

## مدل سازی دگرگونی آب‌وهوایی به منظور آشکار سازی دوره‌های خشک‌سالی دریاچه

### نور مبتنی بر رویکردهای دیرینه‌شناسی و پیش‌نگری آینده

طیبه اکبری ازیرانی\*؛ استادیار آب‌وهواشناسی دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران

محمود احمدی؛ دانشیار آب‌وهواشناسی دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران

عباس علی داداشی رودباری؛ دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی شهری دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۰

#### چکیده

هدف این پژوهش پیش‌خشک‌سالی دریاچه نور طی دوره‌های آب‌وهوایی دیرینه، فعلی، و آینده با رهیافتی آماری - مدل‌سازی است. برای دستیابی به این هدف از شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق (SPEI) با کاربست داده‌های پیمونگامی، مدل کلان‌مقیاس فیزیکی آب‌وهوایی (MCM)، و دینامیک سیالات ژئوفیزیکی (GFDL) استفاده شد. سنج‌های RMSE و  $R^2$  نیز برای اعتبارسنجی مدل‌سازی‌ها به کار رفت. نتایج صحت‌سنجی‌های بارش و دما در مقیاس فصلی نشان داد مدل‌سازی‌های دیرینه و پیش‌نگری‌شده کارایی قابل قبولی دارند. به نظر می‌رسد در شرایط دیرینه، با وجود فراوانی بیشتر دوره‌های خشک در فصل تابستان نسبت به فصل زمستان، شدت دوره‌های خشک‌سالی همانند توالی آن در زمستان پیشینه بوده است. افزایش شدت دوره‌های خشک‌سالی در فصول سرد سال نشان داد دوره‌های سرد منطقه مورد مطالعه در حال گرم‌تر شدن هستند و با کاهش بارش و افزایش دمای هوا، به صورت محلی، تبخیر - تعرق در منطقه افزایش یافته است. مقایسه شاخص خشک‌سالی دیرینه و فعلی و آینده نشان می‌دهد هرچند وضعیت دریاچه نور در فصول گرم سال نسبت به دوره دیرینه با کاهش دوره‌های خشک و افزایش دوره‌های تر همراه است، در آینده، فصول گرم با کاهش دوره‌های تر و افزایش چشمگیر دوره‌های خشک همراه خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: بازسازی آب‌وهوایی، دریاچه نور، شاخص SPEI، شمال غرب ایران، مدل MCM، مدل GFDL.

#### مقدمه

خشک‌سالی یکی از مخاطرات بسیار مخرب در جوامع زیستی است. اگرچه خشک‌سالی در اکثر نقاط جهان پدیده‌ای طبیعی است، عواقب زیادی برای بخش‌های اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، و زیست‌محیطی به دنبال دارد. همچنین، خشک‌سالی می‌تواند به کاهش منابع آبی سطحی و زیرسطحی، کاهش کیفیت آب، کاهش محصول، کاهش بهره‌وری از واحد سطح، کاهش تولید برق آبی، دگرگونی‌های نابه‌نجار در زیستگاه‌های ساحلی و فعالیت‌های تفریحی، و ده‌ها و صدها خسارت

دیگر منجر شود (وودهاز و آوریپک<sup>۱</sup> ۱۹۹۸). از آنجا که کشور ما، ایران، سرزمینی خشک و نیمه خشک قلمداد می شود (مسعودیان ۱۳۹۰) منابع آبی از دیرباز مورد توجه بوده اند. طی سال های اخیر تنش های آبی در کشور به شدت تشدید شد. بنابراین، برنامه ریزی های بلندمدت و میان مدت برای مدیریت منابع آبی و زیستگاه های طبیعی امری بسیار حیاتی است. جهت مهار و مقابله با خشک سالی و بیابان زایی مطالعه شرایط آب و هوایی دیرینه ضروری است. روشن است شناخت هر چه دقیق تر شرایط آب و هوایی دیرینه دستیابی ما را به مدل واقع گرایانه تری از آینده تسهیل می کند.

دگرگونی آب و هوایی را می توان عامل اصلی دگرگونی پوشش گیاهی دانست. از دیدگاه دیرینه - محیط شناسی، محیط های دریاچه ای می توانند مناطقی ارزشمند برای ثبت رخداد های آب و هوایی، مانند ترسالی و خشک سالی، باشند. ارزیابی تاریخی پوشش گیاهی و آب و هوا در چنین محیط هایی می تواند برای پایش و پیش گیری آب و هوای آینده راهگشا باشد (عزیزی و همکاران ۱۳۹۲). انتقال از دوره طولانی یخچالی به هولوسن اولیه برای درک ترکیب زیستی شرایط امروزی مناسب است. افزایش دما و بارش ثبت شده در حدود ۱۳۰۰۰ سال پیش را می توان آغازگر گسترش گونه های جنگلی بعد از یک دوره یخچالی طولانی مدت قلمداد کرد (جام ریچوا<sup>۲</sup> و همکاران ۲۰۱۴). در مناطقی که در کواترن در معرض فرسایش یخچالی قرار داشته و اکنون بیرون از قلمرو یخچال هاست چاله های دریاچه ای مختلف به تعداد زیاد دیده می شود. دریاچه نئور، در دامنه غربی تالش (باغرو داغ) در استان اردبیل، یک دریاچه آب شیرین است که درباره منشأ آن دیدگاه های گوناگون وجود دارد. از نظر تکتونیکی، این دریاچه یک گرابن یا چاله فروافتاده است که در اثر عوامل تکتونیکی به وجود آمده است. گسل نئور و گسل غرب دریاچه عامل اصلی تشکیل و تکوین چاله نئور بوده که این گسلها بعد از دوره آئوسن تا کنون همچنان فعال است. از آنجا که گسل های نام برده سنگ های دوره های آئوسن را شکسته اند، سن تقریبی دریاچه نئور همزمان با دوره آئوسن بالایی برآورد شده است (مددی و همکاران ۱۳۸۳).

پژوهش های بسیار با هدف دیرینه - محیط شناسی و کشف سازوکارهای آب و هوایی انجام شده است. در ادامه به برخی از این پژوهش ها با توجه به روش شناسی و اهداف پژوهش اشاره خواهد شد.

وودهاز و آوریپک (۱۹۹۸) تغییرپذیری خشک سالی های ۲۰۰۰ ساله در مناطق مرکزی ایالات متحده آمریکا را با رویکرد دیرینه - آب و هواشناسی مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که احتمال دارد خشک سالی های شدید سال های ۱۹۳۰ و ۱۹۵۰ ایالات متحده در آینده نیز تکرار شود. همچنین، نویسندگان اشاره کردند که افزایش گازهای گلخانه ای در قرن بعدی می تواند یکی از عوامل مهم افزایش خشک سالی ها باشد. ارزیابی خطر خشک سالی با استفاده از شبیه سازی مدل های آب و هوا و داده های دیرینه آب و هوایی پژوهشی است که آیلت<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۴) در ایالات متحده بدان پرداختند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که با ادامه افزایش گازهای گلخانه ای خشک سالی شدیدتری نسبت به ۲۰۰۰ سال گذشته رخ خواهد داد که چالشی عمده برای منابع آبی به دنبال خواهد داشت. ساچین و کر (۲۰۱۶) خشک سالی های خلیج کانادا را با رویکرد دیرینه - آب و هواشناسی، به منظور بررسی دوره های مختلف آب و هوایی آن، مطالعه کردند و در نهایت

1. Woodhouse & Overpeck
2. Jamrichová
3. Ault

راهکارهایی برای سازگاری با شرایط آب‌وهوایی در آینده ارائه دادند. نامبردگان با ارزیابی آب‌وهواشناسی دیرینه و نتایج مدل‌سازی دگرگونی آب‌وهوایی آینده کانادا نشان دادند خشک‌سالی‌ها می‌تواند با شدت و تناوب بیشتر و طولانی‌تر در قرن ۲۱ در کانادا ادامه یابد؛ طوری که انتظار می‌رود دوره‌های زمانی خشک خشک‌تر و دوره‌های مرطوب مرطوب‌تر شوند.

در ایران نیز رکوردهای ارزشمندی از رسوبات سن‌سنجی‌شده دریاچه نئور موجود است که در چندین پژوهش با رویکردها و روش‌های مختلف به کار رفته است. از نتایج مطالعه هشت‌متری مغزه رسوبی دریاچه نئور می‌توان به حاکمیت شرایط آب‌وهوایی نسبتاً خشک در شمال غرب ایران در طی یانگردریاس، در حدود ۱۳۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ سال پیش، اشاره کرد که دگریدیسی در منبع رطوبتی و رژیم فصلی بارش از شروع هولوسن، یعنی حدود ۸۰۰۰ سال پیش، را به دنبال داشته است (شریفی و همکاران ۲۰۱۵). تاریخچه آب‌وهوایی و آب‌شناسی دریاچه نئور، واقع در شمال غرب ایران، از انتهای دوره یخچالی اخیر تا هولوسن میانی (۱۵۵۰۰ تا ۷۵۰۰ سال گذشته)، با استفاده از گرده‌شناسی (پالینولوژی) و موجودات آبی (کایرونومید)، چهار فاز رطوبتی اصلی را نشان داد. آب‌وهوای نسبتاً خشک در حدود ۱۵۵۰۰ تا ۱۲۷۰۰ سال گذشته با فراوانی گیاهان استپی، نظیر درمنه و کوزینیا، و فراوانی موجودات آبی سازگار با آب‌های کم‌عمق هم‌زمان است. در فاز بعدی، طی ۱۲۷۰۰ تا ۱۱۳۰۰ سال پیش موجودات آبی معرف عمق آب بیشتر و محیط آهکی دریاچه حضور داشته‌اند. در این فاز فراوانی گیاهان استپی در حوضه آبریز نئور همچنان ادامه داشته است. این افزایش رطوبت حوضه می‌تواند به دلیل کاهش میزان تبخیر در اثر کاهش دمای فصل تابستان یا ناشی از کاهش طول فصل خشک تابستان در حوضه دریاچه نئور در این فاز باشد. در فاز سوم، طی ۱۱۳۰۰ تا ۸۷۰۰ سال گذشته، شواهد رطوبت کمتر منطقه مورد مطالعه هم‌زمان با تأخیر در گسترش جنگل‌های بلوط حاکی از تداوم شرایط آب‌وهوایی خشک در سرتاسر هولوسن آغازین است و احتمال دارد با اثر تشدید فصلی بارش در ارتباط باشد. فاز چهارم، یعنی حدود ۸۷۰۰ سال پیش، نشانه‌های افزایش سطوح آب منطقه مورد مطالعه هم‌زمان با شروع گسترش جنگل‌های بلوط دیده می‌شود که شاید به دلیل کوتاه شدن دوره خشک تابستان رخ داده باشد (اوبرت<sup>۱</sup> و همکاران ۲۰۱۷). همچنین، شریفی و همکارانش (۲۰۱۷) با بررسی ایزوتوپی و اندازه ذرات، با توجه به ماهیت تغذیه دریاچه، تنها از نزولات جوئی و همچنین مواد آلی یا پیت مغزه، که اجازه نگاه‌داشت و ثبت جزئیات دگرگونی آب‌وهوایی را داده است، نتایج جدیدی از مطالعه دگرگونی آب‌وهوایی و منابع گردوغبار در منطقه داخلی غرب آسیا به دست داده‌اند. این پژوهش نشان داد، علاوه بر دگرگونی اندازه گردوغبارها در طول مغزه رسوبی و در طی زمان، رسوبات گردوغبار در ابتدای دوره هولوسن، یعنی از ۱۱۷۰۰ تا ۶۰۰۰ سال پیش، کاملاً متفاوت با هواویزهای ته‌نشین شده در دریاچه با غلظت بالا در دوره یانگردریاس و میانه هولوسن (۶۰۰۰ سال پیش) است. نتایج نشان داد ترکیب ایزوتوپی گردوغبار رسوب‌یافته در این دریاچه، به‌منزله تابعی از رژیم گردشی هواسپهری غالب در منطقه مورد مطالعه، طی آخرین دوره بین‌یخچالی و هولوسن وجود داشته است. شبیه‌سازی‌های گردش هواسپهری بر فراز منطقه بیانگر این حقیقت است که هم‌زمان با افزایش تابش نیم‌کره شمالی، به دلیل پیکربندی مداری زمین در طول هولوسن اولیه، رودباد غربی در نیم‌کره شمالی در فصل تابستان به سوی عرض‌های بالای نیم‌کره شمالی جابه‌جا شده است. این جابه‌جایی با مقادیر انتشار گردوغبار کمتر به دلیل حضور کمربند گردوغبار افریقایی - آسیایی در

