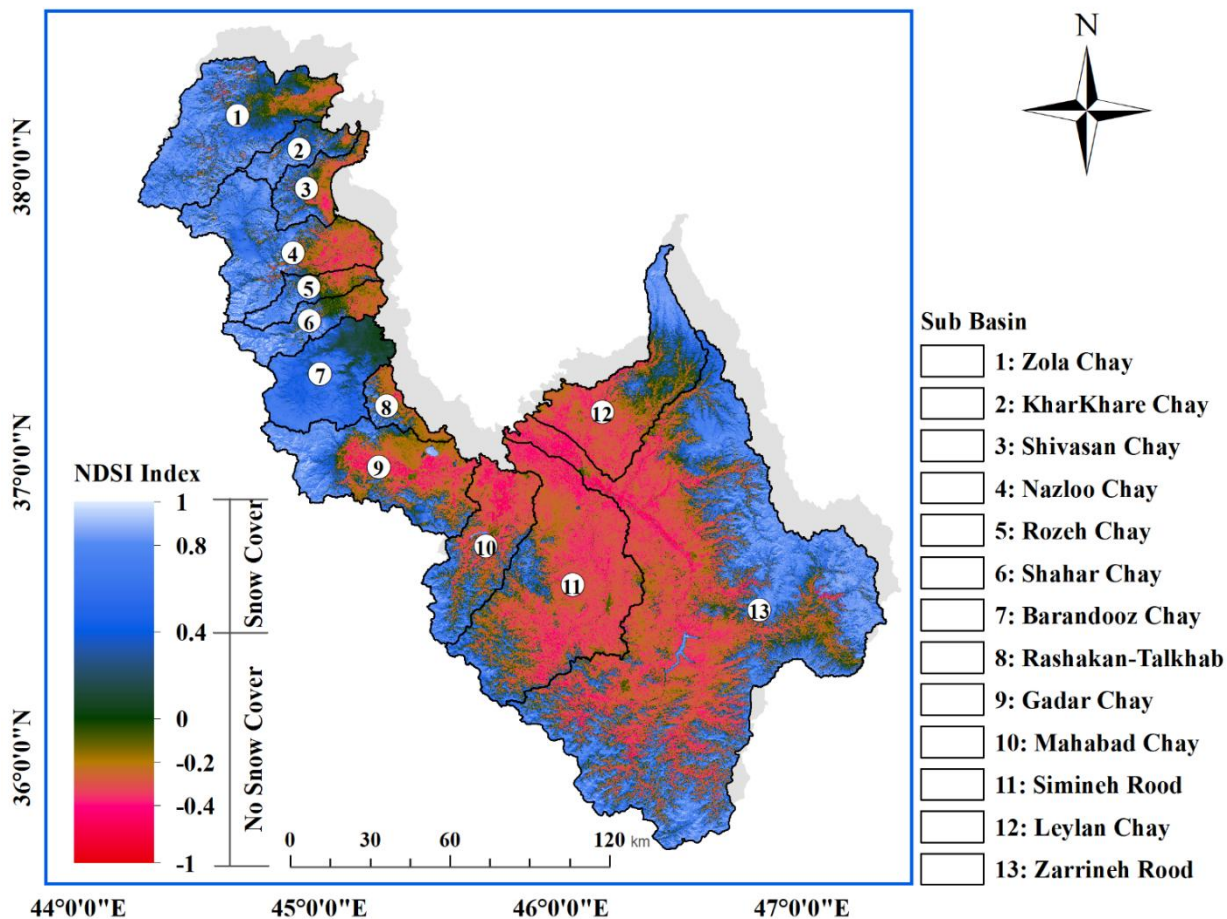


Fig. 3- Mean NDSI index during the study period  
 شکل ۳- متوسط شاخص NDSI در طی دوره زمانی مورد مطالعه

Table 7- Snow water equivalent in the studied sub basins (MCM)  
 جدول ۷- آب معادل برف در زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه (میلیون مترمکعب)

Sub basin	Period									
	Oct 2009 to Sept 2010	Oct 2010 to Sept 2011	Oct 2011 to Sept 2012	Oct 2012 to Sept 2013	Oct 2013 to Sept 2014	Oct 2014 to Sept 2015	Oct 2015 to Sept 2016	Oct 2016 to Sept 2017	Oct 2017 to Sept 2018	Oct 2018 to Sept 2019
Zola Chay	52.64	11.17	12.77	101.91	68.19	40.44	53.15	90.38	57.09	175.08
Kharkhareh Chay	2.26	1.59	1.46	7.62	2.54	1.23	7.18	5.91	2.53	14.41
Shivsan Chay	0.30	0.43	0.48	2.53	1.75	0.63	4.57	3.47	1.35	7.77
Nazloo Chay	21.16	18.36	15.91	74.01	34.18	18.73	77.68	50.95	30.76	138.53
Rozeh Chay	1.35	2.65	3.56	9.56	6.03	1.71	15.90	13.47	3.65	24.75
Shahar Chay	13.30	10.16	16.57	40.76	21.01	12.87	42.13	39.67	22.07	63.60
Barandooz Chay	15.40	14.29	17.72	33.79	20.03	9.89	42.00	51.98	24.78	74.11
Rashakan-Talkhab	0.14	0.73	0.44	0.40	0.55	0.18	1.91	1.92	0.98	1.49
Gadar Chay	17.37	16.46	26.89	51.56	42.62	14.28	85.75	103.96	51.21	150.94
Mahabad Chay	34.79	38.61	36.73	4.78	20.69	3.32	12.81	37.63	8.24	15.78
Simineh Rood	80.00	92.71	97.60	35.05	86.30	37.44	85.44	119.08	61.52	36.06
Leylan Chay	28.02	36.04	24.44	24.35	59.04	15.18	37.63	94.44	66.30	64.70
Zarrineh Rood	132.10	140.20	157.50	88.20	151.30	55.40	112.10	160.70	115.80	326.40

### ۲-۴-۳- تعیین احتمال تجاوز از حد هر یک از داده‌ها

با تهیه و جمع‌آوری هر یک از پارامترهای شاخص، احتمال تجاوز از حد هر یک داده‌ها در مجموعه داده‌ای در طی دوره آماری مورد مطالعه با استفاده از رابطه (۱۰) تعیین شد.

مؤلفه‌های جریان‌های سطحی و آب معادل برف در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

#### ۳-۱- وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی در زیرحوضه‌های

##### آبریز مورد مطالعه براساس شاخص SWSI

طبق نتایج حاصله از شاخص مذکور در محدوده مورد مطالعه (جدول ۱ پیوست) و نمودارهای شکل ۴ از سال آبی ۸۹-۱۳۸۸ تا سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ (از اکتبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۹) در هیچ یک از زیرحوضه‌های مورد مطالعه شرایط خشکسالی خیلی مرطوب، خشکی زیاد و خشکی شدید رخ نداده است و بطور کلی در ۵۴ درصد موارد، خشکسالی هیدرولوژیکی نزدیک نرمال، در ۱۹ درصد موارد، خشکسالی هیدرولوژیکی خشکی کم حاکم بوده و خشکسالی هیدرولوژیکی نیمه‌مرطوب و خشکی متوسط به ترتیب با ۱۴ درصد و ۱۳ درصد در رتبه‌های بعدی قرار دارند. همچنین سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ (از اکتبر ۲۰۱۸ تا سپتامبر ۲۰۱۹) مرطوب‌ترین سال آبی و سال‌های آبی ۹۶-۱۳۹۵ (از اکتبر ۲۰۱۶ تا سپتامبر ۲۰۱۷) و ۹۱-۱۳۹۰ (از اکتبر ۲۰۱۱ تا سپتامبر ۲۰۱۲) خشک‌ترین سال‌های آبی بوده‌اند. مضافاً در تمامی زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه به استثنای زیرحوضه آبریز زولاچای، وضعیت هیدرولوژیکی نزدیک نرمال بیشترین وضعیت رخ داده در طول دوره آماری مورد مطالعه است. همچنین، براساس نمودارهای شکل ۴ مشخص شد که تغییرات شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی بطور متوسط در تمامی زیرحوضه‌ها از روند یکسانی تبعیت می‌کند.

