



بررسی روند شاخص خشکی در ایستگاه‌های نوار شمالی ایران طی دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۹

فیروز رنجبر^{۱*}، حسن طباطبایی^۲

^۱استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

^۲دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱/۲۳

چکیده

یکی از بزرگترین نگرانی‌های بشر در سال‌های اخیر، تأثیرات حاصل از تغییرات اقلیمی بر منابع طبیعی در سطوح محلی، منطقه‌ای و جهانی است. یکی از این اثرات، تغییر و روند در شاخص خشکی و دگرگونی شرایط هیدرواکولوژی مناطق می‌باشد. هدف این تحقیق بررسی روند شاخص خشکی (IA) در ایستگاه‌های نوار شمالی کشور طی دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۹ است. برای محاسبه‌ی تبخیر پتانسیل روزانه از معادله پنمن استفاده شده و در نهایت با استفاده از پارامترهای بارش و تبخیر پتانسیل مقادیر شاخص خشکی محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد در ایستگاه‌ها نوار شمالی ایران برای بازه زمانی ۱۹۸۲-۲۰۱۹ مقایسه بارش با روند کاهشی مواجه بوده است به طوری که در ایستگاه آنزلی مقادیر بارش‌ها در دوره ۲۰۱۹-۲۰۱۲ حدود ۳۰۰ میلی‌متر نسبت به دوره ۱۰ ساله ۱۹۹۱-۱۹۸۲ کاهش داشته است. از طرف دیگر مقادیر دما نیز در ایستگاه‌های شمال کشور با افزایش مواجه بوده است. مقادیر افزایش دما در ایستگاه‌های رشت، رامسر، گرگان، بابلسر و آنزلی به ترتیب حدود ۱، ۱/۷، ۰/۱، ۱/۹ و ۱/۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. بررسی‌ها نشان داد شاخص خشکی در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۹ دارای روند کاهشی است. بیشترین شیب کاهشی در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز مربوط به ایستگاه آنزلی بوده است. روند شاخص خشکی در دوره ۲۰۱۹-۲۰۱۲ نسبت به دوره ۱۰ ساله ۱۹۹۱-۱۹۸۲ در ایستگاه‌های رشت، رامسر، گرگان، بابلسر و آنزلی به ترتیب ۰/۱۷۸، ۰/۰۱۱، ۰/۰۹۱، ۰/۱۴۲ و ۰/۴۲۰ بوده است.

واژه‌های کلیدی: شاخص خشکی، تبخیر پتانسیل، تغییر اقلیم، بارش، دما.

مقدمه

یکی از بزرگترین نگرانی‌های بشر در سال‌های اخیر، تأثیرات حاصل از تغییرات اقلیمی بر منابع طبیعی در سطوح محلی، منطقه‌ای و جهانی است (الکساندرو و هوگنبووم^۲، ۲۰۰۰؛ ریلی و همکاران^۳، ۲۰۰۰). بدین سبب است که در دو دهه گذشته، پژوهش‌های متعدد میان رشته‌ای با هدف بررسی اثرات احتمالی تغییرات اقلیمی بر منابع آب و زمین و

اکوسیستم‌های کشاورزی، انجام شده است (یانو و همکاران، ۲۰۰۷)^۴. دامنه‌ی تحقیقات مورد اشاره بسیاری از جنبه‌های محیطی و مرتبط با زیست انسان و سایر موجودات را در بر می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به اثر تغییرات آب‌وهوایی بر بهداشت و سلامت، مخاطرات محیطی، منازعات و امنیت کشورها، منابع آب، زیست اقلیم، توریسم، کشاورزی، امنیت غذایی، اقتصاد و غیره اشاره کرد.

*نویسنده مسئول: franjbar464@gmail.com

2. Alexandrov and Hoogenboom

3. Reilly et al

4. Yano et al

مجموع تبخیر پتانسیل به بارش سالانه و یا بالعکس ارائه شده است. بر اساس برنامه محیط زیست سازمان ملل^۹، شاخص خشکی از نسبت مقادیر بارش سالانه (P) به مقادیر تبخیر پتانسیل (E_p) به دست می‌آید (سahin^{۱۰}، ۲۰۱۲). بر این اساس مناطق در پنج دسته فراخشک با شاخص خشکی کمتر از ۰/۰۳، خشک با شاخص خشکی بین ۰/۲ تا ۰/۵۰، نیمه خشک با شاخص خشکی ۰/۲۰ تا ۰/۶۵ و مرطوب با شاخص خشکی ۰/۶۵ تا ۰/۲۰ و مرطوب با شاخص خشکی بیش از ۰/۶۵ تقسیم می‌شوند (مالویا و مسیمر، ۲۰۱۲)^{۱۱}. از این منظر که شاخص مذکور هم بخش نیاز آبی و هم منابع آبی را مورد توجه قرار داده، معیاری مناسب در بررسی‌های اکوهیدرولوژی یک منطقه است (نوری و همکاران، ۱۳۹۵) و معیار مناسب برای سنجش خشکی و مرطوب در مناطق خشک است (کیمورا و موریاما، ۲۰۲۱)^{۱۲}. بررسی روند تغییرات این شاخص در طی سالیان می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های محیطی به خصوص در بخش کشاورزی جهت آینده نگری و جلوگیری از خسارات احتمالی ناشی از کمبود رطوبت و منابع آب یاری‌رسان باشد.