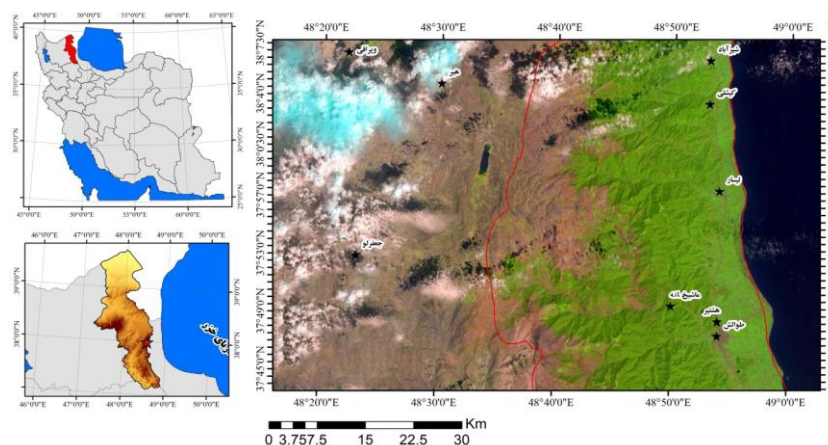
ابتدای هولوسن همراه بوده است. این احتمال وجود دارد که جابه‌جایی اخیر به منابع غنی در صدور گردوغبار از مناطق زیر سلطه گردوغبار در آسیای مرکزی به غرب آسیا منجر شده باشد. برعکس، در طی هولوسن میانی تا دوره حاضر، مناطق غرب و جنوب غرب آسیا و شرق آفریقا منابع گردوغبار غالب بوده‌اند (شریفی و همکاران ۲۰۱۷).

ارزیابی پیشینه پژوهشی مطالعه دیرینه - آب‌وهواشناسی در ایران نشان داد تاکنون پژوهش مستقلی با رویکرد آشکارسازی خشک‌سالی دیرینه - آب‌وهواشناسی همراه پیش‌بینی شرایط آینده انجام نشده است. بنابراین، هدف پژوهش پیش رو پایش خشک‌سالی دریاچه نئور طی دوره‌های آب‌وهوایی دیرینه و فعلی و آینده با رهیافتی آماری - مدل‌سازی است. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به ارائه برنامه‌ها و راهکارهای مفید در رویارویی با دگرگونی‌های آب‌وهوایی بسیار کمک کند.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

دریاچه نئور در محدوده جغرافیایی  $30^{\circ} 37' 55''$  عرض شمالی و  $30^{\circ} 48' 36''$  طول شرقی در ۴۸ کیلومتری جنوب شرقی اردبیل واقع شده است. ارتفاع آن از سطح دریاهای آزاد ۲۴۸۰ متر است. این دریاچه به طور متوسط ۱۸۰۰ متر طول و ۶۵۰ متر عرض دارد و مساحت آن بسته به فصول مختلف سال متغیر است؛ طوری که در فصل گرم و دوره کم‌آبی ۲۱۰ هکتار و در فصول سرد و پرآبی ۲۴۰ هکتار وسعت دارد. آب آن از نوع شیرین است و به طور متوسط ۳ متر عمق دارد (مددی و همکاران ۱۳۸۳). نئور از نظر طبیعی، به دلیل موقعیت استقرار در ارتفاع بیش از ۲۴۰۰ متری و نداشتن ورودی، دریاچه‌ای بکر به شمار می‌رود و فقط از طریق بارش باران و برف تغذیه می‌شود. به همین دلیل، برای مطالعه دیرینه - آب‌وهواشناسی رکوردی قابل اعتماد دارد. موقعیت دریاچه در کشور و استان اردبیل در شکل ۱ می‌آید. به منظور نمایش بهتر منطقه مورد مطالعه از ترکیب رنگی ماهواره LANDSAT8 در ماه ژولای استفاده شد.



شکل ۱. موقعیت دریاچه نئور و پیمونگاه‌های مورد مطالعه (با علامت ستاره) در شمال غرب ایران

## روش‌شناسی

به منظور آشکارسازی خشک‌سالی در دریاچه نئور، سه دوره دیرینه و حال و آینده بررسی شد. برای مطالعه شرایط فعلی دریاچه از داده‌های ثبت‌شده در پیمونگاه‌ها و برای مطالعه شرایط دیرینه و پیش‌نگری آینده از مدل‌های MCM و GFDL استفاده شد. در نهایت، از شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق (SPEI) برای پایش شرایط خشک‌سالی طی سه دوره مطالعاتی و همچنین از سنج‌های RMSE و  $R^2$  برای اعتبارسنجی مدل‌سازی‌ها استفاده شد.

## الف) ارزیابی شرایط آب‌وهوایی فعلی دریاچه نئور

برای ارزیابی شرایط فعلی آب‌وهوایی ترکیبی از داده‌های آب‌وهواشناسی همدید، کليماتولوژی، و باران‌سنجی در دوره زمانی ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۶ میلادی استفاده شد. نزدیک‌ترین پیمونگاه‌ها به دریاچه نئور به ترتیب پیمونگاه‌های همدید (میانه، خلخال، سراب، ماسوله، تالش، بستان‌آباد، مراغه)، پیمونگاه‌های کليماتولوژی (فیروزآباد خلخال، جعفرلو، اسالم، پونل، اسانور)، و پیمونگاه‌های باران‌سنجی (حیدرآباد خلخال، کندروق، حاجی‌سیران، لانبار) هستند. در نهایت، برای مشخص کردن پیمونگاه‌های نزدیک به دریاچه از تابع جست‌وجوی نزدیک‌ترین همسایه<sup>۱</sup> (NNS) در محیط نرم‌افزار ARCGIS استفاده شد و فقط پیمونگاه باران‌سنجی نئور، به دلیل برخوردار نبودن از توالی مناسب داده‌ها، از بین پیمونگاه‌های نزدیک دریاچه حذف شد و نزدیک‌ترین پیمونگاه‌ها مطابق شکل شماره ۱ در نظر گرفته شد. البته ممکن است استفاده از داده‌های حاصل از این پیمونگاه‌ها جهت میان‌یابی، به دلیل نزدیکی به دریای خزر، شرایط آب‌وهوایی نزدیک به دریای خزر را برای دریاچه ایجاد کنند. با وجود این، به دلیل دور بودن سایر پیمونگاه‌ها، نظیر ایستگاه اردبیل، از نزدیک‌ترین پیمونگاه‌ها استفاده شد؛ هرچند به نظر می‌رسد موقعیت دریاچه نئور و قرارگیری در دامنه‌های پشت به باد نیز خود عاملی است که دریاچه کمتر از مشخصه‌های توده‌های هوایی و شرایط کوهستانی منطقه شمال غرب ایران تأثیر پذیرد و استفاده از نزدیک‌ترین پیمونگاه‌ها خطای چندانی در نتایج ایجاد نخواهد کرد. پس از تهیه داده‌های دما و بارش و تبخیر و تعرق از پیمونگاه‌های مورد نظر، با استفاده از روش درون‌یابی کرجینگ، پهنه‌ای به ابعاد ۱۵×۱۵ کیلومتر بر منطقه مورد مطالعه گسترانیده و نزدیک‌ترین یاخته به دریاچه (نئور) انتخاب شد. روش زمین‌آمار کرجینگ روشی مناسب جهت بررسی داده‌های بارش در مناطق دارای افت‌وخیز ارتفاعی زیاد (مناطق کوهستانی) به شمار می‌رود (دل‌هوم<sup>۲</sup> ۱۹۷۸؛ گووارت<sup>۳</sup> ۲۰۰۰؛ عساکره ۱۳۸۷؛ صفرراد و همکاران ۱۳۹۲). به طور خاص، از روش زمین‌آمار کرجینگ می‌توان برای تغییرپذیری بارش نیز استفاده کرد (باران کورت<sup>۴</sup> و همکاران ۱۹۹۲؛ برنه<sup>۵</sup> و همکاران ۲۰۰۴) (شکل ۱). ارزیابی رژیم رطوبتی فصلی کنونی دریاچه، با محاسبه شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق (SPEI)، به صورت فصلی طی ۶۷ سال اخیر انجام شد.

1. Nearest neighbor search
2. Delhomme
3. Goovaerts
4. Barancourt
5. Berne

**ب) مدل سازی آب و هوای دیرینه: مدل فیزیکی کلان مقیاس آب و هوایی<sup>۱</sup> (MCM) (۰ - ۴۰۰۰۰)**

این مدل نوعی مدل آماری است که برایسون<sup>۲</sup> (۱۹۸۹) در میانه دهه ۱۹۹۰ آن را به مثابه جایگزینی برای مدل های تکرارشونده گردش عمومی هوا سپهر<sup>۳</sup> (GCMs) در نظر گرفت. ساختار این مدل برخلاف مدل های گردش عمومی هوا سپهر محلی و وابسته به شرایط محل است (برایسون و دیوال ۲۰۰۷). در این تحقیق داده های آب و هوایی دیرینه با استفاده از داده های آب و هوایی مشاهده ای ۶۷ سال اخیر (۱۹۵۰ - ۲۰۱۶) برای ۴۰۰۰۰ سال گذشته بازسازی و به منظور مطالعه شرایط رطوبتی حوضه دریاچه نئور فقط بازه زمانی ۱۵۰۰۰ سال گذشته تحلیل شد.

**ج) مدل سازی آب و هوای آینده: مدل دینامیکی سیالات ژئوفیزیکی (GFDL) (۲۰۱۸ - ۲۱۰۰ میلادی)**

مدل ارزیابی شده، که برای شرایط آینده دریاچه نئور ارزیابی شده، مدل دینامیکی سیالات ژئوفیزیکی<sup>۴</sup> (GFDL, CM2.1) اداره ملی اقیانوس شناسی و هوا سپهری ایالات متحده آمریکا<sup>۵</sup> (NOAA) است. این نسخه از مدل در سال ۲۰۰۴ توسعه داده شد (دل روث<sup>۶</sup> و همکاران ۲۰۰۶). تفکیک مکانی زمینی (LM2.1) و هوا سپهری (AM2.1) مدل ۲ درجه عرض جغرافیایی در ۲/۵ درجه طول جغرافیایی در ۲۴ تراز قائم هوا سپهری با مختصات پیوندی است (وو<sup>۷</sup> و همکاران ۲۰۱۱). هسته دینامیکی مدل AM2.1 از روش حجم محدود (لین<sup>۸</sup> ۲۰۰۴) استفاده می کند. این مدل برای آزمایش های دگرگونی های آب و هوایی در گزارش ارزیابی پنل بین المللی دگرگونی آب و هوایی<sup>۹</sup> (IPCC AR4) و برنامه علمی دگرگونی آب و هوایی ایالات متحده آمریکا<sup>۱۰</sup> (US CCSP) استفاده و نتایج حاصل از آن تأیید شد. مدل نامبرده نوعی مدل آماری است که حساسیت ۳/۴ کلین در سطح جهانی دارد. علاوه بر این، از داده های روزانه مرکز ملی پیش بینی زیست محیطی - تحقیقات هوا سپهری<sup>۱۱</sup> (NCEP NCAR) (کالنی<sup>۱۲</sup> و همکاران ۱۹۹۶) برای تأیید فعالیت جریان فعلی آب و هوایی در مدل GFDL CM2.1 استفاده شد.

مدل برای دوره ۲۰۱۸ تا ۲۱۰۰ میلادی تحت سناریوی انتشار A1B اجرا شد. علت به کارگیری سناریوی A1B از بین سایر سناریوهای موجود این است که این سناریو بر این باور استوار است که در آینده استفاده از منابع سنگواره ای و غیرسنگواره ای (فسیلی و غیرفسیلی) به تعادل خواهد رسید (شمسی پور ۱۳۹۳). بنابراین، فرض های این سناریو با واقعیت موجود و آینده نزدیک همخوانی بیشتری دارد و درباره نتایج حاصل از آن با اطمینان بیشتری می توان بحث کرد (احمدی و همکاران ۱۳۹۶).