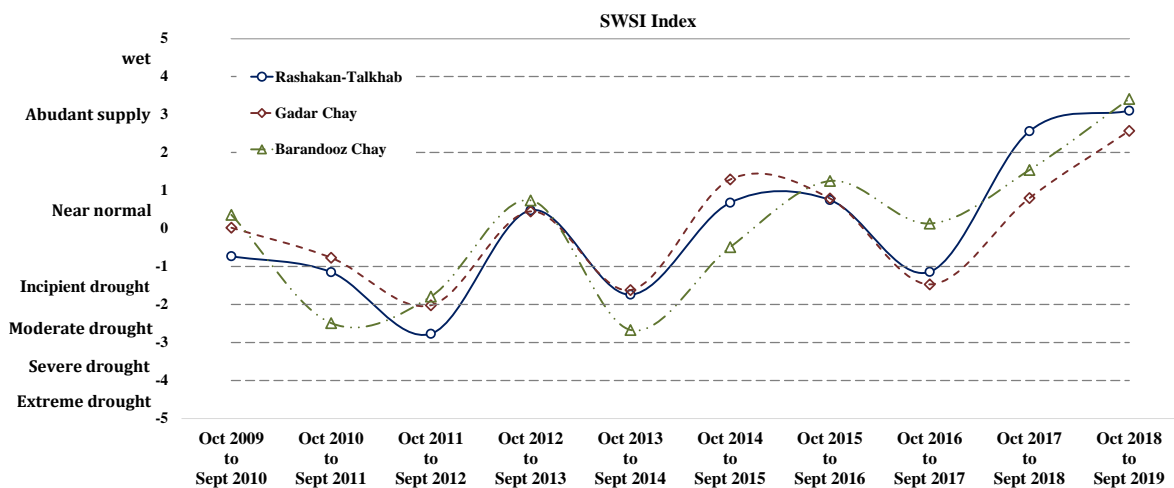
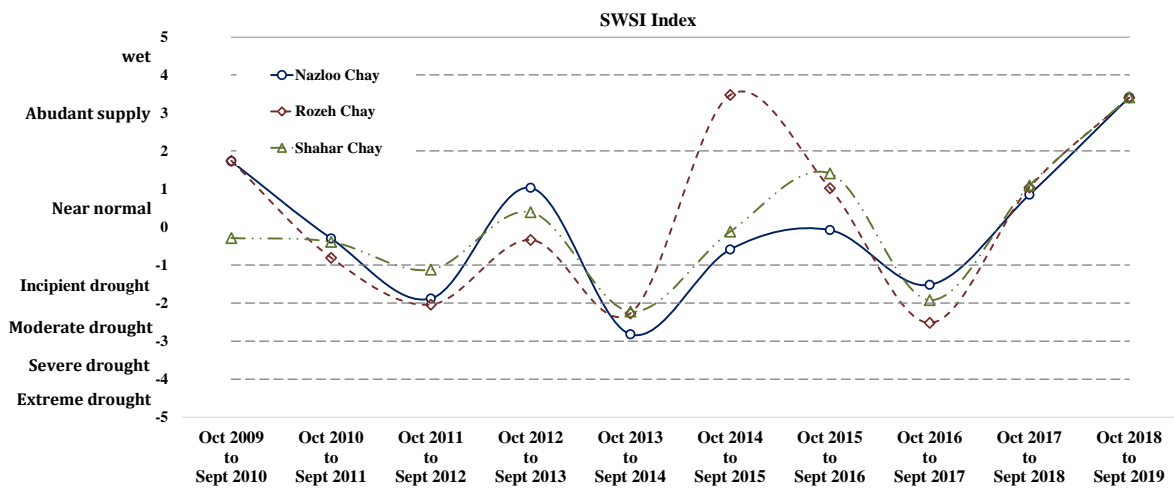
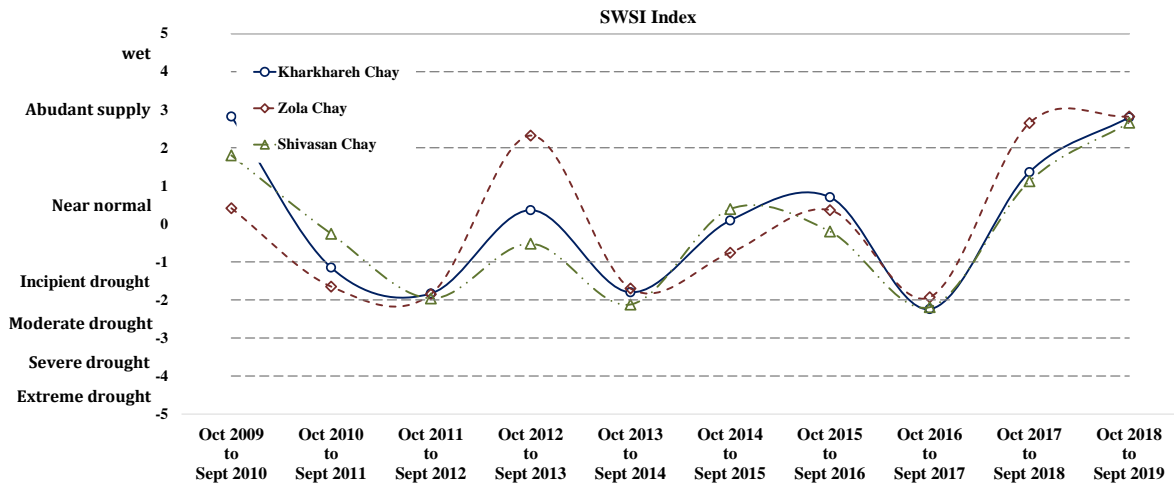
#### ۲-۴-۴- تعیین وزن ضرایب مؤلفه‌ها

یکی از چالش‌های اصلی در تعیین شاخص SWSI، تعیین وزن هر یک از پارامترهای مورد استفاده در این شاخص است که در این تحقیق از روش رتبه‌دهی سلسه مراتبی (AHP) جهت تعیین وزن پارامترها استفاده گردید. همانگونه که قبلاً بیان شده است و نظر به اینکه هرگونه تغییر در شرایط هیدرولوژیکی و مدیریتی (منجمله احداث سد و غیره)، باعث تغییر در الگوریتم این شاخص خواهد شد، لذا با توجه به تفاوت‌های موجود در زیرحوضه‌های مورد مطالعه بلحاظ پارامترهای مورد استفاده در این شاخص، ضرایب هر یک از پارامترها، بطور جداگانه برای هر یک از زیرحوضه‌های مورد مطالعه برآورد شد. بدین منظور ضمن تشریح مختصری از شاخص مورد استفاده و شرایط آب‌هواشناسی، هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی هر یک از زیرحوضه‌ها، پرسش‌نامه‌هایی جهت اخذ نظرات کارشناسی منطبق با روش اجرای AHP تهیه و بین ۱۰ نفر از کارشناسان خبره، توزیع و در نهایت نظرات اخذ شده در نرم‌افزار Expert Choice وارد و وزن نهایی گزینه‌های تصمیم‌گیری به تفکیک زیرحوضه‌های آبریز محاسبه شد (جدول ۸). آنچه که مشخص است در تمامی زیرحوضه‌های مورد مطالعه، براساس نظرات کارشناسان و استفاده از روش رتبه‌دهی AHP، مؤلفه بارش دارای بیشترین وزن نسبی نسبت به سایر مؤلفه‌ها بوده و پس از آن،

Table 8- Weight of parameters using AHP method

جدول ۸- وزن پارامترها با استفاده از روش AHP

Sub basin	Parameter				Consistency Ratio
	Rainfall	Runoff	Dams Or Groundwater	SWE	
Zola Chay	0.701	0.042	0.092	0.165	0.018
Kharkhareh Chay	0.71	0.05	0.03	0.21	0.025
Shivsan Chay	0.677	0.031	0.102	0.19	0.029
Nazloo Chay	0.559	0.288	0.11	0.043	0.032
Rozeh Chay	0.656	0.179	0.031	0.134	0.019
Shahar Chay	0.557	0.066	0.311	0.066	0.031
Barandooz Chay	0.562	0.296	0.037	0.105	0.022
Rashakan-Talkhab	0.684	0.145	0.036	0.135	0.026
Gadar Chay	0.62	0.135	0.139	0.106	0.020
Mahabad Chay	0.681	0.172	0.101	0.046	0.017
Simineh Rood	0.581	0.284	0.029	0.106	0.016
Leylan Chay	0.646	0.032	0.066	0.256	0.027
Zarrineh Rood	0.65	0.103	0.02	0.227	0.019



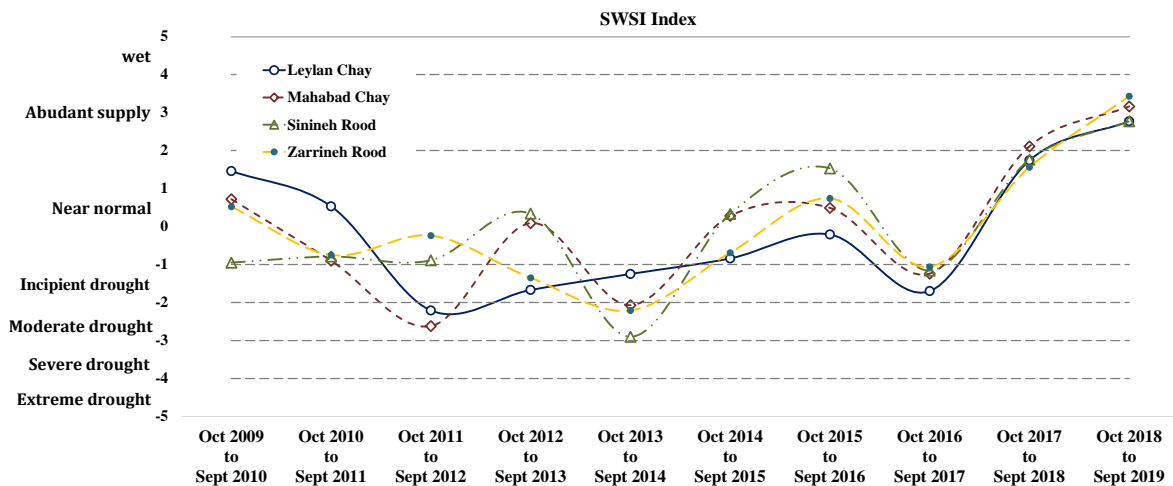
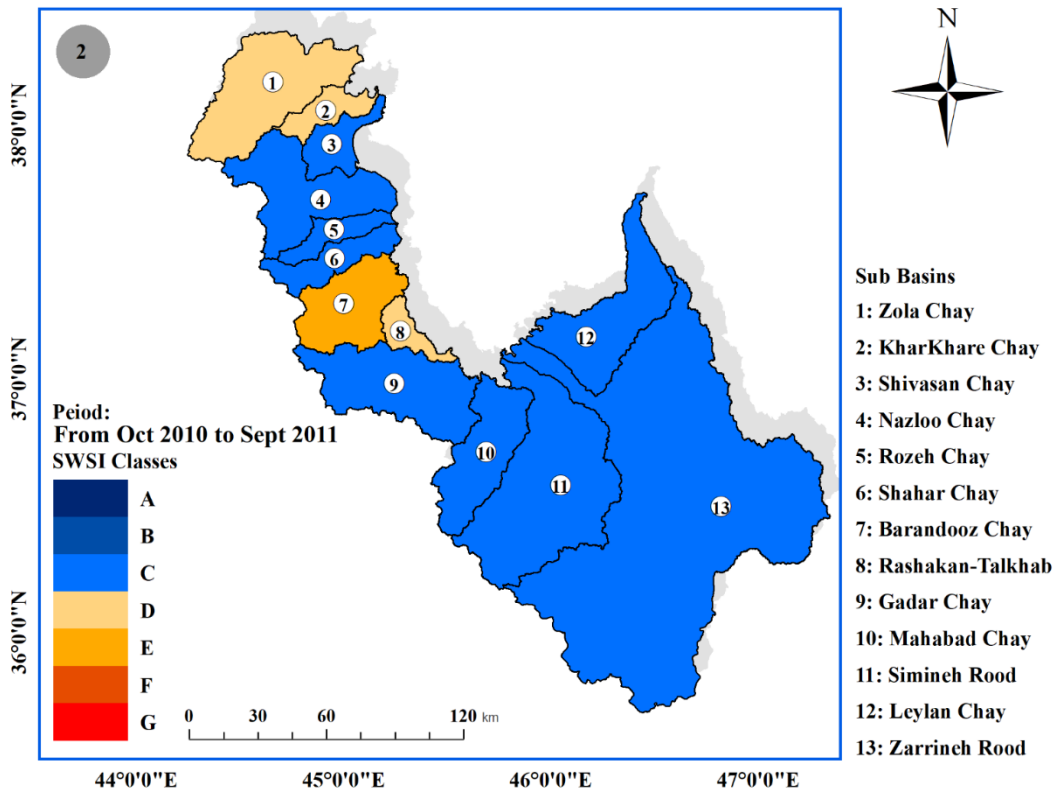
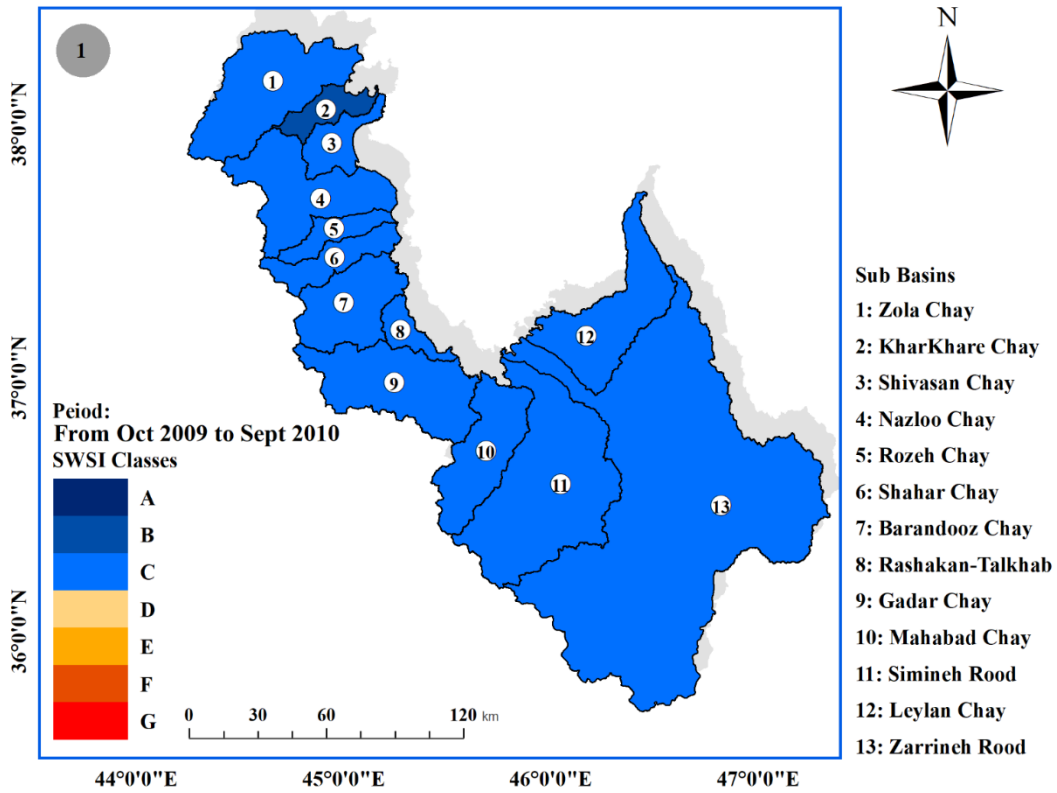