پژوهش‌های فراوانی در سطح بین‌المللی و ملی بر روند تغییرات شاخص خشکی در مناطق مختلف انجام شده است. نوری و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی روند تغییرات شاخص خشکی در شمال غرب ایران در بازه‌ی زمانی ۱۹۶۶ تا انتهای قرن ۲۱ میلادی پرداخته و مشاهده کردند که شاخص خشکی برای مناطق هواشناسی مذکور در طی سالیان گذشته کاهش یافته و پیش‌بینی می‌شود که شاخص خشکی تا انتهای قرن ۲۱، ۱۷ درصد کاهش یابد. لیو و همکاران (۲۰۱۱)^{۱۳} در تحقیقی تغییرات مکانی و زمانی شاخص خشکی در شمال غربی چین را بررسی کردند. بر اساس نتایج آنها، شیب تغییرات شاخص خشکی در طی بازه زمانی

بر اساس پنجمین گزارش (IPCC^۱)، میانگین دمای جهانی در بازه‌ی زمانی ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۲ میلادی از ۰/۶۵ تا ۱/۰۶ درجه سانتی‌گراد و به طور متوسط ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است، همچنین پیش‌بینی می‌شود روند افزایش دمای هوا شدیدتر شود (IPCC، ۲۰۱۴). برخی پیش‌بینی‌ها نیز نشان می‌دهد که متوسط دمای هوای جهانی در ۵۰ سال آینده بین ۰/۶ تا ۲/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد (خاسنیس و نتلمن، ۲۰۰۵)^۲.

هرچند بیشترین تمرکز افکار عمومی در مسئله تغییرات اقلیمی، متوجه گرمایش زمین است اما روشن است که عواملی دیگری نیز بر شرایط اقلیمی اثرگذار است. یکی از مهمترین عوامل بر شرایط اقلیمی هر منطقه، مقدار و الگوی بارش است. لذا تغییرات در خشکی مناطق متأثر از تغییر الگو و مقدار بارش، از جمله اثرات اولیه پیش‌بینی شده بر اثر ناهنجاری‌های اقلیمی است (دای^۳، ۲۰۱۲؛ ترنبرس^۴ و همکاران، ۲۰۱۳؛ وانگ و زانگ، ۲۰۲۰). در تحقیقات متعدد پیش‌بینی شده است که مناطقی با اقلیم نیمه‌خشک که از نظر منابع آبی با محدودیت‌های زیادی روبرو هستند، بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات آب و هوایی دارند در حالی که مناطق مرطوب ممکن است کمتر تحت تأثیر قرار گیرند (ویسنته سرانو و همکاران، ۲۰۰۶)^۵.

شاخص‌های متعددی برای طبقه‌بندی اقلیمی از منظر خشکی تعریف شده است. برخی شاخص‌ها نظیر طبقه‌بندی دمارتن، نسبت بین مقادیر میانگین سالانه بارش (P) و دما (T) را مبنای دسته‌بندی قرار می‌دهند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱). یکی از شناخته شده‌ترین شاخص‌ها برای طبقه‌بندی اقلیمی شاخص خشکی آست (زارع و همکاران، ۱۳۹۵؛ آرورا^۸، ۲۰۰۲). در منابع مختلف، شاخص خشکی به صورت نسبت

5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
2. Khasnis and Nettleman
3. Dai
4. Trenberth et al
5. Vicente-Serrano et al
6. Wang et al
7. aridity index
8. Arora

9. NEP

10. Sahin

11. Maliva and Missimer

12. Kimura and Moriyama

13. Liu et al

محاسبه شاخص خشکی: در این پژوهش برای محاسبه‌ی تبخیر پتانسیل روزانه از معادله پنمن به صورت زیر استفاده شد (بورمان و همکاران، ۱۹۹۶).

$$\lambda E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 6.43 (e_s - e_a) f(u) \quad 1$$

که در رابطه فوق λE_p تبخیر پتانسیل (مگاژول بر مترمربع بر روز)، Δ منحنی فشار بخار اشباع-دما (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، γ ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، R_n خالص تابش رسیده در سطح (مگاژول بر مترمربع بر روز)، G شار گرمای خاک (مگاژول بر مترمربع بر روز)، $f(u)$ تابع تغییرات فصلی سرعت باد (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_a فشار واقعی (کیلوپاسکال) می‌باشد. $f(u)$ نیز خود از رابطه‌ی ۲ بدست می‌آید:

$$f(u) = a_w + b_w (u_z) \quad 2$$

دو جز a_w و b_w در رابطه‌ی فوق از معادله‌ی زیر قابل محاسبه می‌باشند:

$$a_w = 0.4 + 1.4 \exp\left(-\left[\frac{D-173}{58}\right]^2\right) \quad 3$$

$$b_w = 0.007 + 0.004 \exp\left(-\left[\frac{D-243}{80}\right]^2\right) \quad 4$$

در رابطه فوق D عبارت است از روز سال (میلادی). پس از محاسبه تبخیر روزانه طی سال، تبخیر سالانه مطابق رابطه ۵ محاسبه شد.

$$E_{p\text{annual}} = 0.408 \sum_{D=1}^{365} \lambda E_{pD} \quad 5$$

ضریب 0.408 به سبب تبدیل واحد تبخیر از مگاژول بر متر مربع بر روز به میلی‌متر در روز است. با استفاده از تبخیر پتانسیل سالانه و بارش سالانه مطابق رابطه ۶ شاخص خشکی محاسبه گردید که به صورت نسبت تبخیر پتانسیل سالانه به بارش سالانه تعریف می‌گردد (آرورا، ۲۰۱۲):

$$\phi = \frac{P_{\text{annual}}}{E_{p\text{annual}}} \quad 6$$

میزان اثرپذیری عوامل مؤثر بر شاخص خشکی در مناطق مورد بررسی با استفاده از شاخص ناهنجاری

۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰ برابر 0.48 - بوده است. این کاهش در شرایطی بوده که روند تغییرات بارش سالانه در شمال چین افزایشی بوده و کاهش شاخص خشکی در آن منطقه به سبب افزایش متوسط دما و به طبع آن افزایش تبخیر پتانسیل بوده است. وانگ و زانگ (۲۰۲۰)^۱ در پژوهشی با هدف ارزیابی شاخص خشکی قاره آسیا، پیش‌بینی کردند که به ازای هر درجه افزایش متوسط دما، شاخص خشکی 0.02 واحد کاهش می‌یابد که به معنای کاهش نسبت منابع آب به نیاز آبی است. زانگ و همکاران (۲۰۲۲) در یک پژوهش به اثر تغییر اقلیم در وضعیت اقلیمی چین در ۶۰ سال گذشته و آینده پرداختند. نتایج مدل GCM نشان داد که تا پایان این قرن، آب و هوا در چین روند کلی خشک شدن خواهد داشت. مناطق خشک‌تر عمدتاً در مرکز و بخش‌های شرقی چین، در حالی که مناطق غربی چین همچنان روند مرطوب را حفظ می‌کنند. این تحقیق به منظور بررسی روند شاخص خشکی در نوار شمالی کشور انجام شده است. میزان بارش‌ها در این منطقه نسبت به بخش‌های داخلی کشور بالاتر می‌باشد لذا زیست بوم این ناحیه نیز به تبع این نوع آب و هوا متفاوت خواهد بود. با توجه به بالا بودن تراکم جمعیت و وابستگی بخش زیادی از این جمعیت به فعالیت‌های کشاورزی، بررسی شاخص‌های کاربردی آب و هواشناسی و روند آنها دارای اهمیت می‌باشد. بدین منظور تبخیر پتانسیل سالانه با استفاده از رابطه پنمن (۱۹۶۰)^۲ به صورت روزانه محاسبه و با دخیل کردن بارش سالانه، شاخص خشکی و تغییرات آن تحلیل شده است.

داده‌ها روش تحقیق

پژوهش حاضر به منظور بررسی روند و تغییرات شاخص خشکی در نوار شمالی کشور انجام شده است. برای این منظور از داده‌های روزانه دما و بارش ایستگاه‌های سینوپتیک گرگان، رشت، رامسر، بابلسر و انزلی در دوره ۱۹۶۱-۲۰۲۰ استفاده شده است)

1. Wang and hang
2. Penman

که در رابطه فوق A_n شاخص ناهنجاری نرمال شده، X_i متغیر مورد بررسی در سال i ام، X_{avg} متوسط متغیر در طول دوره زمانی و σ انحراف معیار متغیر در طول دوره زمانی مورد بررسی است.

$$b_w = 0.007 + 0.004 \exp\left(-\left[\frac{D-244}{\lambda_0}\right]^2\right) \quad 4$$

در رابطه فوق D عبارت است روز سال (میلادی). پس از محاسبه تبخیر روزانه طی سال، تبخیر سالانه مطابق رابطه ۵ محاسبه شد.

$$E_{p_{annual}} = 0.408 \sum_{D=1}^{365} \lambda E_{pD} \quad 5$$

ضریب 0.408 به سبب تبدیل واحد تبخیر از مگاژول بر متر مربع بر روز به میلی‌متر در روز است. با استفاده از تبخیر پتانسیل سالانه و بارش سالانه مطابق رابطه ۶ شاخص خشکی محاسبه گردید که به صورت نسبت تبخیر پتانسیل سالانه به بارش سالانه تعریف می‌گردد (آرورا، ۲۰۱۲):

$$\phi = \frac{P_{annual}}{E_{p_{annual}}} \quad 6$$

میزان اثرپذیری عوامل مؤثر بر شاخص خشکی در مناطق مورد بررسی با استفاده از شاخص ناهنجاری نرمال شده محاسبه شده که در رابطه ۷ ارائه شده است:

$$A_n = \frac{X_i - X_{avg}}{\sigma} \quad 7$$

که در رابطه فوق A_n شاخص ناهنجاری نرمال شده، X_i متغیر مورد بررسی در سال i ام، X_{avg} متوسط متغیر در طول دوره زمانی و σ انحراف معیار متغیر در طول دوره زمانی مورد بررسی است.

نرمال شده محاسبه شده که در رابطه ۷ ارائه شده است:

$$A_n = \frac{X_i - X_{avg}}{\sigma} \quad 7$$

جدول ۱).

محاسبه شاخص خشکی: در این پژوهش برای محاسبه تبخیر پتانسیل روزانه از معادله پنمن به صورت زیر استفاده شد (بورمان و همکاران، ۱۹۹۶).

$$\lambda E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 6.43 (e_s - e_a) f(u) \quad 1$$

که در رابطه فوق λE_p تبخیر پتانسیل (مگاژول بر مترمربع بر روز)، Δ منحنی فشار بخار اشباع-دما (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، γ ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، R_n خالص تابش رسیده در سطح (مگاژول بر مترمربع بر روز)، G شار گرمای خاک (مگاژول بر مترمربع بر روز)، $f(u)$ تابع تغییرات فصلی سرعت باد (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال) می‌باشد. $f(u)$ نیز خود از رابطه ۲ بدست می‌آید:

$$f(u) = a_w + b_w (u_z) \quad 2$$

دو جز a_w و b_w در رابطه ۲ فوق از معادله ۳ زیر قابل محاسبه می‌باشند:

$$a_w = 0.4 + 1.4 \exp\left(-\left[\frac{D-173}{58}\right]^2\right) \quad 3$$

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه.

ایستگاه	ارتفاع	طول جغرافیایی (E)	عرض جغرافیایی (N)
گران	۱۳/۳	۵۴° ۱۶'	۳۶° ۵۱'
بابلسر	-۲۱	۵۳° ۳۹'	۳۶° ۴۳'
رامسر	-۲۰	۵۰° ۴۰'	۳۶° ۵۴'
رشت	۳۶/۷	۴۹° ۳۹'	۳۷° ۱۲'
انزلی	-۲۶/۲	۴۹° ۲۸'	۳۷° ۲۸'

یافته های پژوهش

دمای هوا در دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۹ با بیشترین روند افزایشی همراه بوده است، به طوری که در ایستگاه بابلسر دمای حداقل حدود ۱/۹ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره ۱۹۹۱-۱۹۸۲ با افزایش همراه بوده است. بعد از ایستگاه بابلسر نیز ایستگاه رامسر بیشترین افزایش دمای حداقل را در دوره ۲۰۱۹-۲۰۱۲ نسبت به دوره ۱۹۹۱-۱۹۸۲ تجربه کرده است که این میزان حدود ۱/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

تغییرات دما: بر اساس بررسی‌های آماری، دمای ایستگاه‌های مورد مطالعه در طول دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۹ با روند و تغییراتی همراه است که این روند یک شیب افزایشی در در دمای حداقل و حداکثر را نشان می‌دهد.