1. Macrophysical Climate Modeling
2. Bryson
3. Global Climate Models
4. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
5. National Oceanic and Atmospheric Administration
6. Delworth
7. Wu
8. Lin
9. Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report
10. US Climate Change Science Program
11. National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research
12. Kalnay

**د) محاسبه شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق<sup>۱</sup> (SPEI)**

شاخص SPEI را نخستین بار ویسنته سرانو<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۰) به کار بردند. شاخص SPEI شاخصی چندکمیته است که در آن داده‌های بارش و دما ترکیب می‌شوند. در این شاخص مقادیر اختلاف بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) به کار می‌رود. این موضوع در واقع معرف تعادل آب‌وهوایی بیلان آبی است که در شاخص SPEI مدّ نظر قرار گرفته است (مصطفی‌زاده و ذیحی ۱۳۹۵). با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق پتانسیل (PET)، تفاوت بین بارندگی (P) و تبخیر و تعرق پتانسیل برای ماه  $i$  به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود (نصرتی ۱۳۹۳). معادله تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) نیز با روش پنمن - موتیث فائو، که در دستورالعمل محاسبه نیاز آبی گیاهان قابل دسترس است (آلن<sup>۳</sup> و همکاران ۱۹۹۸؛ وزیری و همکاران ۱۳۷۸)، انجام شد.

$$D_i = P_i - PET_i \quad \text{رابطه ۱}$$

مقادیر  $D$  در مقیاس‌های زمانی مختلف به کمک رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$D_n^k = \sum_{n=0}^{k-1} P_{n-1} - PET_{n-i} \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه ۲،  $k$  (ماه‌ها) مقیاس زمانی مورد نظر و  $n$  ماه مورد نظر در محاسبه است.

یک توزیع سه‌پارامتری برای محاسبه شاخص خشک‌سالی نیاز است تا بتواند مقادیر منفی در داده‌های  $D$  را پوشش دهد. نتایج انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع نشان داده است داده‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف با استفاده از تابع لجستیک لگاریتمی برازش خوبی دارد. بدین ترتیب، تابع تجمعی احتمال سری داده‌های  $D$  بر اساس تابع لجستیک لگاریتمی به صورت رابطه ۳ است.

$$F(x) = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{x - \gamma} \right) \right]^{-1} \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه ۳،  $\alpha$  پارامتر مقیاس و  $\gamma$  پارامتر اصلی برای مقادیر  $D$  در محدوده  $D > \gamma$  است.

پس از محاسبه تابع توزیع تجمعی و تبدیل آن به مقادیر نرمال مقادیر شاخص SPEI استخراج می‌شود (ویسنته سرانو و همکاران ۲۰۱۰، به نقل از نصرتی ۱۳۹۳).

**ذ) نحوه اتصال داده‌های مدل‌سازی شده و استفاده از آن‌ها برای تعیین خشک‌سالی با محاسبه شاخص SPEI**

همان‌طور که شرح داده شد، داده‌های اندازه‌گیری پیمونگامی<sup>۱</sup> ورودی مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش (MCM و GFDL)، برای بازسازی داده‌های گذشته و آینده، در نظر گرفته شد و برای برقراری ارتباط بین داده‌های تجربی موجود از مطالعه رسوب‌شناسی و آب‌وهواشناسی به محاسبه شاخصی یکسان در سه دوره گذشته و حال و آینده نیاز است. به منظور محاسبه شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق (SPEI) در مقیاس‌های فصلی آب‌وهوای دیرینه

1. Standardized precipitation-evapotranspiration index  
2. Vicente-Serrano  
3. Allen

و فعلی و آینده از برنامه نویسی در محیط R استفاده شد. همچنین برای محاسبه شاخص از مقیاس زمانی یک ماهه استفاده شد. چون در دوره‌های کوتاه مدت ۱ و ۳ و ۶ ماه (اثر دوره‌های کوتاه مدت در ذخایر آب نمود می‌یابد، از جمله رطوبت خاک) دوره‌های خشک سالی و ترسالی به تناوب با شدت‌های مختلف به وقوع می‌پیوندند. روشن است که تعداد دوره‌های خشک و تر با افزایش طول مقیاس کمتر می‌شوند، اما مدت زمان طولانی‌ترین دوره افزایش می‌یابد (از ۳ به ۹ ماه). شاخص خشک‌سالی در مقیاس‌های بلندمدت ۱۲ و ۱۸ و ۲۴ ماه بیشتر بیانگر کاهش تعداد وقایع خشک‌سالی و دوام ماندگاری بیشتر آن‌هاست.

شدت شاخص خشک‌سالی در این تحقیق با استفاده از تغییراتی که ویسنته سرانو<sup>۱</sup> و همکارانش در بسته آماری نوشته شده در محیط R ارائه کردند محاسبه شد. مقیاس تعیین شدت خشک‌سالی در جدول ۱ می‌آید (ویسنته سرانو و همکاران ۲۰۱۰).

جدول ۱

مقدار شاخص SPEI	وضعیت خشک‌سالی
فوق‌العاده مرطوب	(۳) - (۲)
خیلی مرطوب	(۲) - (۱/۵)
نسبتاً مرطوب	(۱) - (۱/۵)
نزدیک به نرمال	(۱) - (-۱)
نسبتاً خشک	(-۱) - (-۱/۵)
خشک‌سالی شدید	(-۱/۵) - (-۲)
فوق‌العاده خشک	(-۲) - (-۳)

#### ه) ارزیابی دقت داده‌های مدل‌سازی شده دیرینه و پیش‌نگری آینده آب‌وهوایی و تغییرات آن

جهت راستی‌آزمایی دو گروه داده از شاخص‌های آماری ضریب تعیین<sup>۲</sup> ( $R^2$ ) و ریشه متوسط مربع خطا<sup>۳</sup> (RMSE) استفاده شد. شاخص ضریب تعیین با استفاده از رابطه ۴ و شاخص ریشه متوسط مربع خطا با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد.

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

n تعداد نقاط مشاهده‌ای،  $X_i$  مقدار متغیر مشاهداتی،  $\bar{X}$  مقدار میانگین متغیر مشاهداتی،  $Y_i$  مقدار متغیر شبیه‌سازی شده،  $\bar{Y}$  مقدار میانگین متغیر شبیه‌سازی شده،  $y_i$  مقدار شبیه‌سازی شده برای نقطه  $i$ ام،  $\hat{y}$  مقدار مشاهده شده

1. <http://spei.csic.es>
2. Coefficient of Determination
3. Root Mean Square Error

برای نقطه‌آم است. جهت نمایش روند و به منظور انطباق بهتر داده‌های بازسازی‌شده دما و بارش و شاخص خشک‌سالی استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق (SPEI) در فصول مختلف از روند چندجمله‌ای<sup>۱</sup> رتبه‌شش استفاده شد.

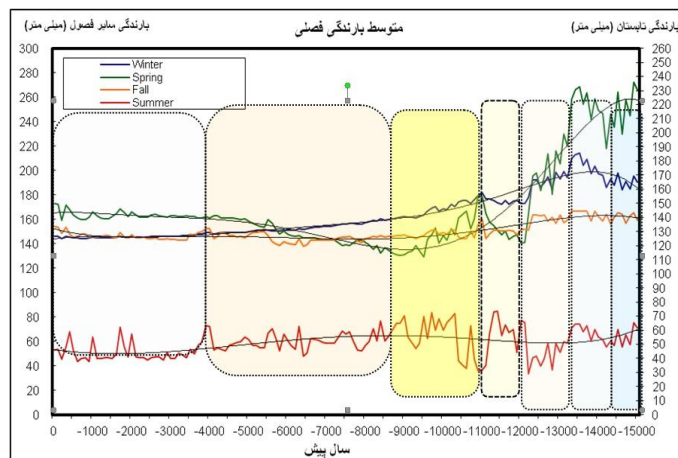
## بحث

نتایج صحت‌سنجی بین داده‌های بازسازی‌شده آب‌وهوای دیرینه خروجی مدل کلان‌فیزیکی آب‌وهوایی (MCM) برای یک دوره ۴۰۰۰ ساله و داده‌های مدل‌سازی‌شده برای دوره ۸۳ سال آینده، شامل ۲۰۱۸ تا ۲۱۰۰ میلادی، با استفاده از سناریوی انتشار AIB مبتنی بر برون‌داد مدل دینامیکی سیالات ژئوفیزیکی (GFDL, CM2.1) با یاخته‌منتخب دریاچه‌نئور برای دوره ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۶ در جدول ۲ می‌آید. همان‌طور که گفته شد، برای اعتبارسنجی از معیارهای ریشه‌میانگین مربع خطاها و ضریب تعیین استفاده شد. خروجی مدل‌های کلان‌فیزیکی آب‌وهوایی (MCM) و دینامیک سیالات ژئوفیزیکی (GFDL, CM2.1) برای دریاچه‌نئور در فصول مختلف سال عملکردی قابل قبول دارد؛ طوری که در بیشتر فصول مورد مطالعه بیش از ۰/۷۹ ضریب تعیین بین داده‌های این دو مدل با داده مشاهده‌شده و ثبت‌شده تبیین می‌شود. نتایج آماره ریشه‌میانگین مربع خطاها بین فصول مختلف سال برای دمای بازسازی‌شده دیرینه و آینده در فصل تابستان به کمترین مقدار به ترتیب از ۲/۵۳۱ تا ۱/۰۱۴ و برای بارش بازسازی‌شده فصل زمستان در دیرینه و آینده در کمترین مقدار از ۶/۹۸۵ تا ۲/۳۶۵ تغییر می‌کند. این نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب این دو مدل در بازسازی و پیش‌بینی دما و بارش در دریاچه‌نئور است (جدول ۲ و شکل‌های ۲ و ۳). البته این توضیح لازم است که مدل کلان‌فیزیکی آب‌وهوایی (MCM) استفاده‌شده برای بازسازی داده‌های دما و بارش دیرینه مدلی محلی است و از نوع جهانی یا حتی نیم‌کره‌ای نیست؛ بدین معنی که خروجی‌های مدل به تأثیرات محلی بستگی دارد. بنابراین، ممکن است نتایج برون‌داد مدل نتایج مدل نیم‌کره‌ای را دنبال نکند.

جدول ۲. مقادیر آماره ریشه‌متوسط مربع خطا (RMSE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) بین مدل‌های کلان‌فیزیکی آب‌وهوایی (MCM) و دینامیک سیالات ژئوفیزیکی (GFDL, CM2.1) با یاخته‌منتخب دریاچه‌نئور

بارش آینده		بارش دیرینه		دمای آینده		دمای دیرینه		فصل / آماره
R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	
۰/۸۹۶	۲/۳۶۵	۰/۸۱۱	۶/۹۸۵	۰/۹۰۱	۲/۶۵۸	۰/۸۹۳	۳/۳۶۵	زمستان
۰/۸۶۷	۳/۶۹۸	۰/۸۶۵	۸/۸۳۶	۰/۸۹۷	۲/۸۷۴	۰/۸۶۳	۳/۴۵۸	بهار
۰/۸۰۳	۳/۷۸۵	۰/۷۹۰	۸/۸۹۸	۰/۹۳۵	۱/۰۱۴	۰/۹۱۰	۲/۵۳۱	تابستان
۰/۸۱۲	۳/۸۷۵	۰/۷۹۶	۹/۵۹۳	۰/۹۱۸	۱/۹۸۵	۰/۸۳۶	۲/۸۹۷	پاییز

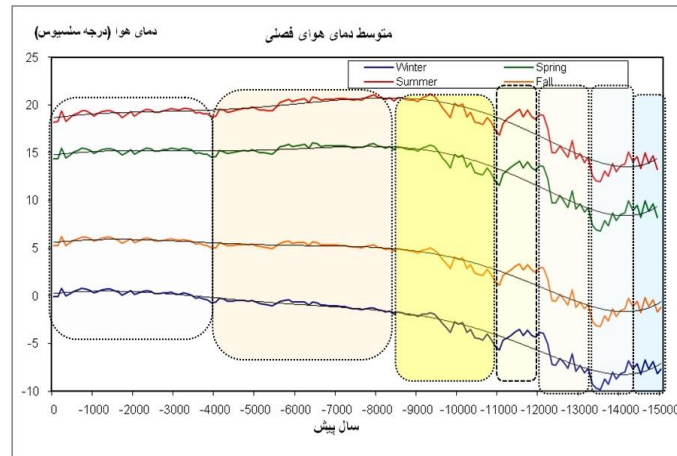
1. Polynomial trend



شکل ۲. داده‌های بارش دیرینه بازسازی شده همراه نمودار چندجمله‌ای برای شرایط دیرینه آب‌وهوایی با استفاده از مدل MCM (نمودار روند چندجمله‌ای رتبه ششم با ضریب تعیین  $R^2$  برای فصول زمستان و بهار و تابستان و پاییز به ترتیب حدود ۹۵، ۸۹، ۲۱، ۷۹ درصد). مستطیل‌های خط‌چین نماینده فازهای رطوبتی یکم تا هفتم با رنگ‌های مختلف در حوضه نئور حاصل از محاسبه شاخص خشک‌سالی است.