Fig. 4- Trend of SWSI index during the study period in sub basins

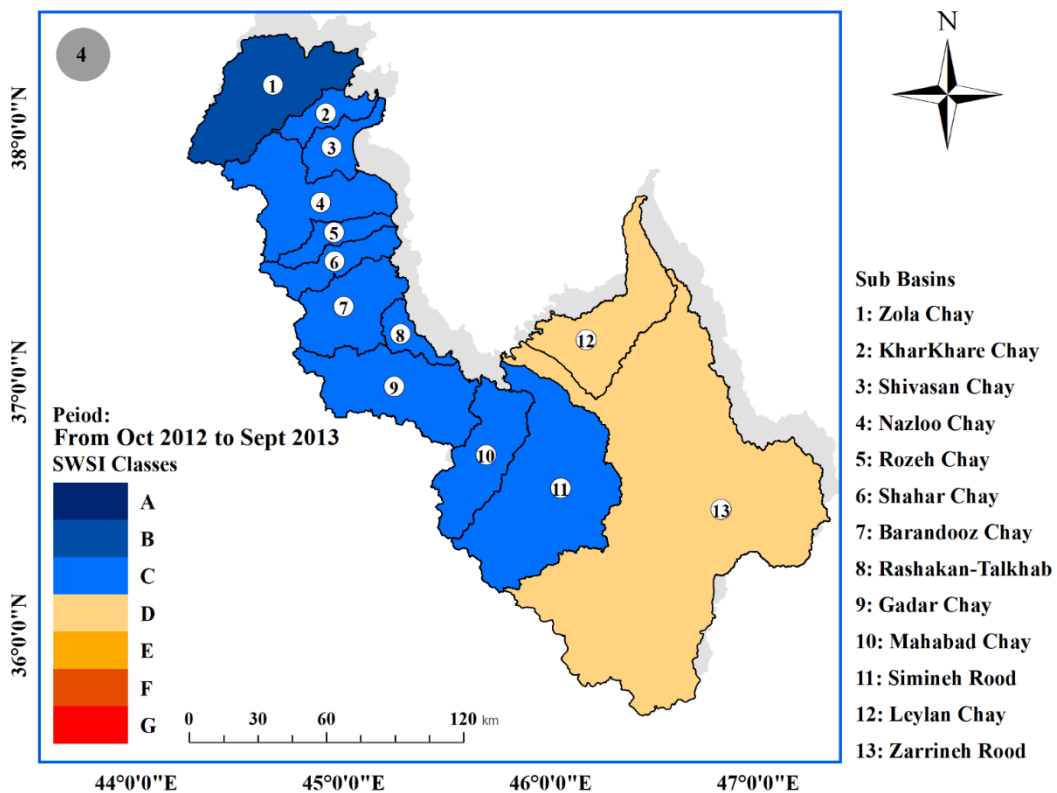
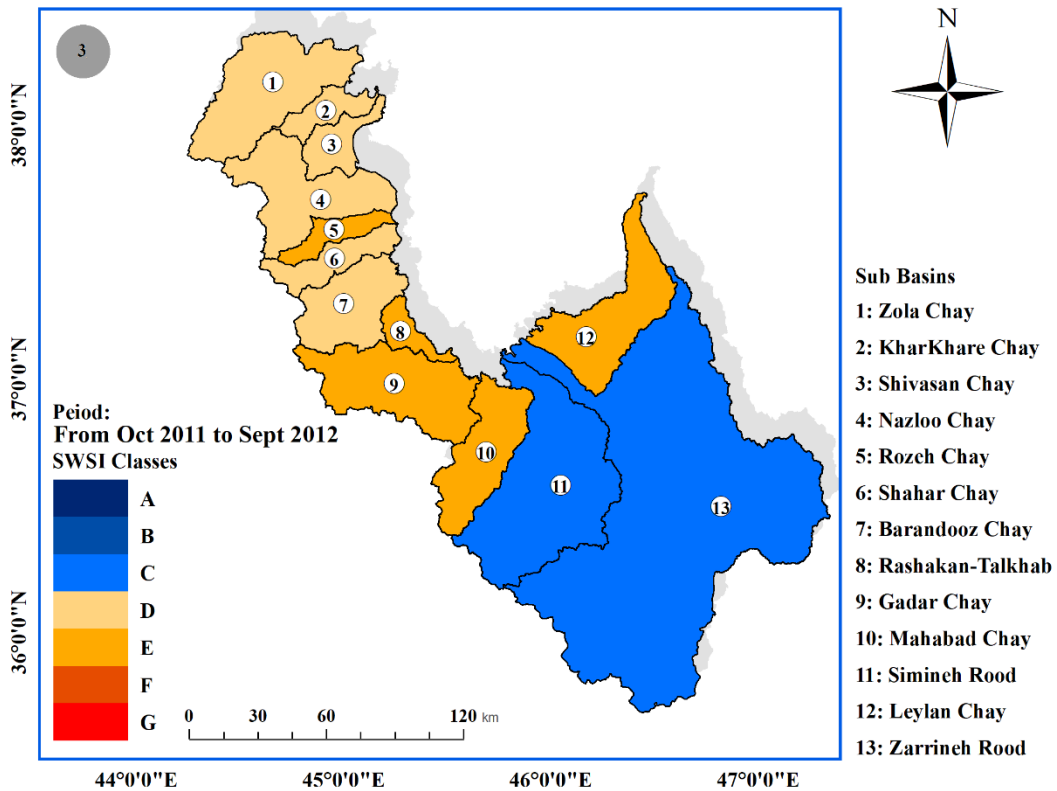
شکل ۴- روند تغییرات شاخص SWSI در طی دوره زمانی مورد مطالعه در زیرحوضه‌های مورد مطالعه