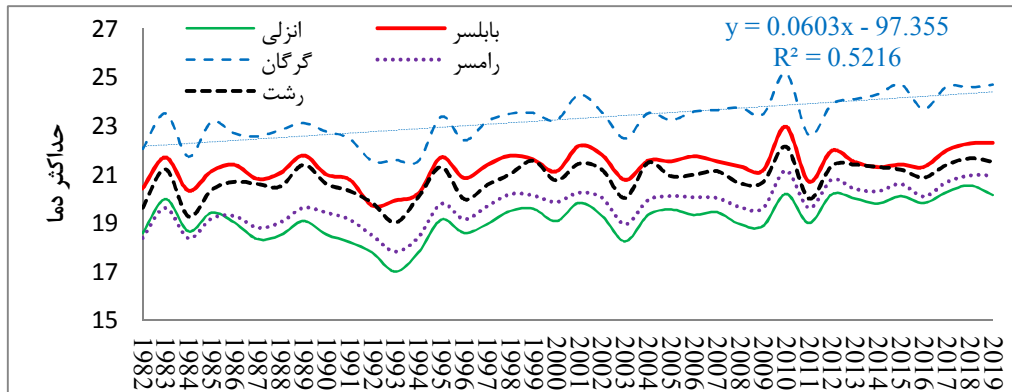
جدول زیر میزان تغییرات دمای حداکثر و حداقل ایستگاه‌های مورد مطالعه در نوار شمالی کشور را در دوره‌های ۱۹۹۱-۱۹۸۲، ۱۹۹۲-۲۰۰۱، ۲۰۰۲-۲۰۱۱ و ۲۰۱۱-۲۰۱۹ نشان می‌دهد. در این جدول

جدول ۲: تغییرات دمای حداقل و حداکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره‌های ۱۰ ساله

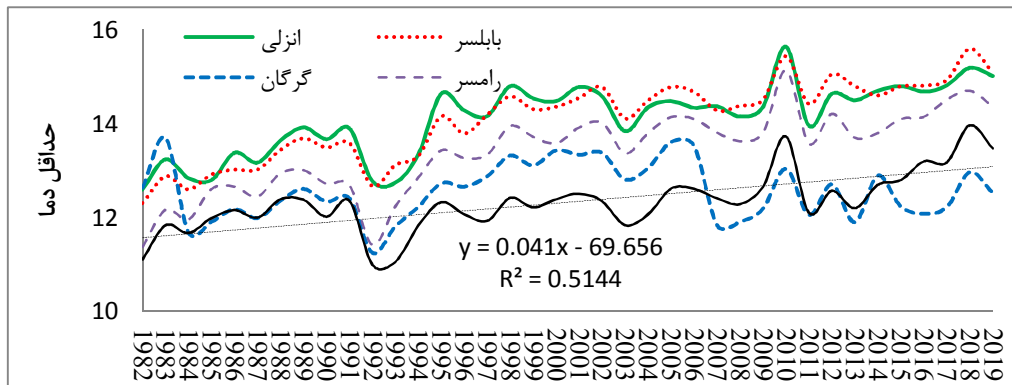
متغیر	بازه زمان					رشت	رامسر	گرگان	بابلسر	انزلی
حداقل دما	۱۹۹۱-۱۹۸۲					۱۲	۱۲/۵	۱۲/۴	۱۳/۱	۱۳/۳
	۲۰۰۱-۱۹۹۲					۱۲	۱۳/۲	۱۲/۷	۱۳/۹	۱۴/۱
	۲۰۱۱-۲۰۰۲					۱۲/۵	۱۳/۹	۱۲/۷	۱۴/۶	۱۴/۴
	۲۰۱۹-۲۰۱۲					۱۳	۱۴/۲	۱۲/۴	۱۵/۰	۱۴/۸
تغییرات دمای دوره ۲۰۱۹-۲۰۱۲ نسبت به ۱۹۹۱-۱۹۸۲						۱/۰	۱/۷	۰/۱	۱/۹	۱/۵
حداکثر دما	۱۹۹۱-۱۹۸۲					۲۰/۵	۱۹/۱	۲۲/۷	۲۱	۱۸/۸
	۲۰۰۱-۱۹۹۲					۲۰/۶	۱۹/۴	۲۲/۸	۲۱	۱۸/۷
	۲۰۱۱-۲۰۰۲					۲۱	۱۹/۹	۲۳/۵	۲۱/۵	۱۹/۲
	۲۰۱۹-۲۰۱۲					۲۱/۳	۲۰/۶	۲۴/۳	۲۱/۸	۲۰/۱
تغییرات دمای دوره ۲۰۱۹-۲۰۱۲ نسبت به ۱۹۹۱-۱۹۸۲						۰/۹	۱/۵	۱/۶	۰/۷	۱/۳

بیشتر دمای حداقل نسبت به دمای حداکثر می‌باشد. اشکال زیر روند دمای حداقل و حداکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه را طی دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۹ نشان می‌دهد. بر اساس این اشکال کمترین دما در دوره مورد نظر مربوط به سال ۱۹۹۳ و بیشترین دما مربوط به سال ۲۰۱۰ می‌باشد. در واقع در سال ۲۰۱۰ دمای حداقل و حداکثر در تمام ایستگاه‌ها نسبت به سایر سال‌های مورد مطالعه بالاتر بوده است.

بر اساس جدول زیر، میزان دمای حداکثر نیز مانند دمای حداقل در ایستگاه‌های مورد مطالعه با روند افزایشی همراه است. طبق این جدول بیشترین افزایش در دمای حداکثر مربوط به ایستگاه گرگان به میزان ۱/۶ درجه سانتی‌گراد و بعد از ایستگاه گرگان نیز ایستگاه رامسر با ۱/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش دمای بیشتری را نسبت به سایر ایستگاه‌ها تجربه کرده است. نکته مهم در تغییرات دمای حداقل و حداکثر، شیب



شکل ۱: تغییرات دمای حداکثر در ایستگاه‌های مورد مطالعه.