میانگین دما و بارش سالیانه شبیه‌سازی شده برای دریاچه نئور در طی ۴۰۰۰۰ سال گذشته با سطح اطمینان بالا از نظر آماری نشان داد دوره سرد و خشک یانگردریاس هم‌زمان با کاهش نسبی بارش و دما در فاصله ۱۲۸۰۰ تا ۱۲۳۰۰ سال پیش رخ داده است که در توافق با نتایج مطالعه اوبرت و همکارانش (۲۰۱۷) است. در این دوره نسبتاً سرد و خشک، میانگین دمای سالیانه حدود ۴/۵ درجه سانتی‌گراد و بارش سالیانه حدود ۵۸۶ میلی‌متر بوده است. همچنین، به نظر می‌رسد از ۱۲۲۰۰ سال پیش تاکنون، یعنی پس از یانگردریاس، میانگین دمای فصلی منطقه نئور در فصل تابستان هیچ‌گاه به مقادیر زیر صفر درجه سانتی‌گراد نرسیده است. افزون بر این، روندیابی بارش نیز بیانگر معناداری روند افزایشی بارش در طول ۴۰۰۰۰ سال گذشته در همه فصول، غیر از فصل زمستان، در سطح ۹۹/۹۹ درصد است؛ در حالی که روند داده‌های دما در همه فصول به صورت افزایشی در سطح بالایی معنادار است (اکبری ازیرانی ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶؛ اوبرت<sup>۱</sup> و همکاران ۲۰۱۷).

نتایج حاصل از محاسبه شاخص شدت خشک‌سالی استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق (SPEI) برای دریاچه نئور طی ۱۵۰۰۰ سال گذشته به صورت فصلی در نمودار ۴ و جدول ۳ می‌آید. با استفاده از تحلیل شاخص خشک‌سالی فصلی SPEI می‌توان هفت فاز رطوبتی متفاوت در دریاچه نئور از ۱۵۰۰۰ سال پیش تا به امروز شناسایی کرد (شکل ۴ و جدول ۳).



شکل ۳. داده‌های دمای هوای دیرینه بازسازی شده همراه نمودار چندجمله‌ای برای شرایط دیرینه آب‌وهوایی با استفاده از مدل MCM (نمودار روند چندجمله‌ای رتبه ششم با ضریب تعیین  $R^2$  برای فصول زمستان و بهار و تابستان و پاییز به ترتیب حدود ۹۵، ۹۴، ۹۰، ۹۲ درصد). مستطیل‌های خط چین نماینده فازهای رطوبتی یکم تا هفتم با رنگ‌های مختلف در حوضه نئور حاصل از محاسبه شاخص خشک‌سالی است.

جدول ۳. مقادیر آماری میانگین دمای هوا (درجه سانتی‌گراد) و بارش دیرینه (میلی‌متر) در فصول مختلف به تفکیک فازهای رطوبتی و دمایی در ۱۵۰۰۰ سال گذشته فصل / فاز رطوبتی و دمایی

سالیانه		پاییز		تابستان		بهار		زمستان		
بارش	دما	بارش	دما	بارش	دما	بارش	دما	بارش	دما	
۶۶۵/۷	۳/۵۶	۱۶۲/۲	-۱/۰۶	۵۷/۷	۱۳/۹۶	۲۵۵/۸	۸/۹۲	۱۹۰/۵	-۷/۵۶	فاز اول ( Yrs. ) (۱۴۵۰۰ - ۱۵۰۰۰ Bp.)
۶۶۹/۵	۲/۸۸	۱۶۳/۱	-۱/۷۷	۵۶/۵	۱۳/۴۱	۲۴۹/۷	۸/۲۷	۲۰۰/۱	-۸/۳۶	فاز دوم ( Yrs. ) (۱۳۴۰۰ - ۱۴۵۰۰ Bp.)
۵۹۲/۲	۴/۷۴	۱۵۹/۴	-۰/۰۴	۴۷/۱	۱۵/۵۲	۱۹۵/۷	۱۰/۲۷	۱۸۹/۹	-۶/۷۵	فاز سوم ( Yrs. ) (۱۲۰۰۰ - ۱۳۴۰۰ Bp.)
۵۳۵/۵	۷/۵۷	۱۵۰/۳	۲/۵۹	۵۵/۴	۱۸/۶۵	۱۵۴/۱	۱۳/۲۸	۱۷۵/۵	-۴/۲۴	فاز چهارم ( Yrs. ) (۱۱۰۰۰ - ۱۲۰۰۰ Bp.)
۵۱۷/۷	۸/۶۰	۱۴۷/۷	۳/۶۳	۵۶/۳	۱۹/۵۷	۱۴۵/۷	۱۴/۳۰	۱۶۷/۹	-۳/۰۹	فاز پنجم ( Yrs. ) (۸۷۰۰ - ۱۱۰۰۰ Bp.)
۴۹۸/۴	۱۰/۰۰	۱۴۴/۶	۵/۲۷	۵۲/۱	۲۰/۲۳	۱۴۸/۶	۱۵/۴۶	۱۵۲/۹	-۰/۹۵	فاز ششم ( Yrs. ) (۴۰۰۰ - ۸۷۰۰ Bp.)
۵۰۰/۱	۱۰/۰۸	۱۴۶/۵	۵/۷۶	۴۴/۳	۱۹/۱۶	۱۶۳/۴	۱۵/۱۲	۱۴۵/۷	۰/۲۷	فاز هفتم ( Now Yrs. ) (۴۰۰۰ - Bp.)

درباره محاسبه و تحلیل شاخص SPEI بازسازی شده در شرایط دیرینه به صورت فصلی برای هر یک از فازهای رطوبتی در ادامه بحث می‌شود.

فاز اول رطوبتی (۱۴۵۰۰ Yrs. Bp. - ۱۵۰۰۰): دریاچه نئور در فاز اول رطوبتی از ۱۵۰۰۰ تا حدود ۱۴۵۰۰ سال پیش با میانگین دمای سالیانه ۳/۵۶ درجه سلسیوس و بارش سالیانه ۶۶۵/۷ میلی متر مشخص شده است. این فاز رطوبتی الگوی متفاوت خشک‌سالی فصلی را تجربه می‌کند. در این فاز شاخص خشک‌سالی برای فصول زمستان و پاییز و تابستان بیانگر شرایط نسبتاً مرطوب و برای فصل بهار شرایط رطوبتی نزدیک به نرمال را نشان می‌دهد.

فاز دوم رطوبتی (۱۳۴۰۰ Yrs. Bp. - ۱۴۵۰۰): این فاز نسبت به فاز قبلی دارای میانگین دمای کمتر - ۲/۸۸ درجه سلسیوس - و بارش بیشتر - حدود ۶۶۹/۵ میلی متر - است. بنابراین نسبت به میانگین دما در فاز اول هوا سردتر شده و بارش کمی افزایش یافته است. در فاز دوم از حدود ۱۴۵۰۰ تا ۱۳۴۰۰ سال پیش به طور مقطعی در فصول زمستان و بهار و تابستان شاخص خشکی افزایش یافته و شرایط رطوبتی به طور موقت بهبود یافته است. اما شدت کاهش خشکی بر اساس نمودار در فصل پاییز کمتر از سه فصل زمستان و بهار و تابستان در این فاز بوده است که به نظر می‌رسد به دلیل کمتر بودن افزایش بارش پاییز نسبت به سایر فصول سرد باشد.

فاز سوم رطوبتی (۱۲۰۰۰ Yrs. Bp. - ۱۳۴۰۰): این فاز میانگین دمای ۴/۷۴ درجه سلسیوس و بارش ۵۹۲/۲ میلی متر دارد. بنابراین، نسبت به میانگین دمای فاز دوم حدود ۲ درجه افزایش دما داشته، اما، بارش به طور ناگهانی حدود ۷۲ میلی متر کاهش یافته است. بر اساس شاخص خشک‌سالی از حدود ۱۳۴۰۰ تا ۱۲۰۰۰ سال پیش می‌توان فاز سوم رطوبتی دریاچه نئور را با رژیم کاهش رطوبت در هر چهار فصل شناسایی کرد که کاهش رطوبت و افزایش شدت خشک‌سالی در فصل تابستان و بهار بیش از سایر فصول است. شرایط رطوبتی دریاچه نئور بر اساس شاخص خشک‌سالی فصل تابستان در ۱۳۴۰۰ سال پیش از وضعیت خیلی مرطوب به شرایط نسبتاً خشک در ۱۲۰۰۰ سال تغییر می‌یابد. در این فاز شرایط رطوبتی در فصل بهار از حالت نزدیک به نرمال به شرایط نسبتاً خشک نزدیک می‌شود که به نظر می‌رسد این شرایط خشکی ناگهانی دریاچه نئور در فاز سوم رطوبتی با دوره سرد و خشک بانگردریاس هم‌زمان باشد.

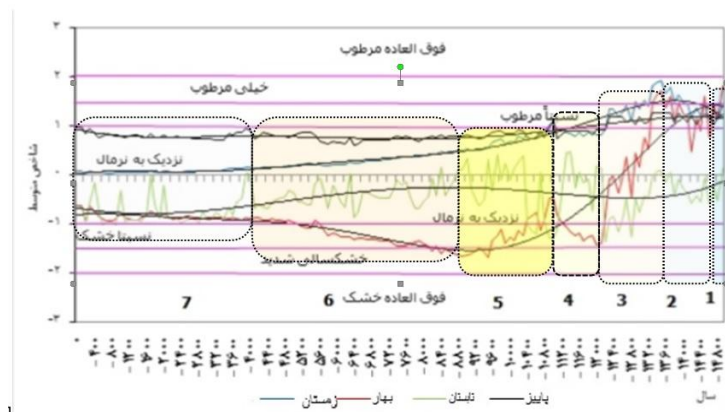
فاز چهارم رطوبتی (۱۱۰۰۰ Yrs. Bp. - ۱۲۰۰۰): این فاز میانگین دمای ۷/۵۷ درجه سلسیوس و بارش ۵۳۵/۵ میلی متر دارد. بنابراین، نسبت به فاز سوم میانگین دما حدود ۳ درجه افزایش و بارش حدود ۵۷ میلی متر کاهش یافته است. بر اساس شاخص خشک‌سالی در این فاز دو رژیم رطوبتی اصلی فصل گرم (بهار و تابستان) و سرد (پاییز و زمستان) را می‌توان شناسایی کرد؛ طوری که شرایط رطوبتی در فصل گرم اندکی بهبود می‌یابد و شاخص خشک‌سالی از وضعیت نسبتاً خشک به شرایط نرمال نزدیک‌تر می‌شود. اما در فصل سرد کاهش بارش و افزایش دما در این فاز باعث افزایش خشکی شده است.