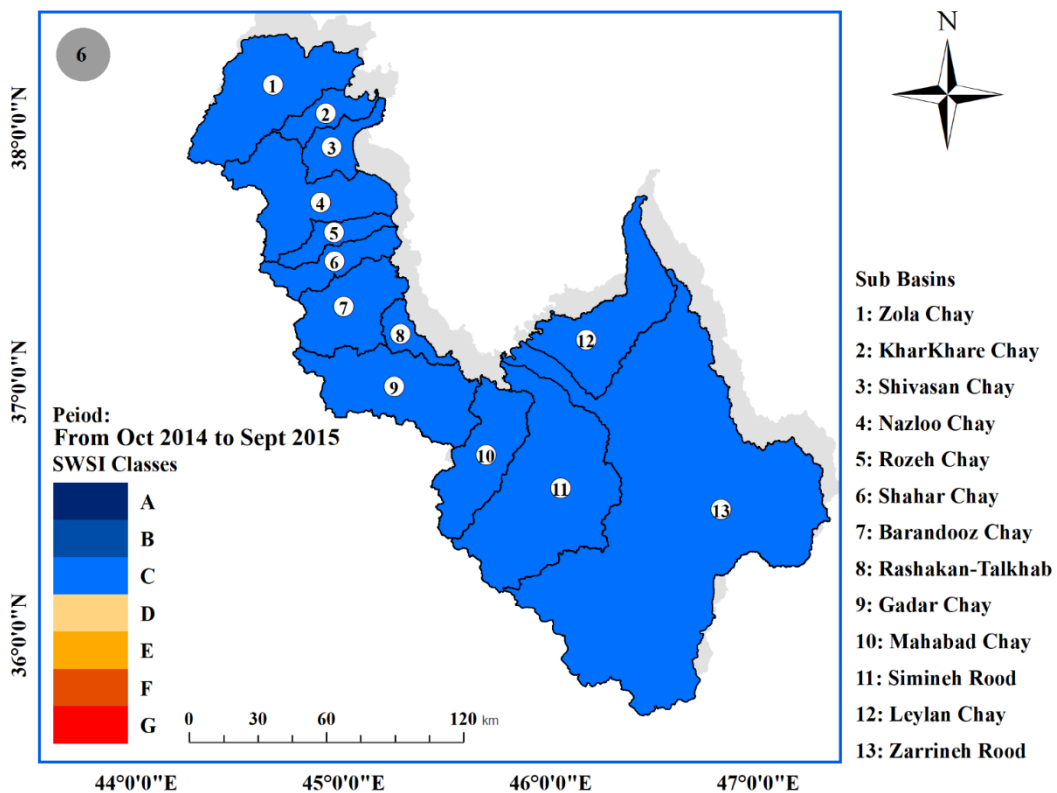
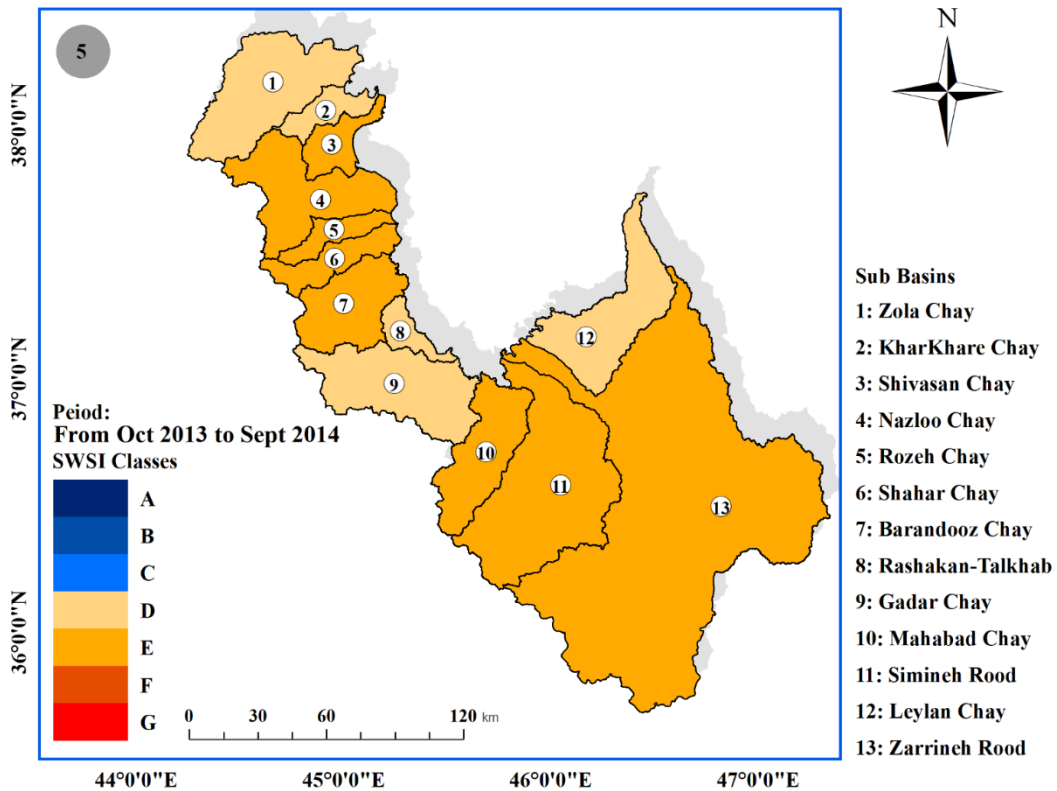
و برعکس در سال آبی ۹۳-۹۴ (از اکتبر ۲۰۱۴ تا سپتامبر ۲۰۱۵) و سال آبی ۹۴-۹۵ (از اکتبر ۲۰۱۵ تا سپتامبر ۲۰۱۶) تمام زیر حوضه‌ها در شرایط نزدیک نرمال قرار داشته‌اند. در سال آبی ۹۵-۹۶ (از اکتبر ۲۰۱۶ تا سپتامبر ۲۰۱۷) بجز زیرحوضه باراندوزچای، سایر زیرحوضه‌ها در شرایط خشکسالی بوده‌اند. از سال آبی ۹۶-۹۷ (از اکتبر ۲۰۱۷ تا سپتامبر ۲۰۱۸)، وضعیت هیدرولوژیکی در تمامی زیر بهیود یافته، بطوریکه در سال ۹۷-۹۸ (از اکتبر ۲۰۱۸ تا سپتامبر ۲۰۱۹)، تمامی زیرحوضه‌ها در شرایط مرطوب قرار دارند. بطور کلی می‌توان عنوان نمود که خشکسالی‌های هیدرولوژیکی بصورت منطقه‌ای در محدوده مورد مطالعه رخ داده است و بلحاظ اکولوژیکی محدوده مورد مطالعه دارای ثبات نبوده و با تغییرات شرایط هیدرولوژیکی، شرایط متفاوتی را به لحاظ خشکسالی هیدرولوژیکی تجربه کرده است.

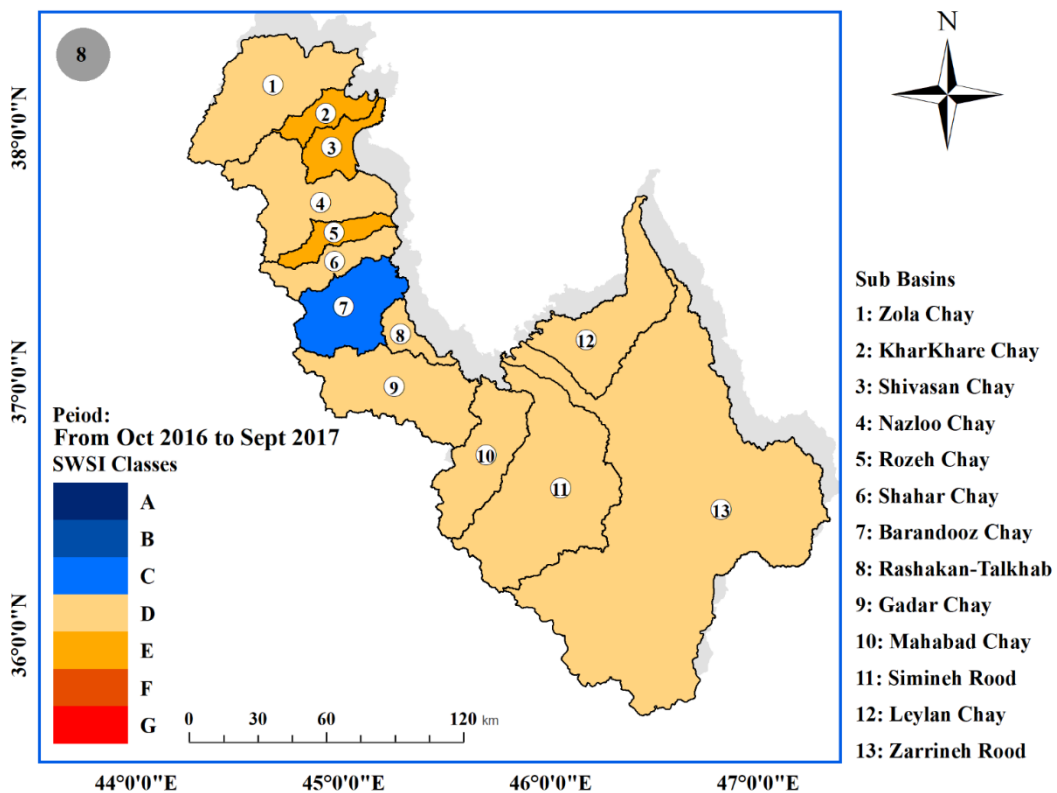
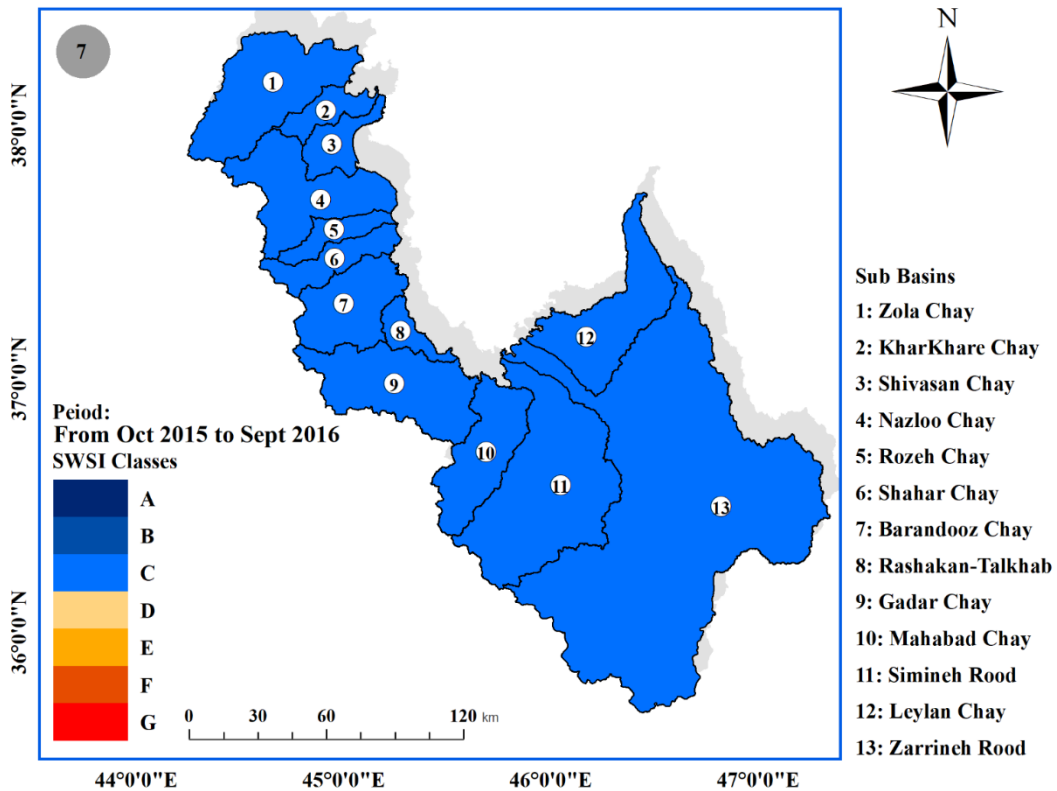
براساس نقشه‌های شکل ۵، در سال آبی ۸۸-۸۹ (از اکتبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۰) تنها زیرحوضه آبریز خرخره‌چای در شرایط نیمه مرطوب قرار داشته و سایر زیرحوضه‌ها در شرایط نزدیک نرمال قرار دارند و در سال آبی ۸۹-۹۰ (از اکتبر ۲۰۱۰ تا سپتامبر ۲۰۱۱)، تنها چهار زیرحوضه (زیرحوضه‌های زولاچای، خرخره‌چای، باراندوزچای و رشکان-تلخاب) شرایط خشکسالی هیدرولوژیکی را تجربه نموده‌اند. در سال آبی ۹۰-۹۱ (از اکتبر ۲۰۱۱ تا سپتامبر ۲۰۱۲)، تنها دو زیرحوضه آبریز سیمینه‌رود و زرینه‌رود در وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی نبوده‌اند و در سال آبی ۹۱-۹۲ (از اکتبر ۲۰۱۲ تا سپتامبر ۲۰۱۳)، دو زیرحوضه آبریز زرینه‌رود و لیلان‌چای وارد شرایط خشکسالی هیدرولوژیکی شده و سایر زیرحوضه‌ها به مراتب وضعیت بهتری را تجربه کرده‌اند. در سال آبی ۹۲-۹۳ (از اکتبر ۲۰۱۳ تا سپتامبر ۲۰۱۴)، تمامی زیرحوضه‌ها وارد شرایط خشکسالی هیدرولوژیکی شده