شکل ۲: تغییرات دمای حداقل در ایستگاه‌های مورد مطالعه

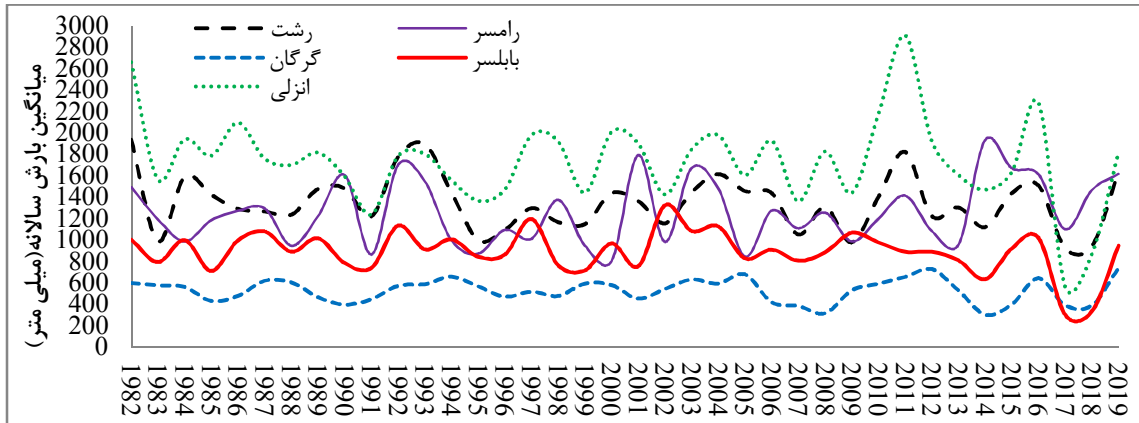
مطالعه کمترین تغییرات از سالی به سال دیگر مربوط به ایستگاه گرگان می‌باشد. شکل زیر تغییرات سال به سال بارش را برای ایستگاه‌های نوار شمالی نشان می‌دهد. همچنین جدول زیر مقادیر بارش در دوره های ۱۰ ساله را نشان می‌دهد. همانگونه که در جدول زیر مشخص است، مقادیر بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره ۲۰۱۹-۲۰۱۲ یک کاهش نسبت به دوره‌های قبل داشته است. در دوره ۲۰۱۹-۲۰۱۲ مقدار بارش ایستگاه انزلی نسبت به دوره ۱۰ ساله ۲۰۱۱-۲۰۰۲ حدود ۳۰۰ میلی‌متر کاهش داشته است.

تغییرات بارش: مقادیر بارش در ایستگاه‌های مورد مطالعه به لحاظ میانگین بلند مدت با یکدیگر تفاوت دارد به طوری که بیشترین بارش‌ها مربوط به ایستگاه‌های غربی مانند ایستگاه انزلی و بارش‌های کمتر در ایستگاه‌های شرقی مانند گرگان نازل می‌شود. میانگین بارش ایستگاه گرگان در دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۹ حدود ۵۲۸ میلی‌متر و میانگین بارش ایستگاه انزلی در دوره مشابه حدود ۱۷۳۹ میلی‌متر بوده است. در دوره مطالعاتی، مقادیر بارش در ایستگاه‌های نوار شمالی از سالی به سال دیگر با تغییرات و افت و خیزهایی همراه است. در بین ایستگاه‌های مورد

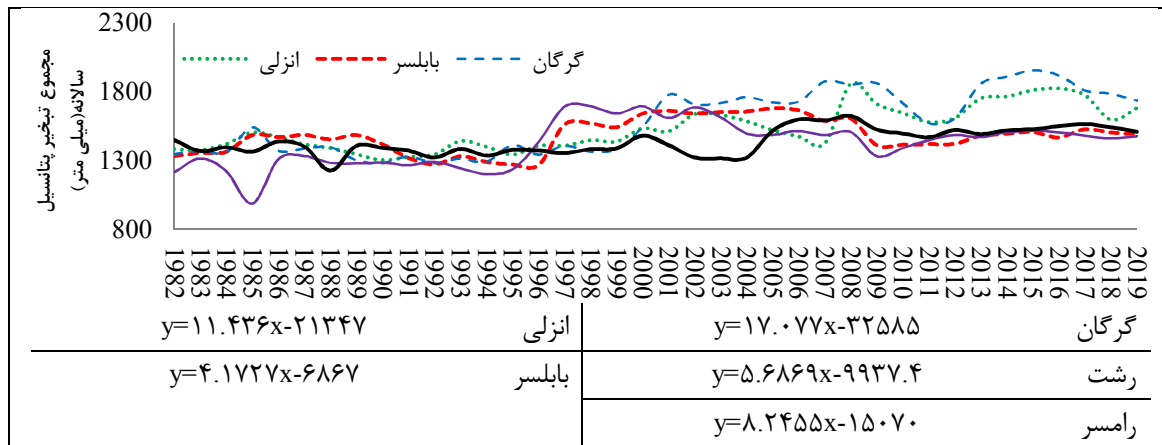
جدول ۳: وضعیت بارش و تغییرات آن در دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۹

دوره	انزلی	بابلسر	گرگان	رامسر	رشت
۱۹۹۱-۱۹۸۲	۱۸۱۶/۷	۹۰۱/۲	۵۱۶/۸	۱۲۰۶/۷	۱۳۹۱/۴
۲۰۰۱-۱۹۹۲	۱۷۲۴/۴	۸۹۹/۶	۵۴۶/۵	۱۲۱۴/۴	۱۳۶۲/۴
۲۰۱۱-۲۰۰۲	۱۸۵۵/۱	۹۹۰/۱	۵۳۳/۴	۱۲۲۲/۲	۱۳۶۷/۷
۲۰۱۹-۲۰۱۲	۱۵۲۱/۳	۷۳۱/۲	۵۱۴/۱	۱۴۳۰/۲	۱۲۶۲/۱
اختلاف دوره ۲۰۰۱-۱۹۹۲	-۹۲/۳	-۱/۶	۲۹/۷	۷/۷	-۲۸/۹