فاز پنجم رطوبتی (۸۷۰۰ Yrs. Bp. - ۱۱۰۰۰): این فاز میانگین دمای ۸/۶۰ درجه سلسیوس و بارش ۵۱۷/۷ میلی متر دارد. بنابراین، کاهش بارش و افزایش دما همچنان ادامه یافته است. از نظر شاخص خشک‌سالی، شرایط رطوبتی دریاچه نئور در این فاز به سرعت به سوی خشکی پیش رفته است و کاهش رطوبت در فصول تابستان و پاییز و زمستان مشهود است که شدت شاخص خشک‌سالی در فصل تابستان بسیار بیشتر از فصل سرد سال بوده است. بر اساس شاخص خشک‌سالی، از حدود ۱۱۰۰۰ سال پیش تا حدود ۸۷۰۰ سال پیش، شرایط رطوبتی دریاچه از حالت نزدیک به نرمال به حالت خشک‌سالی شدید و در فصل پاییز و زمستان از شرایط نسبتاً مرطوب به شرایط نزدیک به نرمال تغییر وضعیت داده

است. بر اساس داده‌های بازسازی‌شده دما و بارش در این فاز می‌توان علت خشکی را افزایش دما در همه فصول همراه با کاهش بارش به‌ویژه در فصول گرم سال دانست (شکل‌های ۲، ۳، ۴).

فاز ششم رطوبتی (۴۰۰۰ - ۸۷۰۰ Yrs. Bp.); این فاز میانگین دمای ۱۰ درجه سلسیوس و بارش ۴۹۸/۴ میلی‌متر دارد. در این فاز نسبت به فاز قبلی میانگین دمای هوای در همه فصول افزایش و میانگین بارش در همه فصول، غیر از بهار، کاهش یافته است. در شکل ۲، با وجود افزایش اندک بارش میانگین فصل بهار نسبت به فاز قبلی، روند کاهشی قابل توجه فصل بهار به رنگ سبز قابل مشاهده است. این کاهش بارش در حدود ۸۷۰۰ تا ۸۰۰۰ سال پیش به حداکثر خود می‌رسد. شاخص خشک‌سالی از حدود ۸۷۰۰ تا ۴۰۰۰ سال پیش نشان‌دهنده شرایط خشک‌تر برای دریاچه نئور در همه فصول است؛ طوری که روند خشکی در فصل‌های تابستان و زمستان و پاییز روندی همراه با افزایش شدت خشکی تا وضعیت نزدیک به نرمال است و شدیدترین شرایط خشکی در ابتدای این فاز، یعنی حدود ۸۷۰۰ تا ۸۰۰۰ سال پیش، در فصل بهار است. در این فصل روند خشکی از نوع کاهشی از وضعیت خشک‌سالی شدید در ابتدای فاز به وضعیت نسبتاً خشک در میانه فاز و سپس وضعیت نزدیک به نرمال در حدود ۵۰۰۰ سال پیش ادامه یافته است. بنابراین الگوی خشک‌سالی‌های فصل بهار نسبت به سه فصل دیگر نوسانات بیشتر داشته است.

فاز هفتم رطوبتی (Yrs. Bp. زمان حال حاضر - ۴۰۰۰): این فاز میانگین دمای ۱۰/۰۸ درجه سلسیوس و بارش ۵۰۰/۱ میلی‌متر دارد. از ویژگی‌های اصلی این فاز ثبات نسبی دما و حتی افزایش بارش به صورت میانگین حدود ۲ میلی‌متر نسبت به فاز قبلی است. از نکات جالب از نظر شاخص خشک‌سالی یکنواخت‌تر شدن شرایط رطوبتی دریاچه در هر چهار فصل است. تغییرات شاخص خشک‌سالی در هر چهار فصل وضعیت نزدیک به نرمال را نشان می‌دهد با این تفاوت که بر اساس شکل ۲ در این فاز میانگین بارش در فصل بهار نسبت به سایر فصول افزایش بیشتری داشته است. بنابراین، از نظر شاخص خشک‌سالی نیز شرایط رطوبتی بهتری در فصل بهار از حدود ۴۰۰۰ سال گذشته تا به امروز داشته و شدت خشک‌سالی نزدیک به نرمال ارزیابی شده است. در فصل پاییز نیز از نظر رطوبتی در این فاز شرایط بهتر از سایر فصول است و به سمت وضعیت نسبتاً مرطوب نزدیک می‌شود (جدول ۳ و شکل‌های ۲ و ۴).



شکل ۴. شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق (SPEI) برای شرایط دیرینه آب‌وهوایی با استفاده از مدل MCM (اعداد ۱ تا ۷ نماینده فازهای رطوبتی یکم تا هفتم با رنگ‌های مختلف در حوضه نئور هستند. فاز سوم به صورت خط چین نماینده رخداد یانگردریاس در نئور است.)

نکته قابل توجه درباره آشکارسازی خشک‌سالی دیرینه دریاچه نئور لحاظ کردن عامل دما در تعیین خشک‌سالی در شاخص SPEI است و با در نظر گرفتن اثر متقابل بارندگی و دما و شدت تبخیر شدت خشک‌سالی‌ها نیز افزایش یافته است. به عبارت دیگر، در دوره‌های نسبتاً خشک و خشک‌سالی شدید علاوه بر کاهش بارندگی در منطقه‌ای که دریاچه نئور در آن واقع شده است افزایش دما نیز طبیعتاً برای وقوع خشک‌سالی مزید بر علت بوده است. همان‌طور که در شکل ۲ و ۴ آمده، شاخص SPEI قابلیت چشمگیری در آشکارسازی خشک‌سالی و تعیین دقیق توالی دوره‌ها دارد که این نتیجه را پیش‌تر ویسنته سرانو و همکارانش (۲۰۱۰) در مطالعه این شاخص تأیید کرده‌اند. از آنجا که در این شاخص دما و تبخیر - تعرق نیز لحاظ می‌شود، روشن است که دگرگونی دمایی و تفاوت در رفتار الگوی تبخیر - تعرق ناشی از آن ممکن است به تفاوت الگوی وقوع و مدت و توالی دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی و در نتیجه پوشش گیاهی منطقه منجر شود. درصد توزیع فراوانی دوره‌های خشک و تر در شرایط دیرینه آب‌وهوایی ۱۵۰۰۰ سال پیش تاکنون در دریاچه نئور به گونه‌ای بوده که ۸۵/۳۴ درصد از فصل بهار دوره‌های خشک و مابقی ۱۴/۶۶ درصد این فصل دوره تر و ۸۴/۶۷ درصد از فصل تابستان دوره خشک و فقط ۱۵/۳۳ درصد این فصل دوره تر بوده است. شاخص بازسازی‌شده خشک‌سالی حاکی از نبود فصل خشک در دوره سرد سال، یعنی فصل‌های زمستان و پاییز، در ۱۵۰۰۰ سال پیش تا زمان حاضر بوده است. باید توجه کرد هرچند در فصل زمستان دوره خشک در شرایط دیرینه آب‌وهوایی آشکار نشد، بر اساس شاخص خشک‌سالی می‌توان تغییر رژیم رطوبتی از وضعیت بسیار مرطوب ۱۵۰۰۰ سال گذشته به شرایط رطوبتی با وضعیت نزدیک به نرمال را برداشت کرد. در شکل ۴ مقدار شاخص خشک‌سالی استاندارد تبخیر - تعرق محاسبه‌شده به صورت خط آبی در فصل زمستان، خط قرمز در فصل بهار، خط سبز در فصل تابستان، و خط سیاه در فصل پاییز وضعیت رطوبتی منطقه نئور را نشان می‌دهد. برای درک بهتر تغییرات خط روند با استفاده از تابع چندجمله‌ای درجه شش روی هر نمودار فصلی ترسیم شده است.

بر اساس تحلیل فصلی هفت فاز رطوبتی فوق مطابق شکل ۴ در فصل زمستان از ۱۵۰۰۰ سال پیش یا انتهای پلیستوسن هیچ‌گاه شاخص خشک‌سالی مقادیر منفی نداشته و شرایط رطوبتی دریاچه در این فصل از وضعیت خیلی مرطوب در ۱۵۰۰۰ سال پیش تا نزدیک به نرمال در زمان حاضر تغییر کرده است. در فصل پاییز نیز شاخص خشک‌سالی همواره مقادیر مثبت داشته است و از وضعیت نسبتاً مرطوب در حدود ۱۵۰۰۰ سال پیش تا وضعیت نزدیک به نرمال تغییر کرده است و در زمان حاضر حتی به شرایط نسبتاً مرطوب نزدیک شده است. مقادیر شاخص خشک‌سالی فصل زمستان بین ۱۵۰۰۰ تا ۱۳۵۰۰ سال پیش نماینده وضعیت خیلی مرطوب در دریاچه نئور است. اما از ۱۰۰۰۰ سال پیش (شروع هولوسن) مقدار شاخص خشک‌سالی فصل زمستان بین صفر و +۱ یا وضعیت نزدیک به نرمال را نشان داده است. در بین فصول، دوره سرد سال شامل فصل‌های زمستان و پاییز الگوی تغییرات شاخص خشک‌سالی هماهنگ‌تری دارند؛ درحالی‌که شاخص خشک‌سالی در فصل تابستان و بهار افت‌وخیز بیشتری داشته است، اما، از نظر زمانی تغییرات دو فصل بهار و تابستان کاملاً بر هم منطبق نیستند. در فصل تابستان شدت خشکی در سه فاز اول، یعنی از انتهای پلیستوسن تا حدود ۱۲۰۰۰ سال پیش، بیشتر از فصل بهار بوده است. ولی شدت خشکی فصل بهار از حدود ۱۲۰۰۰ سال پیش تا حدود ۲۰۰۰ سال پیش بیشتر از فصل تابستان بوده است و پس از آن تا زمان حاضر شدت خشکی تابستان نسبت به

فصل بهار افزایش بیشتری داشته است. نمودار فصل بهار نشان می‌دهد شدت خشکی در حدود ۸۷۰۰ تا ۸۰۰۰ سال پیش در کل دوره ۱۵۰۰۰ ساله شدت بیشتری داشته است. همچنین روند تغییر مقدار شدت شاخص خشکی (بین صفر و -۱) در فصل تابستان در انتهای پلیستوسن از ۱۵۰۰۰ تا ۱۳۶۰۰ سال پیش کاهش یافته و به افزایش شدت خشکی و ایجاد وضعیت نزدیک به نرمال در فاز سوم یانگردریاس منجر شده است؛ درحالی‌که روند تغییر مقدار شدت خشکی فصل تابستان بعد از فاز سوم در حدود ۱۰۰۰۰ سال پیش افزایش یافته و شرایط رطوبتی بهتری برای دریاچه در شروع هولوسن قابل استنباط است. مقدار شدت خشکی در فصل بهار ارقام کمتری داشته است که نشان‌دهنده شرایطی خشک‌تر نسبت به فصل تابستان در فازهای رطوبتی چهارم تا نیمه فاز هفتم است. با کاهش مقدار شاخص شدت خشک‌سالی فصل بهار و رسیدن به کمترین مقدار (۱/۵- تا ۲-) در حدود ۸۴۰۰ سال پیش وضعیت خشک‌سالی شدید شده و پس از آن وضعیت نسبتاً خشک تا به امروز ادامه یافته است. فصل پاییز نیز مانند فصل زمستان، از ۱۵۰۰۰ سال پیش تا شرایط فعلی، در هیچ دوره‌ای شاخص خشک‌سالی مقدار منفی نشان نداده است. در مقابل در فصل بهار، از ۱۵۰۰۰ سال پیش، شاخص خشک‌سالی به‌ندرت مقدار مثبت را نشان داده و شدت خشک‌سالی از حالت نسبتاً خشک به حالت نزدیک به نرمال تغییر کرده است. مطابق شکل شماره ۴، دریاچه نئور به غیر از فصل بهار در هیچ فصل دیگری شرایط خشک‌سالی شدید را از ۱۵۰۰۰ سال پیش تاکنون تجربه نکرده است. این وضعیت خشک‌سالی شدید بین بازه زمانی ۹۶۰۰ تا ۷۹۰۰ سال پیش گسترده شده است و به نظر می‌رسد با دوره خشکی که از مطالعات قبلی - عزیززی و همکاران (۱۳۹۲)، شریفی و همکاران (۲۰۱۵)، اوبرت و همکاران (۲۰۱۷) - به دست آمده و بر وجود خشکی در ۸۰۰۰ سال پیش دریاچه نئور اتفاق نظر دارند در ارتباط باشد.