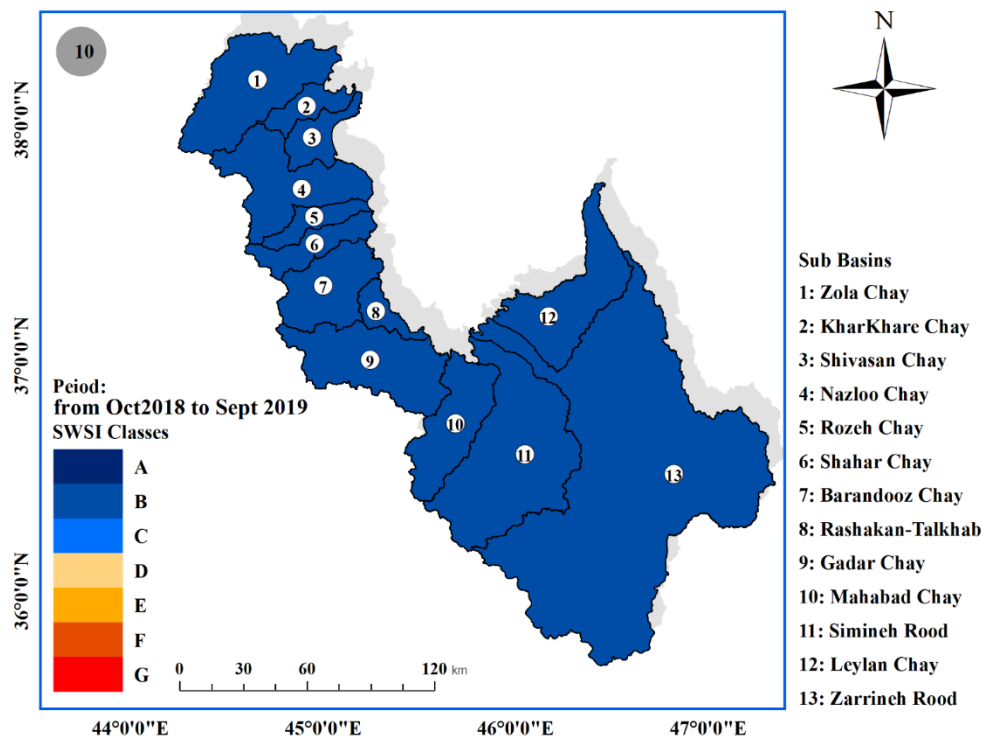
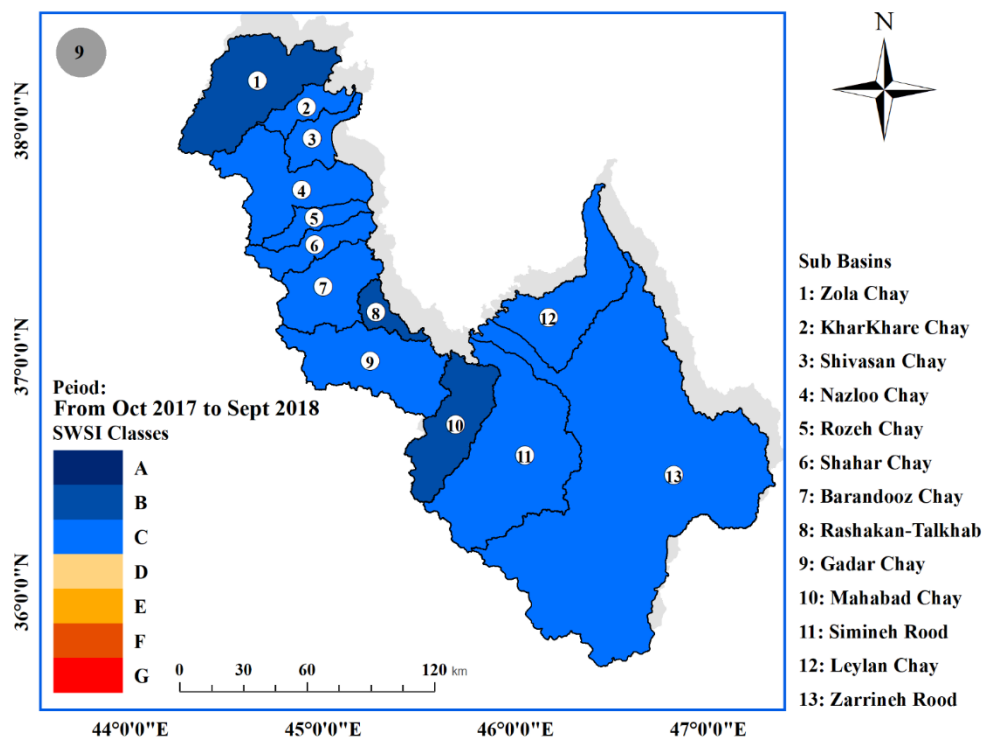


Fig. 5- SWSI index (Class) in sub basins during the study period (1: oct2009 to sept2010, 2: oct2010 to sept2011, 3: oct2011 to sept2012, 4: oct2012 to sept2013, 5: oct2013 to sept2014, 6: oct2014 to sept2015, 7: oct2015 to sept2016, 8: oct2016 to sept2017, 9: oct2017 to sept2018, 10: oct2018 to sept2019)

شکل ۵- کلاس شاخص SWSI در زیرحوضه‌ها طی دوره زمانی مورد مطالعه (۱: سال آبی ۸۹-۸۸، ۲: سال آبی ۹۰-۸۹، ۳: سال آبی ۹۱-۹۰، ۴: سال آبی ۹۲-۹۱، ۵: سال آبی ۹۳-۹۲، ۶: سال آبی ۹۴-۹۳، ۷: سال آبی ۹۵-۹۴، ۸: سال آبی ۹۶-۹۵، ۹: سال آبی ۹۷-۹۶، ۱۰: سال آبی ۹۸-۹۷)

سال‌های آبی ۹۱-۱۳۹۰ (از اکتبر ۲۰۱۱ تا سپتامبر ۲۰۱۲)، ۹۳-۱۳۹۲ (از اکتبر ۲۰۱۳ تا سپتامبر ۲۰۱۴) و ۹۶-۱۳۹۵ (از اکتبر ۲۰۱۶ تا سپتامبر ۲۰۱۷) بطور متوسط وضعیت خشکسالی ضعیف و تنها در سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ (از اکتبر ۲۰۱۸ تا سپتامبر ۲۰۱۹) وضعیت نیمه‌مرطوب حاکم بوده است و براساس نمودار شکل ۷، در تمامی زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه در طی دوره آماری مطالعه، بطور متوسط وضعیت نزدیک نرمال حاکم بوده است و تنها وضعیت خشکسالی مشاهده‌شده، خشکسالی ضعیف بوده است.