					نسبت به ۱۹۹۱-۱۹۸۲
۵/۳	۷/۸	-۱۳/۱	۹۰/۵	۱۳۰/۷	اختلاف دوره ۲۰۱۱-۲۰۰۲ نسبت به ۱۹۹۲-۲۰۰۱
-۱۰۵/۶	۲۰۸/۰	-۱۹/۴	-۲۵۸/۹	-۳۳۳/۷	اختلاف دوره ۲۰۱۹-۲۰۱۲ نسبت به ۲۰۱۱-۲۰۰۲
$y = -10365x + 5064$	$y = 10192x + 7245$	$y = -61843x + 6570$	$y = -10799x + 9524$	$y = -15462x + 8606$	خط برازش داده شده به سری زمانی بارش



شکل ۳: تغییرات سال به سال بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه.



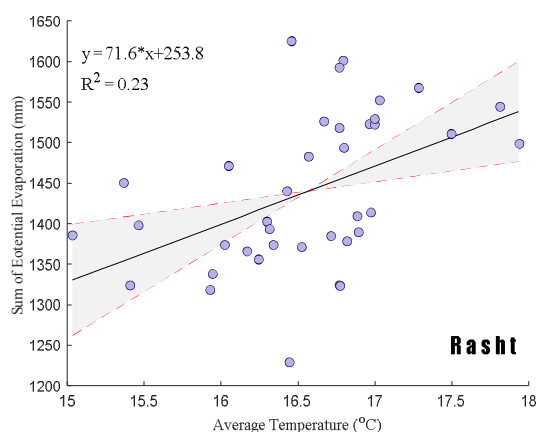
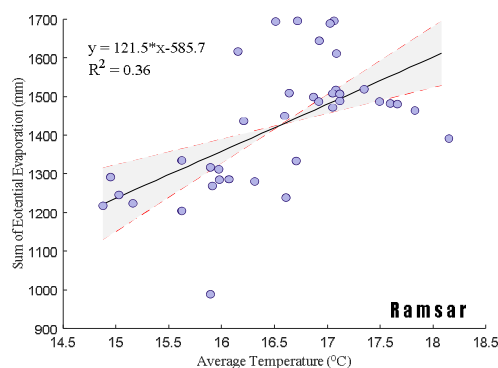
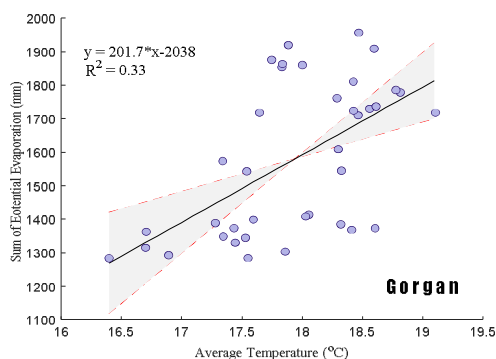
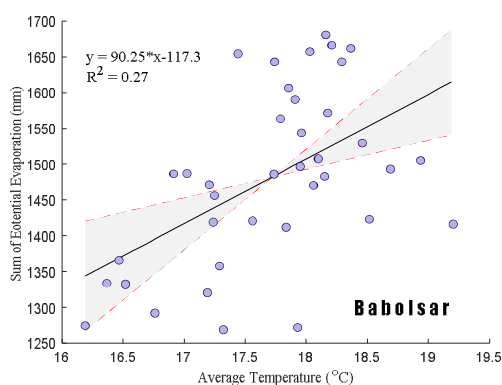
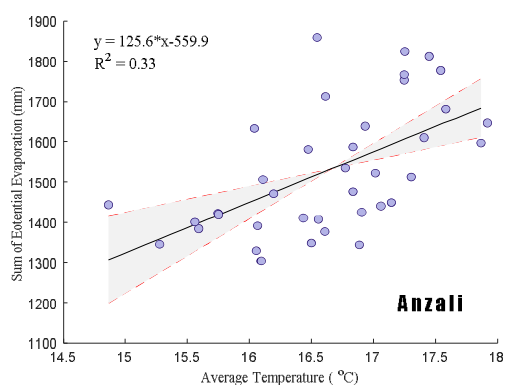
شکل ۴: تغییرات تبخیر در دوره مورد مطالعه

میزان تبخیر در هر منطقه‌ای به میزان دما و

بررسی شرایط تبخیر نشانگر وجود یک روند افزایشی در دوره مطالعاتی می‌باشد. شکل زیر تغییرات تبخیر در ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مطابق این شکل همانند دما و بارش، میزان تبخیر نیز دارای تغییرات سال به سال می‌باشد و در مجموع روند آن در تمام ایستگاه‌ها افزایشی بوده است. همانگونه که در شکل زیر مشهود است، شیب تبخیر در ایستگاه‌های مورد مطالعه مثبت بوده و بیشترین افزایش به ترتیب مربوط به گرگان و انزلی می‌باشد.

ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل مقادیر R برای ایستگاه انزلی ۰/۵۷، ایستگاه بابلسر ۰/۵۱، ایستگاه گرگان ۰/۵۷، ایستگاه رامسر ۰/۶۰ و ایستگاه رشت ۰/۴۷ است که بیانگر ارتباط بین دمای هوا و میزان تبخیر در این منطقه می‌باشد.

رطوبت هوا بستگی دارد. در مباحث قبل عنوان شد در ایستگاه‌های مورد مطالعه دمای هوا از ابتدای دوره تا انتهای دوره با افزایش مواجه بوده است. لذا این روند افزایشی دما می‌تواند منجر به افزایش تبخیر نیز گردد. اشکال زیر ارتباط بین تبخیر و میانگین دمای هوا در



شکل ۵: ارتباط میانگین دما و تبخیر در منطقه مورد مطالعه

همچنین میزان شاخص خشکی از غرب به شرق نوار شمالی کاهش پیدا می‌کند.