همان‌گونه که در بیان مسئله آمد، دریاچه نئور به دلیل ارتفاع بیش از ۲۴۰۰ متر از سطح دریا محیط مناسبی برای پژوهش‌های دیرینه-محیط‌شناسی است و برای تحلیل داده‌های مدل‌سازی شده می‌توان به این تحقیقات تجربی نیز استناد کرد. در تحلیل هفت فاز رطوبتی به‌دست‌آمده از شاخص خشک‌سالی فصلی SPEI در منطقه نئور از مطالعه اوبرت و همکارانش (۲۰۱۷) و مطالعه شریفی و همکارانش (۲۰۱۵)، که به ترتیب بر پایه مطالعه کایرونومیدها و گرده‌های گیاهی و ژئوشیمی مغزه رسوبی دریاچه با سن حدود ۱۴۰۰۰ سال پیش بود، بیشتر بهره گرفته شد.

تحلیل شاخص خشک‌سالی فصلی SPEI در منطقه نئور هفت فاز رطوبتی را آشکار کرد که بیانگر تفاوت فصلی خشک‌سالی طی ۱۵۰۰۰ سال گذشته است. در فاز اول و فاز دوم رطوبتی، از ۱۵۰۰۰ تا ۱۳۶۰۰ سال پیش، وجود روند کاهش رطوبت با نتایج شریفی و همکارانش (۲۰۱۵) و اوبرت و همکارانش (۲۰۱۷) مطابقت ندارد. با این حال، وجود دوره سرد و خشک یانگردریاس را در فاز رطوبتی سوم در بازه زمانی ۱۳۴۰۰ تا ۱۲۰۰۰ سال پیش تا حدودی می‌توان در توافق با نتایج موجود دانست؛ طوری که نتایج مدل‌سازی داده‌های دما و بارش دیرینه و محاسبه شاخص شدت خشک‌سالی دیرینه نیز در فصل تابستان و بهار کاهش مقدار شاخص خشک‌سالی تا حدود ۱/۵- را در حدود ۱۲۰۰۰ سال پیش نشان می‌دهد. پیش‌تر نیز مطالعه شریفی و همکارانش (۲۰۱۵) نشان داد مقدار ایزوتوپ هیدروژن در مغزه رسوبی در حدود ۱۲۰۰۰ سال پیش دارای افزایش ناگهانی و نشانه شرایط خشک‌تر دریاچه است. همچنین در اینجا لازم است به چهار

فاز هیدرولوژیکی حاصل مطالعه اوبرت و همکارانش (۲۰۱۷) در زمینه گرده‌شناسی (پالینولوژی) و حشرات کایرونومید بر مغز رسوبی دریاچه نئور اشاره شود که از انتهای دوره یخچالی اخیر تا هولوسن میانی (۱۵۵۰۰ تا ۷۵۰۰ سال گذشته) را پوشش می‌دهد. فاز اول هیدرولوژیکی معرف آب‌وهوای نسبتاً خشک در حدود ۱۵۵۰۰ تا ۱۲۷۰۰ سال گذشته و فاز دوم معرف موجودات آبی سازگار با عمق آب بیشتر و محیط آهکی دریاچه در حدود ۱۲۷۰۰ تا ۱۱۳۰۰ سال پیش است. این افزایش رطوبت حوضه می‌تواند به دلیل کاهش میزان تبخیر در اثر کاهش دمای فصل تابستان یا ناشی از کاهش طول فصل خشک تابستان در حوضه دریاچه نئور در این فاز باشد. در فاز سوم، ۱۱۳۰۰ تا ۸۷۰۰ سال گذشته، شواهد رطوبت کمتر منطقه مورد مطالعه هم‌زمان با تأخیر در گسترش جنگل‌های بلوط حاکی از تداوم شرایط آب‌وهوایی خشک در سرتاسر هولوسن آغازین است و احتمال دارد با اثر تشدید فصلی بارش مرتبط باشد. در فاز چهارم، یعنی حدود ۸۷۰۰ سال پیش، نشانه‌های افزایش سطوح آب منطقه مورد مطالعه هم‌زمان با شروع گسترش جنگل‌های بلوط دیده می‌شود که شاید به دلیل کوتاه شدن دوره خشک تابستان رخ داده باشد (اوبرت و همکاران ۲۰۱۷). در این تحقیق با تحلیل شاخص خشک‌سالی نیز فازهای رطوبتی به همراه تغییرات فصلی خشک‌سالی به صورت هفت فاز بدست آمد که از نظر زمانی با همه فازهای هیدرولوژیکی به دست آمده از مطالعه اوبرت و همکارانش (۲۰۱۷) به طور دقیق قابل مقایسه نیست. در این تحقیق فازهای اول و دوم رطوبتی، یعنی حدود ۱۵۰۰۰ تا ۱۳۴۰۰ سال پیش، شاخص خشک‌سالی فصلی شرایط نزدیک به نرمال را برای همه فصول سال نشان می‌دهد؛ در حالی که شرایط رطوبتی بر اساس نتایج مطالعه اوبرت و همکارانش (۲۰۱۷) در بازه زمانی ۱۵۵۰۰ تا ۱۲۷۰۰ شرایط نسبتاً خشک، با توجه به فراوانی موجودات آبی کایرونومید، برآورد شده است. مقایسه نتایج اخیر با نتایج به دست آمده از مدل‌سازی میانگین داده‌های دما و بارش با مدل MCM دریاچه نئور در این تحقیق نشان می‌دهد در محدوده ۱۲۷۰۰ تا ۱۱۳۰۰ سال پیش میانگین دمای فصل‌های تابستان و بهار روند افزایشی و میانگین بارش فصل بهار روند کاهشی داشته و فصل تابستان تقریباً بدون روند بوده است. بنابراین کاهش میزان تبخیر در اثر کاهش دمای فصل تابستان را نمی‌توان نتیجه گرفت.

از مقایسه داده‌های ایزوتوپ هیدروژن (شاخص بارندگی)، حاصل مطالعات ژئوشیمی رسوبی شریفی و همکارانش (۲۰۱۵)، با نتایج بازسازی داده‌های بارش دیرینه دریاچه نئور به نظر می‌رسد افت‌وخیزهای مقدار ایزوتوپ هیدروژن با داده‌های بازسازی شده جز در بعضی قسمت‌ها انطباق کاملی بر هم ندارند؛ طوری که در بازه زمانی حدود ۱۲۰۰۰ سال پیش افزایش مقدار نسبت ایزوتوپ هیدروژن بیانگر کاهش بارندگی با افزایش گردوغبار هم‌زمان با خشک‌ترین شرایط دریاچه بوده است. این موضوع در بازسازی داده‌های بارش در حدود ۱۲۰۰۰ سال پیش همخوانی دارد.

داده‌های بارش بازسازی شده نشان می‌دهد از حدود ۸۵۰۰ سال پیش در هر چهار فصل میانگین بارش به کمترین مقدار خود رسیده و از حدود ۴۰۰۰ سال پیش تا زمان حاضر بارش فصل بهار دریاچه نئور روند افزایشی نسبی برخلاف سایر فصول داشته است و با افزایش روند بارش بهاری زمینه افزایش پوشش گیاهی در منطقه نئور از میانه هولوسن فراهم شده است. این در حالی است که روند شدت خشک‌سالی فصل بهار به دلیل افزایش دما افزایشی است. مطالعه شریفی و همکارانش (۲۰۱۵) نشان داد مقدار ایزوتوپ‌های هیدروژن در بازه زمانی ۸۷۰۰ تا ۸۰۰۰ سال پیش روند افزایشی و نشانه

کاهش بارندگی بوده و در ۸۰۰۰ سال پیش نشانه دوره خشکی است. همچنین، افزایش ناگهانی مقدار ایزوتوپ در بازه زمانی ۴۰۰۰ تا ۳۰۰۰ سال پیش نشانه کاهش بارش است که با دوره خشکی قابل توجهی در ایران مقارن است. به نظر می‌رسد تفاوت نتیجه این تحقیق با نتایج به دست آمده ناشی از این مسئله باشد که مدل MCM به صورت یک مدل محلی و وابسته به عوامل محلی طراحی شده است و با ورودی‌های هر منطقه دلخواه قادر نیست به طور کامل دگرگونی آب‌وهوایی آن منطقه را آشکار سازد. با وجود این، رخدادهای خشک‌سالی در برخی از بازه‌های زمانی، نظیر ۱۲۰۰۰ و ۸۰۰۰ سال پیش، که با وضعیت خشک‌سالی بسیار شدید شناسایی شده قابل توجه است (شکل ۴).

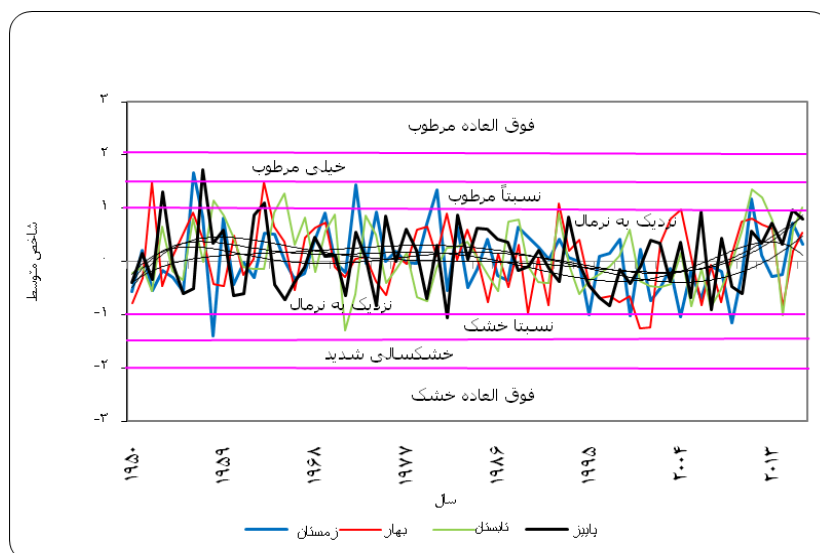
بر اساس داده‌های بازسازی شده میانگین دمای سالیانه ۱۵۰۰۰ سال گذشته ۸/۳۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالیانه این دوره برای دریاچه نئور ۵۳۲/۰۹ میلی‌متر بوده است. مقیمی (۱۳۸۷)، که دوره‌های خشک‌سالی و بارانی ایران را با توجه به شرایط کلی جهان مطالعه کرده است، مشخصه‌هایی را برای ایران در دوره هولوسن یاد کرده که با نتایج این پژوهش هم‌سو است. وی ابراز داشته از ۱۵۰۰۰ سال تا ۱۲۰۰۰ سال پیش از میلاد از نظر خشکی هوا هم‌زمان با شروع دوره بین یخبندان کنونی، شرایط بری ایران بیشتر بوده است. از ۱۲۰۰۰ سال تا ۹۰۰۰ سال پیش از میلاد شرایط کم‌باران معادل شرایط قطبی اروپای امروزی حاکم بوده است. همچنین از ۳۰۰۰۰ سال تا ۸۰۰۰ سال پیش از میلاد خشک‌سالی و پایین آمدن سطح دریاچه‌های داخلی اتفاق افتاده است که با مشاهده شکل ۲ و افت‌وخیزهای نموداری می‌توان این موضوع را تأیید کرد.