نمودارهای شکل ۶ و ۷ روند شاخص SWSI را در زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه در سری زمانی ۱۰ ساله نشان می‌دهد. همانگونه که در نمودار شکل ۶ قابل مشاهده است؛ در سال‌های آبی ۸۹-۱۳۸۸ (از اکتبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۰)، ۹۰-۱۳۸۹ (از اکتبر ۲۰۱۰ تا سپتامبر ۲۰۱۱)، ۹۱-۱۳۹۰ (از اکتبر ۲۰۱۱ تا سپتامبر ۲۰۱۲)، ۹۲-۱۳۹۱ (از اکتبر ۲۰۱۲ تا سپتامبر ۲۰۱۳)، ۹۳-۱۳۹۲ (از اکتبر ۲۰۱۳ تا سپتامبر ۲۰۱۴)، ۹۴-۱۳۹۳ (از اکتبر ۲۰۱۴ تا سپتامبر ۲۰۱۵)، ۹۵-۱۳۹۴ (از اکتبر ۲۰۱۵ تا سپتامبر ۲۰۱۶) و ۹۷-۱۳۹۶ (از اکتبر ۲۰۱۷ تا سپتامبر ۲۰۱۸) بطور متوسط وضعیت نزدیک نرمال بر محدوده مورد مطالعه حاکم بوده است و در

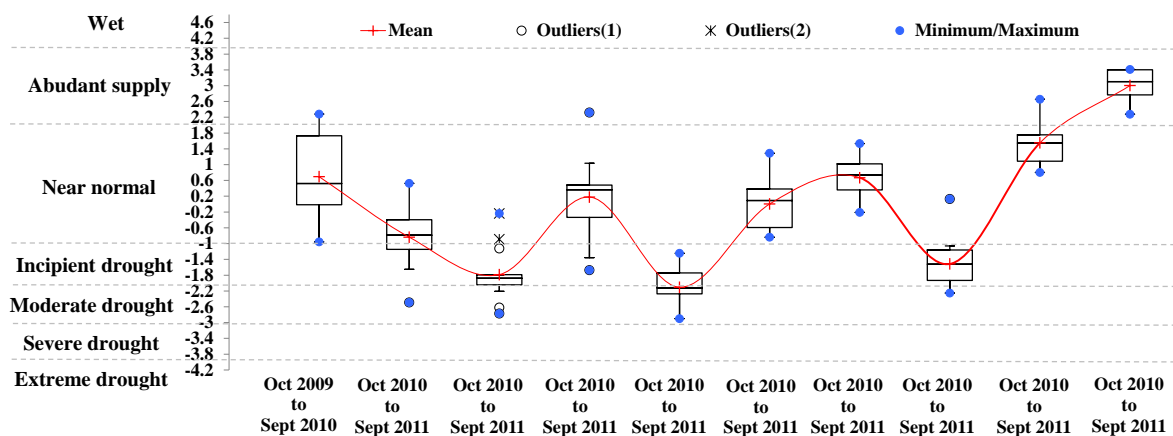


Fig. 6- Box plot diagram of SWSI index by time  
شکل ۶- نمودار جعبه‌ای شاخص SWSI در دوره آماری مطالعه

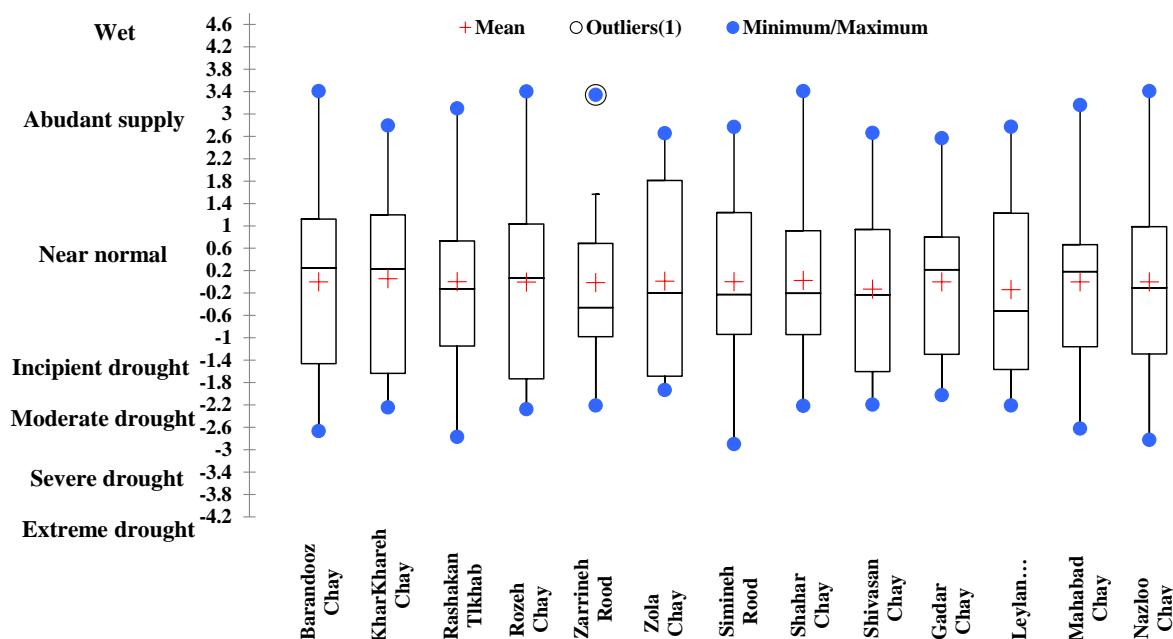


Fig. 7- Box plot diagram of SWSI index by sub basin  
شکل ۷- نمودار جعبه‌ای شاخص SWSI به تفکیک زیرحوضه‌های آبریز

### ۲-۳- فراوانی و دوره بازگشت وضعیت‌های خشکسالی در زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه

نتایج حاصل از محاسبات احتمال وقوع و دوره بازگشت (جدول ۲ پیوست) و نمودار شکل ۸ نشان داد که به طور متوسط طول دوره بازگشت برای شرایط نزدیک نرمال، ۲ سال، برای خشکسالی کم، ۵ سال و برای شرایط نیمه مرطوب و خشکسالی متوسط برابر ۷ سال است. بطور کلی در ۳۲ درصد موارد بررسی شده، شرایط خشکسالی در سطح محدوده مورد مطالعه حاکم است که به عبارتی بطور متوسط هر ۳ سال، یک بار شرایط خشکسالی رخ خواهد داد که نشان‌دهنده ضعف توان اکولوژی محدوده مورد مطالعه و حاکمیت اقلیمی ناپایدار در آن است.

۳-۳- بررسی روند خشکسالی با استفاده از آزمون من-کندال  
نتایج آنالیز روند شاخص SWSI با استفاده از آزمون من-کندال در جدول ۹ نشان داده شده است. برابر آنچه که گفته شد و با توجه به مقادیر Z، تنها در دو زیرحوضه آبریز باراندوزچای و رشکان-تلخاب، فرض صفر مبنی بر عدم وجود روند در سری زمانی، رد و وجود روند صعودی معنی‌دار در وضعیت هیدرولوژیکی (افزایش رطوبت) تأیید می‌شود و در سایر زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه، روند معنی‌داری در وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی مشاهده نمی‌شود.

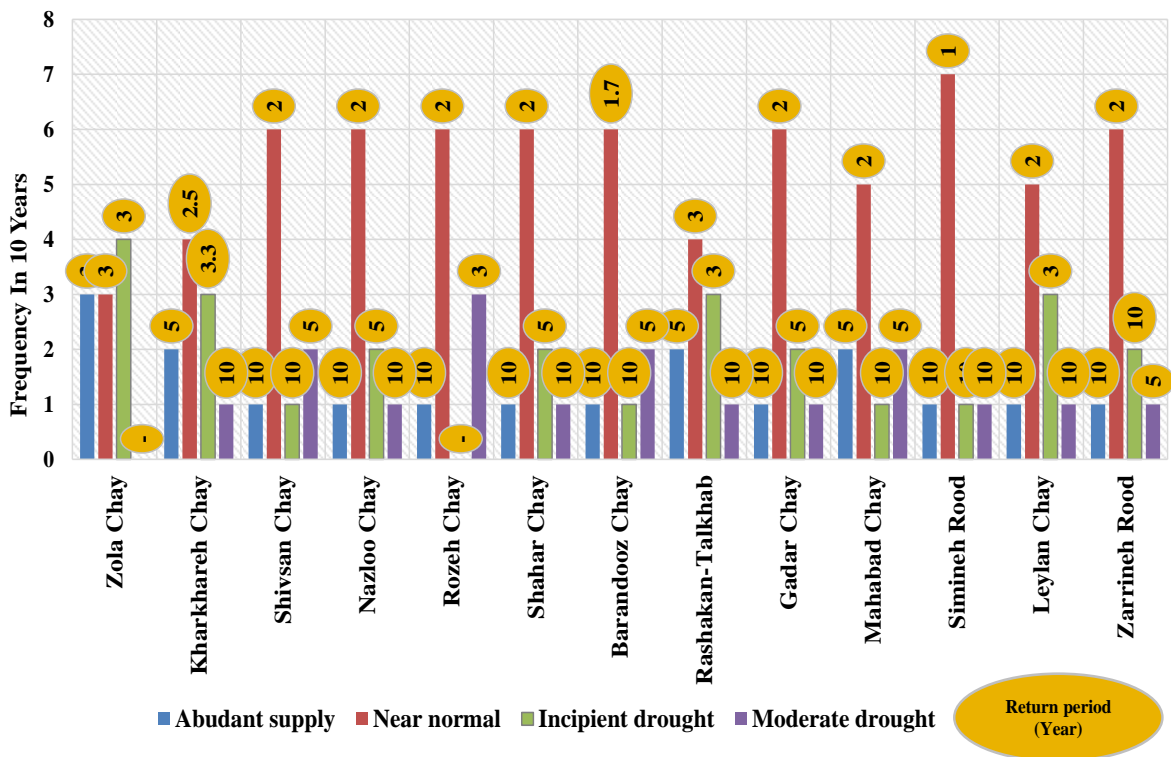


Fig. 8- Frequency and Return period of Drought in sub basins  
شکل ۸- فراوانی و دوره بازگشت خشکسالی در زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه

**Table 9- Analysis of SWSI drought index trend in sub basins in the study period**  
**جدول ۹- آنالیز روند شاخص خشکسالی SWSI در زیرحوضه‌های آبریز در دوره زمانی مورد مطالعه**

Parameter	Sub basin												
	Zola Chay	Kharkhareh Chay	Shivsan Chay	Nazloo Chay	Rozeh Chay	Shahar Chay	Barandooz Chay	Rashakan Talkhab	Gadar Chay	Mahabad Chay	Simineh Rood	Leylan Chay	Zarrineh Rood
S	7.0	9.0	5.0	5.0	11.0	15.0	23.0	25.0	19.0	17.0	21.0	11.0	13.0
Var (S)	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
Z	0.537	0.716	0.358	0.358	0.894	1.252	<b>1.968</b>	<b>2.147</b>	1.610	1.431	1.789	0.894	1.073
trend	No Trend	No Trend	No Trend	No Trend	No Trend	No Trend	+	+	No Trend	No Trend	No Trend	No Trend	No Trend

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

شاخص و سایر شروط تعریف شده، در سامانه مذکور استخراج شد. ارتفاع آب معادل برف نیز از طریق محصول SWE مجموعه داده ماهواره‌ای FLDAS سازمان فضایی ناسا، در سامانه یاد شده استخراج شد. پس از تکمیل داده‌های موردنیاز، احتمال وقوع هر یک از داده‌ها در سری زمانی مربوطه، محاسبه و سپس وزن هر یک از مؤلفه‌ها با استفاده از روش وزن‌دهی سلسله مراتبی (AHP) و با اخذ نظرات کارشناسی و تهیه ماتریس مقایسه زوجی اهمیت مؤلفه‌ها در شاخص SWSI، در محیط نرم‌افزار Expert Choice تعیین شد بر این اساس، بطور متوسط مؤلفه باران با وزن نسبی ۶۴٪ مهمترین عامل در رخداد خشکسالی بوده و پس از آن رواناب‌های سطحی با ۱۴٪، آب معادل برف ۱۳/۸٪ در رتبه‌های بعدی قرار داشته و مؤلفه ذخایر آب سطحی (ذخایر آب زیرزمینی) دارای کمترین تأثیر در کنترل خشکسالی هستند. با در دست داشتن مقادیر کلیه مؤلفه‌های شاخص SWSI، شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی در هر یک از زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه با استفاده از رابطه مربوطه محاسبه شد.