بر اساس نتایج شاخص خشکی، در دوره مطالعاتی ۱۹۸۲-۲۰۱۹ به طور میانگین ایستگاه‌های انزلی، بابلسر، رشت و رامسر در منطقه مرطوب قرار دارند و ایستگاه گرگان نیز در منطقه نیمه خشک قرار دارد.

جدول ۴: میانگین شاخص خشکی در دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۹.

ایستگاه	شاخص خشکی	دسته بندی
---------	-----------	-----------

۱/۳۰ بوده که این مقدار در دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۹ به حدود ۰/۸۷ رسیده است. همچنین مقدار AI در ایستگاه بابلسر در دوره ۱۹۸۲-۱۹۹۱ حدود ۰/۶۳ (مرطوب) بوده که این مقدار در دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۹ به حدود ۰/۴۹ (نیمه مرطوب) رسیده است. در ایستگاه گرگان نیز میزان AI در دوره ۱۹۸۲-۱۹۹۱ حدود ۰/۳۷ (نیمه خشک) بوده و در دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۹ به حدود ۰/۲۸ (نیمه خشک) رسیده است. این رخداد نشان می‌دهد با ادامه شرایط فعلی اقلیمی، ایستگاه گرگان از نظر شاخص خشکی وارد منطقه خشک خواهد شد. در ایستگاه رشت نیز این روند کاهشی در مقدار AI مشاهده می‌گردد. در این ایستگاه مقدار AI در دوره ۱۹۸۲-۱۹۹۱ حدود ۱ (مرطوب) بوده که در دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۹ به حدود ۰/۸۲ (مرطوب) رسیده است و این روند نشان می‌دهد در آینده در صورت ادامه روند فعلی ایستگاه رشت به منطقه نیمه مرطوب آب و هوایی به لحاظ شاخص خشکی وارد خواهد شد.

انزلی	۱/۱۴۵	مرطوب
بابلسر	۰/۶۰۷	نیمه مرطوب
گرگان	۰/۳۴۴	نیمه خشک
رامسر	۰/۸۹۴	مرطوب
رشت	۰/۹۴۳	مرطوب

نتایج حاصل از تحلیل روند شاخص خشکی در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد در تمامی ایستگاه‌ها میزان این شاخص رو به کاهش می‌باشد. این بدین معنی است که ایستگاه‌های مورد مطالعه در سال‌های اخیر با وضعیت بلند مدت در حال فاصله گرفتن می‌باشد و بر میزان خشکی آب و هوا افزوده می‌شود. جدول زیر میزان شاخص خشکی ایستگاه‌های مورد مطالعه را به تفکیک ۴ دوره زمانی نشان می‌دهد. همانطور که در جدول مشخص است، میزان شاخص خشکی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در حال یک کاهش بوده که در ۲ دوره انتهایی ۲۰۰۲-۲۰۱۱ و ۲۰۱۲-۲۰۱۹ این روند کاهشی شدید تر است. در ایستگاه انزلی مقدار AI در دوره ۱۹۸۲-۱۹۹۱ حدود

جدول ۵: تغییرات شاخص خشکی در دوره مورد مطالعه

دوره زمانی		انزلی	بابلسر	گرگان	رامسر	رشت
۱۹۸۲-۱۹۹۱	IA	۱.۳۰۰۲۹۶	۰.۶۳۵۷۳۳	۰.۳۷۷۵۸۱	۰.۹۷۰۰۵۳	۱.۰۰۴۳۳۳
	ویژگی	مرطوب	نیمه مرطوب	نیمه خشک	مرطوب	مرطوب
۱۹۹۲-۲۰۰۱	IA	۱.۲۰۵۰۷۴	۰.۶۴۵۵۳۳	۰.۳۹۱۹۵۳	۰.۸۴۲۶۸۴	۰.۹۸۱۷۲۱
	ویژگی	مرطوب	نیمه مرطوب	نیمه خشک	مرطوب	مرطوب
۲۰۰۲-۲۰۱۱	IA	۱.۱۵۵۰۶۸	۰.۶۳۱۱۸۶	۰.۳۰۷۳۵۹	۰.۸۱۷۰۷۹	۰.۹۳۳۱۵۱
	ویژگی	مرطوب	نیمه مرطوب	نیمه خشک	مرطوب	مرطوب
۲۰۱۲-۲۰۱۹	IA	۰.۸۷۹۸۹۴	۰.۴۹۳۴۷۵	۰.۲۸۶۱۴۷	۰.۹۵۸۷۹۶	۰.۸۲۶۰۰۲
	ویژگی	مرطوب	نیمه خشک	نیمه خشک	مرطوب	مرطوب
اختلاف دوره ۱۹۹۲-۲۰۰۱ نسبت به ۱۹۸۲-۱۹۹۱		-۰.۰۹۵۲۲	۰.۰۰۹۸	۰.۰۱۴۳۷۲	-۰.۱۲۷۳۷	-۰.۰۱۷۱۱
اختلاف دوره ۲۰۰۲-۲۰۱۱ نسبت به ۱۹۹۲-۲۰۰۱		-۰.۰۵۰۰۱	-۰.۰۱۴۳۵	-۰.۰۸۴۵۹	-۰.۰۲۵۶۱	-۰.۰۵۴۰۷
اختلاف دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۹ نسبت به ۲۰۱۱-۲۰۰۲		-۰.۲۷۵۱۷	-۰.۱۳۷۷۱	-۰.۰۲۱۲۱	۰.۱۴۱۷۱۷	-۰.۱۰۷۱۵
اختلاف دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۹ نسبت به ۱۹۸۲-۱۹۹۱		-۰.۴۲۰۴	-۰.۱۴۲۲۶	-۰.۰۹۱۴۳	-۰.۰۱۱۲۶	-۰.۱۷۸۳۳

نیز افزایشی بوده است. میزان ارتباط شاخص خشکی با دمای هوا حدود ۰/۴۶- می‌باشد و بیانگر این مطلب است که با افزایش دما میزان شاخص خشکی روند کاهشی داشته است.