در ادامه شرایط فعلی خشک‌سالی دریاچه نئور ارزیابی می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، برای پایش شرایط فعلی دگرگونی شاخص خشک‌سالی برای دوره ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۶ میلادی بررسی شد که در شکل ۵ می‌آید. این دوره در شرایط فعلی به ندرت شاخص خشک‌سالی مقداری بالاتر یا پایین‌تر از ۲+ و ۲- را نشان داده است که این موضوع می‌تواند با افزایش دما و تبخیر - تعرق و در نتیجه شرایط خشک‌تر امروزی، نسبت به دوره دیرینه، در ارتباط باشد. از طرف دیگر از آنجا که داده‌های استفاده شده برای شرایط فعلی با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای، که با ابزارهای استاندارد اندازه‌گیری شده‌اند، به دست آمده است، طبیعتاً مقدار خطای کمتری دارد و نتایج حاصل از آن نیز نسبت به دوره‌های مدل‌سازی شده اطمینان بسیار بالاتری دارد. فصل تابستان بیشینه فراوانی دوره‌های خشک را با ۵۵/۲۲ درصد از آن خود کرده و پس از آن زمستان دارای فراوانی ۵۳/۷۳ درصد فصول خشک است. به نظر می‌رسد شرایط بیشینه فراوانی فصول خشک تابستان نسبت به زمستان ادامه شرایط ۱۰۰۰۰ سال پیش باشد که دریاچه وارد فاز منفی بارشی و مثبت دمایی خود شده است. فقط دو سال، ۱۹۵۶ و ۱۹۵۷، در دوره سرد سال (فصول زمستان و پاییز) شاخص شرایط خیلی مرطوب را نشان داده است. شاخص خشک‌سالی نشان دهنده شرایط نزدیک به نرمال در اکثر سال‌ها است که در فاز منفی فصول زمستان مقدار شدت خشک‌سالی بیشتری را از خود نشان داده است (شکل ۵).

مددی و همکارانش (۱۳۸۳) در تکامل ژئومورفولوژی دریاچه نئور به این نتیجه رسیدند که با توجه به کم بودن بارندگی و زیاد بودن تبخیر در دوره کنونی، به احتمال زیاد، در دوران سرد یخچالی چاله تکتونیک نئور پُرآب‌تر از حال بوده است که با نتایج این مطالعه همخوانی کامل دارد. چون مطالعه شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق (SPEI)

نشان داده در سال‌های اخیر با افزایش دما تبخیر - تعرق نیز افزایش داشته است و به تبع آن خشک‌سالی در منطقه اتفاق افتاده است که از این جهت نتایج مطالعه مددی و همکارانش (۱۳۸۳) را تأیید می‌کند.

شرایط آینده خشک‌سالی دریاچه نئور برای یک دوره ۸۳ ساله، از ۲۰۱۸ تا ۲۱۰۰ میلادی، با استفاده از مدل دینامیکی سیالات ژئوفیزیکی (GFDL, CM2.1) تحت سناریوی انتشار A1B در شکل ۶ می‌آید. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در همه فصول مورد مطالعه حاکمیت با دوره‌های خشک‌سالی خواهد بود (ذکر این نکته ضروری است که این سناریو انتشار شرایطی بینابین را در خصوص انتشار گازهای گلخانه‌ای و استفاده از منابع سنگواره‌ای در نظر گرفته است. بنابراین، با انتخاب سناریوهای بدبینانه و خوش‌بینانه طبیعی است که تعداد دوره‌های خشک و تر نیز دستخوش تغییر شود). فصل تابستان با ۶۸/۶۷ درصد دوره‌های خشک بیشینه فراوانی شرایط خشکی را به خود اختصاص می‌دهد. از مقایسه شکل ۶ با شکل‌های ۴ و ۵، که شرایط دیرینه و فعلی را برای دریاچه نشان می‌دهند، مشخص می‌شود شرایط برای تشدید خشک‌سالی در فصول سرد سال در منطقه فراهم خواهد شد.



شکل ۵. شاخص استاندارد دشت بارش - تبخیر و تعرق (SPEI) برای شرایط فعلی آب‌وهوایی (۱۹۵۰ - ۲۰۱۶) همراه نمودار چندجمله‌ای (نمودار روند چندجمله‌ای رتبه ششم با ضریب تعیین  $R^2$  برای فصول زمستان و بهار و تابستان و پاییز به ترتیب حدود ۱۵، ۱۳، ۱۶، ۱۱ درصد)

در مجموع در خصوص شرایط پیش رو برای دریاچه مبتنی بر خروجی مدل و سناریوی مورد مطالعه می‌توان گفت با وجود بارش‌های قابل قبول در منطقه‌ای با ارتفاع بیش از ۲۴۰۰ متر، که دریاچه در آن واقع شده، به علت افزایش تبخیر و تعرق هم‌گام با افزایش دما شاهد افزایش خشک‌سالی‌های متوسط در منطقه خواهیم بود. نکته جالب توجه دیگری که این پژوهش با مطالعه توأمان شرایط دیرینه و فعلی و آینده دریاچه به آن دست یافت افزایش دوره‌های خشک‌سالی در فصول سرد سال است که از آن می‌توان به یک نتیجه مهم و قابل توجه برای دریاچه نئور رسید. این شرایط قطعاً نشان‌دهنده

ناهنجاری بیشتر دما و بارش در دوره سرد سال در منطقه مورد مطالعه است. براتی و موسوی (۱۳۸۴) افزایش روند موج‌های گرم زمستانه در ایران را اثبات کردند. نتایج پژوهش آنان نشان داد بیشینه هسته‌های گرما عمدتاً در ایستگاه‌های مناطق کوهستانی و برف‌گیر شمال غرب، شمال، و تا حدودی غرب از مناطق جنوبی ایران بیشتر است که همخوانی بالایی با شرایط فعلی و آینده دریاچه نئور در شمال غرب ایران دارد.

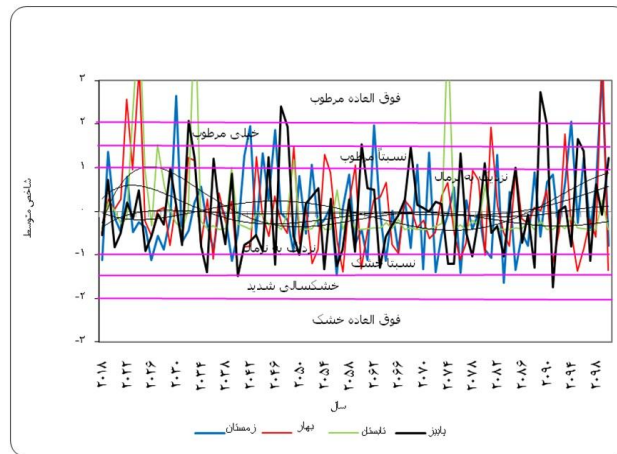
از طرف دیگر مطالعه شریفی و همکارانش (۲۰۱۸) بر اساس ژئوشیمی رسوبات دریاچه نئور به تغییرات الگوی گردش جوی و انتشار گردوغبار نیز اشاره دارد. بنابراین شرایط خشکی در آب‌وهوای آینده منطقه مورد مطالعه می‌تواند به افزایش رخداد گردوغبار نیز بینجامد.

به منظور ارزیابی دقیق دوره‌های خشک و تر درصد فصول خشک و تر برای هر یک از فصول مورد مطالعه در سه دوره آب‌وهوایی دیرینه و آب‌وهوایی فعلی و آب‌وهوایی آینده محاسبه شد که نتایج حاصل از آن در جدول ۴ می‌آید. مطابق جدول ۴ در فصل بهار در شرایط آب‌وهوایی دیرینه ۸۵/۳۴ درصد دوره خشک و در تابستان ۸۴/۶۷ درصد دوره خشک در دریاچه نئور از نظر شاخص خشک‌سالی بازسازی‌شده در ۱۵۰۰۰ سال گذشته آشکار شده است و فراوانی فصل خشک در دو فصل پاییز و زمستان عملاً دیده نشده است و این دو فصل صد درصد شرایط ترسالی را نشان داده‌اند. در شرایط فعلی در فصل زمستان و پاییز به ترتیب دوره‌های خشک رشد ۵۳/۷۳ و ۴۷/۷۶ درصدی داشته‌اند و در مقابل فصول ترسالی همین مقدار کاهش داشته‌اند. در شرایط آینده در فصل سرد سال وضعیت دریاچه نئور نسبت به شرایط فعلی تحت سناریوی انتشار A1B با استفاده از خروجی مدل GFDL بدتر خواهد شد و در فصل زمستان و پاییز به ترتیب درصد فراوانی فصول خشک به ۵۹/۰۳ و ۵۱/۸۰ درصد خواهد رسید. در فصل گرم سال، شامل بهار و تابستان، شرایط آب‌وهوایی فعلی نسبت به شرایط دیرینه بهتر شده است؛ طوری که در فصل بهار فراوانی دوره خشک در شرایط دیرینه به ترتیب ۸۵/۳۴ درصد و در شرایط فعلی ۴۰/۲۹ درصد بوده است که در شرایط آینده ۵۳/۰۱ درصد خواهد شد. همچنین، فراوانی فصول خشک در فصل تابستان در شرایط دیرینه به ترتیب ۸۴/۶۷ درصد و در شرایط فعلی ۵۵/۲۹ درصد بوده است که در شرایط آینده ۶۸/۶۷ درصد خواهد شد. بنابراین دریاچه نئور در فصل گرم سال، شامل بهار و تابستان، به ترتیب در شرایط آینده نسبت به شرایط فعلی رشد ۱۲/۷۲ و ۱۳/۴۵ درصدی خواهد داشت که رشدی چشمگیر در افزایش دوره‌های خشکی و کاهش دوره‌های ترسالی به شمار می‌رود.

جدول ۴. درصد تغییرات فراوانی دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی در شرایط آب‌وهوایی دیرینه (۱۵۰۰۰ سال گذشته)،

فعلی (۱۹۵۰ - ۲۰۱۶)، و آینده دریاچه نئور (۲۰۱۸ - ۲۱۰۰)

آب‌وهوای آینده		آب‌وهوای فعلی		آب‌وهوای دیرینه		فصل / شاخص درصد فصول خشک و تر
فصل خشک	فصل تر	فصل خشک	فصل تر	فصل خشک	فصل تر	
۴۰/۹۷	۵۹/۰۳	۴۶/۲۷	۵۳/۷۳	۱۰۰	-	زمستان
۴۶/۹۹	۵۳/۰۱	۵۹/۷۱	۴۰/۲۹	۱۴/۶۶	۸۵/۳۴	بهار
۳۱/۳۳	۶۸/۶۷	۴۴/۷۸	۵۵/۲۲	۱۵/۳۳	۸۴/۶۷	تابستان
۴۸/۲۰	۵۱/۸۰	۵۲/۲۴	۴۷/۷۶	۱۰۰	-	پاییز



شکل ۶. شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق (SPEI) برای شرایط آینده با استفاده از مدل GFDL همراه نمودار چندجمله‌ای (نمودار روند چندجمله‌ای رتبه ششم با ضریب تعیین  $R^2$  برای فصول زمستان و بهار و تابستان و پاییز به ترتیب حدود ۹، ۵، ۱۶، ۲ درصد)

## نتیجه

نتایج تحلیل آماری نشان داد خروجی مدل‌های کلان فیزیکی آب‌وهوایی (MCM) و دینامیک سیالات ژئوفیزیکی (GFDL, CM2.1) برای دریاچه نئور در فصول مختلف سال عملکرد قابل قبولی دارد و قابل تعمیم به منطقه مورد مطالعه است. در شرایط آب‌وهوایی دیرینه (۱۵۰۰۰ سال گذشته)، فصل تابستان بیشینه دوره‌های خشک و فصل زمستان بیشینه دوره‌های ترسالی را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین توالی دوره ترسالی نیز در فصل زمستان نسبت به سایر فصول بیشتر بوده است. داده‌های بارش بازسازی شده نشان داد منطقه نئور از نظر رژیم بارش بهاره الگویی کاملاً متفاوت از سایر فصول دارد و در ۱۵۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ سال پیش حتی بارش فصل بهار در منطقه نئور بیشتر از زمستان بوده است و از ۸۷۰۰ تا حدود ۴۰۰۰ سال پیش روند بارش کاهشی بوده و از این زمان بارش فصل بهار دریاچه نئور روند نسبی افزایشی، برخلاف سایر فصول، داشته است. با افزایش روند بارش بهاری زمینه افزایش پوشش گیاهی در منطقه نئور از میانه هولوسن فراهم شده است. این در حالی است که روند شدت خشک‌سالی فصل بهار به دلیل افزایش دما افزایشی است. از نتایج دیگر این تحقیق می‌توان به رژیم دیرینه بارشی اشاره کرد. رژیم بارشی دیرینه از حدود ۱۵۰۰۰ سال پیش تا زمان حاضر در منطقه نئور به طور کامل با نتایج مطالعات تجربی موجود از منطقه مورد مطالعه منطبق نیست؛ هرچند وقوع رخدادهایی نظیر یانگردریاس در توافق با مطالعات موجود است.