تحقیق حاضر به منظور بررسی وضعیت هیدرولوژیکی زیرحوضه‌های آبریز رودخانه‌های غرب حوضه آبریز دریاچه ارومیه در استان آذربایجان غربی با استفاده از شاخص SWSI انجام شد. در این شاخص چهار مؤلفه بارندگی، رواناب‌های سطحی، ذخایر منابع آب سطحی و آب معادل برف، در طی دوره آماری سال آبی ۸۹-۱۳۸۸ تا ۹۸-۱۳۹۷ با استفاده از رابطه مربوطه و وزن نسبی هر مؤلفه با یکدیگر ترکیب شدند. متوسط بارندگی سالانه در هر یک از زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه با استفاده از مقادیر باران روزانه اندازه‌گیری شده در ۸۶ ایستگاه فعال موجود در منطقه محاسبه شد. نرخ جریان‌های سطحی تولیدی در هر یک از زیرحوضه‌های آبریز با استفاده از میزان دبی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در منتهی‌الیه حوضه‌ها و رابطه مساحت‌ها استخراج شد. ذخایر آب سطحی در زیرحوضه‌های آبریز زربینه‌رود، زولاچای، شهرچای، گدارچای و مهابادچای بر اساس میزان جریان سطحی ورودی به دریاچه پشت سد بدست آمد و در زیرحوضه‌های فاقد ذخایر آب سطحی (سد)، تغییرات ذخایر آب زیرزمینی در آبخوان‌های حوضه، جایگزین این مؤلفه شد. این عمل با در نظر گرفتن تغییرات تراز هیدروگراف واحد آبخوان‌ها و ضرایب ذخیره آبخوان‌ها صورت گرفت. با توجه به اینکه اطلاعات مدون و دقیق اندازه‌گیری شده از میزان پوشش‌های برفی و آب معادل آن در سطح زیرحوضه‌های آبریز در دسترس نیست؛ لذا در این تحقیق برای برآورد مساحت نواحی پوشیده از برف، از تصاویر ماهواره سنجنده‌های لندست ۷ و ۸ استفاده شد؛ بدین منظور کلیه تصاویر ماهواره‌ای مذکور برای ماه‌های آذر تا فروردین سال‌های آبی ۸۹-۱۳۸۸ تا ۹۸-۱۳۹۷ (از اکتبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۹) در سامانه تحت وب Google Earth Engine فراخوانی شده و سپس مساحت نواحی دارای پوشش برف با استفاده از شاخص NDSI و لحاظ نمودن مقادیر حدی بالای ۰/۴ این

طبق نتایج حاصل از شاخص مذکور طی دوره آماری ۱۰ سال آبی در محدوده مورد مطالعه، در هیچ یک از زیرحوضه‌های مورد مطالعه، شرایط مرطوب، خشکسالی زیاد و خشکسالی شدید رخ نداده است و بطور کلی در ۵۴ درصد موارد شرایط نزدیک نرمال، در ۱۹ درصد موارد شرایط خشکسالی کم حاکم بوده و شرایط مرطوب و خشکسالی متوسط به ترتیب با ۱۴ درصد و ۱۳ درصد در رتبه‌های بعدی قرار دارند. همچنین، سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ (از اکتبر ۲۰۱۸ تا سپتامبر ۲۰۱۹) مرطوب‌ترین سال آبی و سال‌های آبی ۹۶-۱۳۹۵ (از اکتبر ۲۰۱۶ تا سپتامبر ۲۰۱۷) و ۹۱-۱۳۹۰ (از اکتبر ۲۰۱۱ تا سپتامبر ۲۰۱۲) خشک‌ترین سال‌های آبی بوده‌اند. مضافاً تمامی زیرحوضه‌های آبریز مورد مطالعه، به استثنای حوضه آبریز زولاچای، وضعیت هیدرولوژیکی

حاصل از تحقیق حاضر با نتایج تحقیق انجام شده توسط Abbaszadeh Tehrani et al. (2022) در خصوص تغییر وضعیت سلامت اکوسیستم حوضه آبریز دریاچه ارومیه، از بسیار ضعیف به ضعیف در بازه زمانی مورد مطالعه و تغییرات آن از بسیار ضعیف در سطح حوضه، همخوانی مناسبی دارد. از جمله محدودیت‌های تحقیق انجام شده استفاده از محصول آماده آب معادل برف مجموعه داده‌ای FLDAS سازمان فضایی ناسا با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ کیلومتری بود که پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی مقدار این مؤلفه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بیشتر و براساس الگوریتم‌های مربوطه برآورد شد.

نزدیک نرمال بیشترین وضعیت رخ داده در طول دوره آماری مورد مطالعه بوده است. نتایج حاصل از محاسبات احتمال وقوع و دوره بازگشت نشان داد که به طور متوسط طول دوره بازگشت برای شرایط نزدیک نرمال ۲ سال، برای خشکسالی کم ۵ سال و برای شرایط نیمه مرطوب و خشکسالی متوسط برابر ۷ سال است. بررسی روند موجود در سری زمانی شاخص SWSI با استفاده از آزمون ناپارمتری من-کندال، نشان داد که تنها در زیرحوضه‌های آبریز باراندوزچای و رشکان-تلخاب روند صعودی معنی‌دار در وضعیت هیدرولوژیکی حوضه (افزایش رطوبت) موجود بوده و سایر زیرحوضه‌ها فاقد روند معنی‌دار در وضعیت شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی می‌باشند. نتایج

## پیوست‌ها

**Table 1- Frequency and Return period of Drought sub basins**

جدول ۱- فراوانی و دوره بازگشت خشکسالی در زیرحوضه‌های آبریز

Sub basin	Drought description													
	Wet		Abudant supply		Near normal		Incipient drought		Moderate drought		Severe drought		Extreme drought	
	Frequency	Return period (Years)	Frequency	Return period (Years)	Frequency	Return period (Years)	Frequency	Return period (Years)	Frequency	Return period (Years)	Frequency	Return period (Years)	Frequency	Return period (Years)
Zola Chay	-	-	3	3	3	3	4	3	-	-	-	-	-	-
Kharkhareh Chay	-	-	2	5	4	2.5	3	3.3	1	10	-	-	-	-
Shivsan Chay	-	-	1	10	6	2	1	10	2	5	-	-	-	-
Nazloo Chay	-	-	1	10	6	2	2	5	1	10	-	-	-	-
Rozeh Chay	-	-	1	10	6	2	-	-	3	3	-	-	-	-
Shahar Chay	-	-	1	10	6	2	2	5	1	10	-	-	-	-
Barandooz Chay	-	-	1	10	6	1.7	1	10	2	5	-	-	-	-
Rashakan-Talkhab	-	-	2	5	4	3	3	3	1	10	-	-	-	-
Gadar Chay	-	-	1	10	6	2	2	5	1	10	-	-	-	-
Mahabad Chay	-	-	2	5	5	2	1	10	2	5	-	-	-	-
Simineh Rood	-	-	1	10	7	1	1	10	1	10	-	-	-	-
Leylan Chay	-	-	1	10	5	2	3	3	1	10	-	-	-	-
Zarrineh Rood	-	-	1	10	6	2	2	10	1	5	-	-	-	-
Mean	-	-	18	7	70	2	25	5	7	7	-	-	-	-



**Table 2- Drought situation in the studied sub basins using SWSI Index**

جدول ۲- وضعیت خشکسالی حوضه‌های آبریز مورد مطالعه براساس شاخص SWSI

Sub basin	Index	Period									
		Oct 2009 to Sept 2010	Oct 2010 to Sept 2011	Oct 2011 to Sept 2012	Oct 2012 to Sept 2013	Oct 2013 to Sept 2014	Oct 2014 to Sept 2015	Oct 2015 to Sept 2016	Oct 2016 to Sept 2017	Oct 2017 to Sept 2018	Oct 2018 to Sept 2019
Zola Chay	Value of the index	0.41	-1.65	-1.85	2.32	-1.7	-0.76	0.36	-1.93	2.65	2.82
	Class	C	D	D	B	D	C	C	D	B	B
Kharkhareh Chay	Value of the index	2.82	-1.15	-1.83	0.36	-1.80	0.09	0.70	-2.24	1.36	2.80
	Class	B	D	D	C	D	C	C	E	C	B
Shivasan Chay	Value of the index	1.80	-0.26	-1.96	-0.52	-2.12	0.39	-0.20	-2.19	1.12	2.66
	Class	C	C	D	C	E	C	C	E	C	B
Nazloo Chay	Value of the index	1.73	-0.30	-1.88	1.03	-2.82	-0.59	-0.08	-1.52	0.85	3.41
	Class	C	C	D	C	E	C	C	D	C	B
Rozeh Chay	Value of the index	1.74	-0.81	-2.04	-0.34	-2.27	3.47	1.02	-2.52	1.04	3.40
	Class	C	C	E	C	E	C	C	E	C	B
Shahar Chay	Value of the index	-0.29	-0.39	-1.12	0.39	-2.22	-0.12	1.41	-1.92	1.09	3.41
	Class	C	C	D	C	E	C	C	D	C	B
Barandooz Chay	Value of the index	0.36	-2.49	-1.79	0.74	-2.67	-0.49	1.25	0.13	1.54	3.41
	Class	C	E	D	C	E	C	C	C	C	B
Rashakan-Talkhab	Value of the index	-0.73	-1.15	-2.77	0.48	-1.74	0.68	0.75	-1.14	2.56	3.10
	Class	C	D	E	C	D	C	C	D	B	B
Gadar Chay	Value of the index	0.02	-0.77	-2.02	0.45	-1.62	1.29	0.79	-1.47	0.80	2.57
	Class	C	C	E	C	D	C	C	D	C	B
Mahabad Chay	Value of the index	0.72	-0.90	-2.62	0.09	-2.07	0.28	0.49	-1.24	2.11	3.16
	Class	C	C	E	C	E	C	C	D	B	B
Simineh Rood	Value of the index	-0.95	-0.79	-0.89	0.34	-2.90	0.33	1.53	-1.16	1.76	2.77
	Class	C	C	C	C	E	C	C	D	C	B
Leylan Chay	Value of the index	1.46	0.53	-2.21	-1.67	-1.25	-0.84	-0.21	-1.70	1.74	2.77
	Class	C	C	E	D	D	C	C	D	C	B
Zarrineh Rood	Value of the index	0.52	-0.75	-0.24	-1.35	-2.21	-0.69	0.74	-1.06	1.56	3.43
	Class	C	C	C	D	E	C	C	D	C	B