بررسی شاخص خشک‌سالی استاندارد تبخیر و تعرق (SPEI) دیرینه بازسازی شده دریاچه نئور به شناسایی هفت فاز رطوبتی منجر شد که در سه فاز رطوبتی نخستین، که از ۱۵۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ سال پیش طول کشیده است، مقدار میانگین بارش دریافتی دریاچه نئور بیشتر از میانگین متوسط دوره بلندمدت ۱۵۰۰۰ ساله معادل  $532/09$  میلی‌متر بوده است که احتمالاً این فازها هم‌زمان با دوره یخچالی اخیر در دریاچه نئور باشد. از فاز رطوبتی چهارم، یعنی ۱۲۰۰۰ سال پیش تاکنون، با وجود افت و خیز در

نمودار تغییرات بارش، مقدار میانگین بارش هر فاز رطوبتی نسبت به میانگین بلندمدت منطقه کاهش پیدا کرده است. با تحلیل دمای بازسازی شده در فازهای رطوبتی دریاچه نئور به خوبی می‌توان اثر دگرگونی آب‌وهوایی و افزایش دما را مشاهده کرد؛ طوری که در چهار فاز رطوبتی نخستین، یعنی از ۱۵۰۰۰ تا ۱۱۰۰۰ سال پیش، کاهش پیوسته دما نسبت به میانگین بلندمدت ۱۵۰۰۰ ساله معادل ۸/۳۸ درجه سانتی‌گراد نمایان است، درحالی‌که از فاز پنجم رطوبتی، یعنی ۱۱۰۰۰ سال پیش، دما روند افزایشی داشته است و در فازهای ششم و هفتم، یعنی از ۸۷۰۰ تاکنون، مقدار میانگین دمای هوا بیشتر از متوسط بلندمدت بوده است.

مقایسه شاخص خشک‌سالی دیرینه و فعلی و آینده نشان می‌دهد هرچند وضعیت دریاچه نئور در فصول گرم سال نسبت به دوره دیرینه با کاهش دوره‌های خشک و افزایش دوره‌های تر همراه بوده است، در شرایط آینده فصل گرم سال با کاهش دوره‌های تر و افزایش چشمگیر دوره‌های خشک همراه خواهد بود که این موضوع برای بقا و رشد گیاهانی که به رطوبت فصل گرم نیاز دارند، نظیر درختان بلوط، حائز اهمیت است.

ارزیابی شرایط دیرینه و فعلی و آینده دریاچه نئور نشان‌دهنده افزایش دوره‌های خشک‌سالی در فصول سرد سال است که از افزایش دما در فصول سرد سال در منطقه مورد مطالعه حکایت می‌کند. همچنین تابستان در دوره‌های آینده بیشترین دوره‌های خشکی را سپری خواهد کرد. از آنجا که آب این دریاچه شیرین است و نقشی قابل توجه در گردشگری و آبیاری زمین‌های کشاورزی و شرب منطقه مورد مطالعه دارد، هر گونه تغییر هرچند کوچک می‌تواند شرایط اقتصادی - اجتماعی منطقه مورد مطالعه را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، دستاوردهای این مطالعه می‌تواند به برنامه‌های مرتبط با آینده‌پژوهی منطقه مورد مطالعه و کشور بسیار کمک کند.

## سپاسگزاری

بدین وسیله نگارندگان از جناب آقای دکتر پیتر ویگاندا، عضو هیئت علمی دانشگاه نوادای ایالات متحده آمریکا، برای در اختیار قرار دادن مدل کلان مقیاس آب‌وهوایی (MCM) و بازخوانی چکیده انگلیسی مقاله، و همچنین از داوران محترم مقاله، برای پیشنهادهای مفید و تخصصی ایشان که باعث بهبود کیفیت مقاله شد، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## منابع

احمدی، محمود و عباس‌علی داداشی رودباری، رضا ابراهیمی (۱۳۹۶). «مدل‌سازی روابط فضایی اثر توپوگرافی بر دورنمای نیاز گرمایشی ایران با استفاده از مدل میان‌مقیاس منطقه‌ای RegCM4»، *برنامه‌ریزی و آمایش و فضا*، د ۲۱، ش ۳، صص ۲۷ - ۵۳.

اکبری‌ازیرانی، طیبه (۱۳۹۶). «مدل‌سازی و تحلیل آب‌وهوای کوتاه‌تر کوه‌های تالش»، *پنجمین همایش ملی انجمن ایرانی ژئومورفولوژی*، دانشگاه فردوسی مشهد.

اکبری‌ازیرانی، طیبه (۱۳۹۱). «بازسازی تاریخچه پوشش گیاهی و آب‌وهوای دیرینه غرب کوه‌های تالش - شرق آذربایجان

(ایران) در اواخر دوره یخبندان و دوره هولوسن»، رساله دکتری، استاد راهنما: دکتر قاسم عزیزی، استاد مشاور: دکتر مرتضی جمالی و پروفسور فیلیپ پونل، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

براتی، غلامرضا و سید شفیع موسوی (۱۳۸۴). «جابه‌جایی مکانی موج‌های زمستانی گرما در ایران»، *جغرافیا و توسعه*، د ۳، شماره پیاپی ۵، صص ۴۱ - ۵۲.

شمسی‌پور، علی‌اکبر (۱۳۹۳). *مدل‌سازی آب‌وهوایی نظریه و روش*، چ ۲، انتشارات دانشگاه تهران.

صفرزاده، طاهر و حسن‌علی فرجی سبکبار، قاسم عزیزی، رحیم‌علی عباس‌پور (۱۳۹۲). «تحلیل مکانی تغییرات بارش در زاگرس میانی از طریق روش‌های زمین‌آمار (۱۹۹۵ - ۲۰۰۴)»، *جغرافیا و توسعه*، د ۱۱، ش ۳۱، صص ۱۴۹ - ۱۶۲.

عساکره، حسین (۱۳۸۷). «کاربرد روش کریجینگ در میان‌یابی بارش»، *جغرافیا و توسعه*، د ۱۲، ش ۱۲، صص ۲۵ - ۴۲.

مددی، عقیل و محمدحسین رضایی مقدم، عبدالحمید رجایی اصل (۱۳۸۳). «پژوهشی در تکامل ژئومورفولوژی دریاچه نئور، شمال غرب ایران، منطقه اردبیل»، *تحقیقات جغرافیایی*، د ۱۹، ش ۳، صص ۹۲ - ۱۰۳.

مسعودیان، سید ابوالفضل (۱۳۹۰). *آب‌وهوای ایران*، شریعه توس.

مصطفی‌زاده، رئوف و محسن ذیحی (۱۳۹۵). «تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی با استفاده از نرم‌افزار R (بررسی مورد: استان کردستان)»، *فیزیک زمین و فضا*، د ۴۲، ش ۳، صص ۶۳۳ - ۶۴۳.

مقیم، ابراهیم (۱۳۸۷). *ژئومورفولوژی اقلیمی قلمرو سرد و یخچالی*، انتشارات دانشگاه تهران.

نصرتی، کاظم (۱۳۹۳). «ارزیابی شاخص بارش - تبخیر تعرق استاندارد شده (SPEI) جهت شناسایی خشک‌سالی در اقلیم‌های مختلف ایران»، *علوم محیطی*، د ۱۲، ش ۴، صص ۶۳ - ۷۴.

وزیری، ژاله و محمدرضا انتصاری، نادر حیدری، علی‌رضا سلامت، محمود مسچی، حسین دهقانی سانج (۱۳۷۸). «تبخیر تعرق گیاهان (دستورالعمل محاسبه آب مورد نیاز گیاهان)»، گروه کار استفاده پایدار از منابع آب برای تولید محصولات کشاورزی با هماهنگی فائو (در ترجمه بخشی از گزارش منتشر شده فائو به وسیله آلن و همکاران ۱۹۹۸)، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ص ۱۱۰.

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998), *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*, FAO - Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome (<http://www.fao.org/docrep/>).
- Aubert, C., Brisset, E., Djamali, M., Sharifi, A., Ponel, P., Gambin, B., Akbari azirani, T., Guibal, F., Lahijani, H., Naderi beni, A., De beaulieu, J., Pourmand, A., Andrieu-ponel, V., Thie'ry, A., Gandouin, E. (2017). Late glacial and early Holocene hydroclimate variability, *JOURNAL OF PALEOLIMNOLOGY*, Vol. 17, pp. 1-17.
- Ault, T. R., Cole, J. E., Overpeck, J. T., Pederson, G. T., Meko, D. M. (2014). Assessing the risk of persistent drought using climate model simulations and paleoclimate data. *Journal of Climate*, 27 (20), 7529-7549.
- Barancourt, C., Creutin, J. D., Rivoirard, J. (1992). A method for delineating and estimating rainfall fields. *Water Resources Research*, 28 (4), pp. 1133-1144.
- Berne, A., Delrieu, G., Creutin, J. D., Obled, C. (2004). Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*, 299 (3), pp. 166-179.
- Bryson, R. A. (1989). Modelling the NW India monsoon for the last 40 000 years. *Climate Dynamics*, 3 (4), pp. 169-177.

- Bryson, R. A. & DeWall, K. M. (2007). An introduction to the archaeoclimatology macrophysical climate model. *A Paleoclimatology Workbook: High Resolution, Site-Specific, Macrophysical Climate Modeling*, Bryson RA, DeWall KM (eds). *The Mammoth Site: Hot Springs, SD*, pp. 3-11.
- Delhomme, J. P. (1978). Kriging in the hydrosociences. *Advances in water resources*, 1 (5), pp. 251-266.
- Delworth, T. L., Broccoli, A. J., Rosati, A., Stouffer, R. J., Balaji, V., Beesley, J. A., Durachta, J. W. (2006). GFDL's CM2 global coupled climate models. Part I: Formulation and simulation characteristics. *Journal of Climate*, 19 (5), pp. 643-674.
- Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228, pp. 113-129.  
<http://pei/es.csic.sac>
- Jamrichová, E., Potůčková, A., Horsák, M., Hajnalová, M., Barta, P., Tóth, P., Kuneš, P. (2014). Early occurrence of temperate oak-dominated forest in the northern part of the Little Hungarian Plain, SW Slovakia. *The Holocene*, 24 (12), pp. 1810-1824.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Zhu, Y. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 77 (3), pp. 437-471.
- Lin, S. J. (2004). A "vertically Lagrangian" finite-volume dynamical core for global models. *Monthly Weather Review*, 132 (10), pp. 2293-2307.
- Sauchyn, D. & Kerr, S. (2016). Canadian Prairies drought from a paleoclimate perspective. *Vulnerability and Adaptation to Drought*, p. 39.
- Sharifi, A. Murphy, LN., Pourmand, A., Clement, AC., Canuel, EA., Naderi Beni, A., Lahijani, HAK., Delanghe, D., Ahmady-Birgani, H. (2017). Early-Holocene greening of the Afro-Asian dust belt changed sources of mineral dust in West Asia, *Earth and Planetary Science Letters* 481 (2018), pp. 30-40.
- Sharifi, A., Pourmand, A., Canuel, AE., Ferer-Tyler, E., Peterson, LC., Aichner, B., Feakins, SJ., Daryaei, T., Djamali, M., Naderi Beni, A., Lahijani, HAK., Swart, PK. (2015). Abrupt climate variability since the last deglaciation based on a high-resolution, multi-proxy peat record from NW Iran: The hand that rocked the Cradle of Civilization? *Quaternary Sci Rev* 123: pp. 215-230.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23 (7), pp. 1696-1718.
- Woodhouse, C. A. & Overpeck, J. T. (1998). 2000 years of drought variability in the central United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (12), pp. 2693-2714.
- Wu, Y., Ting, M., Seager, R., Huang, H. P., Cane, M. A. (2011). Changes in storm tracks and energy transports in a warmer climate simulated by the GFDL CM2.1 model. *Climate dynamics*, 37 (1-2), pp. 53-72.