- 5- Analytical Hierarchy Process
- 6- Application Programming Interface
- 7- Snow Water Equivalent
- 8- Mann
- 9- Kendall
- 10- Famine Land Data Assimilation System

بی‌نوشت‌ها

- 1- Supply Water Surface Index
- 2- Multi Process-Positive Mathematical Programming
- 3- Normalized Difference Snow Index
- 4- Remotely-Sensed Ecosystem Health Assessment

- Abbaszadeh Tehrani N, Mohd Shafri HZ, Salehi S, Chanussot J and Janalipour M (2022) Remotely-Sensed Ecosystem Health Assessment (RSEHA) model for assessing the changes of ecosystem health of Lake Urmia Basin. *International Journal of Image and Data Fusion* 13(2):180-205
- Araghinejad S (2011) An approach for probabilistic hydrological drought forecasting. *Iran-Water Resources Management* 25(1):191-200 (In Persian)
- Asadi M, Rahimi M, Yazdani M and Peghahfar N (2018) Analysis of seasonal and annual rainfall trends using non-parametric methods (Case study: Kurdistan province). The First National Environment Conference, 22 May, Esfahan (In Persian)
- Azizi G, Rahimi M, Mohammadi H, and Khoshaklagh F (2017) Spatio-temporal variations of snow cover in the southern slope of central Alborz. *Physical Geography Research* 49(3):381-393 (In Persian)
- Barua S (2010) Drought assessment and forecasting using a nonlinear aggregated drought index. Ph.D. Thesis, Victoria University
- Bavera D and De Michele C (2009) Snow water equivalent estimation in the Mallerio basin using snow gauge data and MODIS images and fieldwork validation. *Hydrological Processes: An International Journal* 23(14):1961-1972
- Durand M and Margulis SA (2007) Correcting first-order errors in snow water equivalent estimates using a multifrequency, multiscale radiometric data assimilation scheme. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 112(D13)
- Garen DC (1993) Revised surface-water supply index for western United States. *Journal of Water Resources Planning and Management* 119(4):437-454
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, and Moore R (2017) Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202:18-27
- Haji Azizi S, Kheirkhah Zarkesh MM, and Sharifi E (2011) Suitable site selection for groundwater dams construction using spatial and non spatial analytical hierarchy process (case study: Tafts Pishkuh catchments, Yazd province). *RS and GIS for Natural Resources* 2(2):27-37
- Hall DK, Riggs GA, and Salomonson VV (1995) Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment* 54(2):127-140
- Hall DK, Riggs GA, Salomonson VV, DiGirolamo N E, and Bayr K J (2002) MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment* 83(1-2):181-194
- Hassan QK, Bourque CP, Meng F-R, and Richards W (2007) Spatial mapping of growing degree days: An application of MODIS-based surface temperatures and enhanced vegetation index. *Journal of Applied Remote Sensing* 1(1):013511
- Jabbar A, Othman AA, Merkel B, and Hasan SE (2020) Change detection of glaciers and snow cover and temperature using remote sensing and GIS: A case study of the Upper Indus Basin, Pakistan. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 18:100308
- Jalao ER, Wu T, and Shunk D (2014) A stochastic AHP decision making methodology for imprecise preferences. *Information Sciences* 270:192-203
- Janalipour M, Abbaszadeh Tehrani N, Shafri H, Salehi S, Mohammadzadeh A, and Ghasemi S (2022) Satellite-based monitoring of lake Urmia basin health with focus on its ecosystem regulating services by applying total ecosystem health (TEH) model. *International Journal of Environmental Science and Technology* 19(7):6151-6162
- Khosravi M, Tawassi T, Raispoor K, and Omidi Ghaleh Mohammadi M (2017) A Survey on snow cover variation in mount Zardkooh-Bakhtyare Using Remote Sensing (R.S). *Journal of Hydrogeomorphology* 4(12):25-44 (In Persian)
- Kim Y-O, Lee J-K, and Palmer RN (2012) A drought outlook study in Korea. *Hydrological Sciences Journal* 57(6):1141-1153
- Kuchment LS, Romanov P, and Gelfan A (2010) Use of satellite-derived data for characterization of snow cover and simulation of snowmelt runoff through a distributed physically based model of runoff generation. *Hydrology and Earth System Sciences* 14(2):339-350
- Kwon H-J and Kim S-J (2010) Assessment of distributed hydrological drought based on hydrological unit map using SWSI drought index in South Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering* 14(6):923-929
- Maheras P, Balafoutis C, and Vafiadis M (1992) Precipitation in the central Mediterranean during the last century. *Theoretical and Applied Climatology* 45(3):209-216
- Maroofi S (2003) Comparison of rainfall and river flow data for regional drought studies. 3rd Regional

- Conference on Climate Change, 21 Nov, Esfahan (In Persian)
- Moghimi MM, kouhi E, and Zarei AR (2018) Drought monitoring and forecasting, using RDI index and Markov Chain mathematical model. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 8(3):153-165 (In Persian)
- Molotch NP and Margulis SA (2008) Estimating the distribution of snow water equivalent using remotely sensed snow cover data and a spatially distributed snowmelt model: A multi-resolution, multi-sensor comparison. *Advances In Water Resources* 31(11):1503-1514
- Nolin AW and Liang S (2000) Progress in bidirectional reflectance modeling and applications for surface particulate media: Snow and soils. *Remote Sensing Reviews* 18(2-4):307-342
- Noroozi A and Mohammadi Z (2016) Survey of hydrological drought and its effects on lenjan agricultural region. *Spatial Planning Scientific Research Journal* 6(2):97-116 (In Persian)
- Nouri M, Morid S, Karimi N, and Gholami H (2021) Spatial and temporal variation of temperature and precipitation trends of aras transboundary river basin. *Iran-Water Resources Research* 17(3):104-117
- Nyokabi EW, Wambua RM, and Okwany RO (2021) Evaluation of spatial and temporal hydrological drought using surface water supply index in Malewa river catchment, Naivasha. *Journal of Engineering in Agriculture and the Environment* 6(1):1-8
- Önöz B and Bayazit M (2003) The power of statistical tests for trend detection. *Turkish Journal Of Engineering And Environmental Sciences* 27(4):247-251
- Parhizkari A, Yavari Q, Mahmoodi A, and Bakhshi Khaniki Q (2020) Evaluation of the potential effects of establishing a local water market in the face of drought and water shortage in Tehran Province. *Iran-Water Resources Research* 16(2):151-163 (In Persian)
- Partal T and Kahya E (2006) Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrological Processes: An International Journal* 20(9):2011-2026
- Patel P and Dippallsrani MR (2020) Snow cover area detection using NDSI and Band Ratio Method. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)* 9(7):2278-3075
- Pervez MS, McNally A, Slinski K, Jacob JP, Getirana A, Budde ME, Rowland J, and Jayanthi H (2020) Remote sensing and modeling of water availability in Afghanistan from snow dominated highlands to arid lowlands. *AGU Fall Meeting Abstracts*, Dec, H010-0014
- Poon SKM (2004) Hydrological modelling using MODIS data for snow covered area in the northern boreal forest of Manitoba. M.Sc. Thesis, Department of Geomatics of Science, University of Calgary
- Rahimi D and Mohammadi Z (2017) Assessing the hydrological drought of Zayande Rood Basin. *Geographical Planning of Space* 25(7):221-233 (In Persian)
- Rodell M, Houser P, Jambor U, Gottschalck J, Mitchell K, Meng C-J, Arsenault K, Cosgrove B, Radakovich J, and Bosilovich M (2004) The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society* 85(3):381-394
- Saaty TL (2008) Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences* 1(1):83-98
- Salomonson VV and Appel I (2004) Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. *Remote Sensing of Environment* 89(3):351-360
- Sekhoni NS, Hassan QK, and Sleep RW (2010) Evaluating potential of MODIS-based indices in determining "snow gone" stage over forest-dominant regions. *Remote Sensing* 2(5):1348-1363
- Shaban A (2009) Indicators and aspects of hydrological drought in Lebanon. *Iran-Water Resources Management* 23(10):1875-1891 (In Persian)
- Shafer B and Dezman L (1982) Development of surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought condition in snowpack runoff areas. *Proceeding of the Western Snow Conference*, April, Reno, Nevada
- Shahrokh Vand S, Lashanizand M, and Khakpour M (2009) A survey of hydrological droughts and its relationship with precipitation in the basins of Khorramabad Rivers. *Environmental Based Territorial Planning (Amayesh)* 4(13):71-82 (In Persian)
- Sikandar A, Cheema MJM, Waqas MM, Waseem M, Awan UK, and Khaliq T (2020) Changes in snow cover dynamics over the Indus Basin: Evidences from 2008 to 2018 MODIS NDSI Trends Analysis. *Remote Sensing* 12(17):2782
- Veatch W, Brooks P, Gustafson J, and Molotch N (2009) Quantifying the effects of forest canopy cover on net snow accumulation at a continental, mid-latitude

site. Ecohydrology: Ecosystems, Land and Water  
Process Interactions, Ecohydrogeomorphology  
2(2):115-128

Wambua R, Mutua B, and Raude J (2017)  
Characterization of temporal and spatial drought risk  
events using surface water supply index (SWSI) in a  
tropical river basin. MOJ Civil Engineering 2(2):43-  
50