جدول زیر همبستگی بین تغییرات نرمال شده شاخص خشکی با مقادیر بارش سالانه، دمای هوا و تبخیر را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول بیشترین ارتباط شاخص خشکی با بارش بوده است، به طوری که با افزایش بارش‌ها، مقدار شاخص خشکی

جدول ۶: همبستگی ناهنجاری نرمال شده (A_n) شاخص خشکی، دمای متوسط سالانه، تبخیر پتانسیل سالانه و بارش سالانه

پارامتر	شاخص خشکی	میانگین دما	تبخیر پتانسیل	بارش
شاخص خشکی	۱	-۰/۴۶	-۰/۴۶	۰/۹۱
دمای متوسط سالانه	-۰/۴۶	۱	۰/۵۵	-۰/۲۴
تبخیر پتانسیل سالانه	-۰/۴۶	۰/۵۵	۱	-۰/۰۷
بارش سالانه	۰/۹۱	-۰/۲۴	-۰/۰۷	۱

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به منظور بررسی تغییرات شاخص خشکی (AI) در ایستگاه‌های نوار شمالی کشور انجام شده است. شاخص خشکی یکی از روش‌های طبقه‌بندی آب و هوایی می‌باشد که بر مبنای تبخیر و تعرق و میزان بارش محاسبه می‌شود. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد در دوره مطالعاتی ۱۹۸۲-۲۰۱۹ میزان دمای ایستگاه‌های نوار شمالی کشور به عنوان یک فاکتور اثرگذار در میزان تبخیر، با یک روند افزایشی مواجه می‌باشد. این افزایش در تمام ایستگاه‌ها مشاهده شده و در مقدار شیب با هم متفاوت می‌باشند. برای مثال در ایستگاه گرگان دمای حداکثر حدود ۱/۶ درجه سانتی‌گراد و در ایستگاه رامسر ۱/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش دما در دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۹ نسبت به دوره ۱۹۸۲-۱۹۹۱ وجود دارد. از طرف دیگر دمای حداقل نیز با یک شیب بیشتر نسبت به دمای حداکثر، در حال افزایش می‌باشد. برای مثال در ایستگاه بابلسر دمای حداقل حدود ۱/۹ درجه سانتی‌گراد در دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۹ نسبت به دوره ۱۹۸۲-۱۹۹۱ افزایش داشته است.

در ایستگاه‌های مورد مطالعه مقادیر بارش نیز به عنوان یک فاکتور کاربردی در محاسبه شاخص خشکی با تغییرات و روند همراه است. در دوره مورد مطالعه مقادیر بارش در ایستگاه‌های نوار شمالی کشور به جز رامسر با یک شیب کاهش مواجه است. بر اساس جدول ۳ میزان بارش ایستگاه انزلی در دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۹ حدود ۳۳۳ میلی‌متر نسبت به دوره ۲۰۰۲-۲۰۱۱ با کاهش مواجه بوده است. در سایر ایستگاه‌ها نیز این کاهش با مقادیر متفاوت مشاهده می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد همراه با افزایش دما و

کاهش بارش‌ها در دوره مطالعاتی، ایستگاه‌های نوار شمالی کشور با شیب کاهش شاخص خشکی مواجه هستند. کاهش مقدار AI در تمام ایستگاه‌ها وجود دارد و در برخی ایستگاه‌ها نیز با شیب بیشتری اتفاق افتاده است. برای مثال ایستگاه بابلسر در دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۹ به لحاظ شاخص خشکی در منطقه نیمه خشک قرار گرفته، این در حالی است که در دوره‌های قبل این ایستگاه در منطقه نیمه مرطوب قرار داشته است. همچنین در ایستگاه گرگان مقادیر شاخص خشکی با یک شیب کاهش مواجه است و در دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۹ در مرز قرارگیری در منطقه خشک بوده است. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد در اثر گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی منطقه مورد مطالعه با افزایش دما مواجه بوده که این افزایش در دمای حداقل با شیب بیشتری رخ داده است. از طرف دیگر کاهش بارش‌ها و نوسانات آن نیز باعث شده است تا ایستگاه‌های نوار شمالی کشور در سال‌های اخیر به لحاظ شاخص خشکی با یک روند کاهش مواجه باشند.

نتایج سایر پژوهش‌ها در ایران و جهان نیز نشان می‌دهد شاخص خشکی در اثر افزایش دمای جهانی رو به کاهش است. برای مثال نتایج تحقیق حاضر با مطالعات صورت گرفته توسط نوری و همکاران (۱۳۹۵) در شمال غرب ایران، لیو و همکاران (۲۰۱۱) در شمال غرب چین، وانگ و زانگ (۲۰۲۰) در قاره آسیا و زانگ و همکاران (۲۰۲۲) در کشور چین به لحاظ همخوانی نتایج، مطابقت دارد. کاهش در شاخص خشکی در بسیاری فعالیت‌های انسانی و زیست محیطی اثرگذار خواهد بود. افزایش در میزان نیاز آبی محصولات کشاورزی یکی از اثرات کاهش شاخص خشکی در منطقه می‌باشد که منجر به تنش

آسیب پذیری در برابر گرمایش جهانی می‌بایست در اولویت قرار گیرد.

در برابر خشکی و افزایش تعداد آبیاری خواهد شد. لذا برنامه‌ریزی بلند مدت جهت کاهش خسارتها و کاهش

منابع

۱. زارع، محمد، پور محمدی سمانه و حمید سودایی زاده (۱۳۹۵). دسته‌بندی مناطق همگن خشکی به کمک روش‌های گشتاور خطی و تحلیل خوشه‌ای، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۲ (پیاپی ۶۲).
۲. سهامی، زهرا و مهشید حائری (۱۳۸۹). صنعت بیمه و تغییر اقلیم - قسمت سوم (گزارشی از انجمن اقتصاد بیمه ژنو)، پژوهشکده بیمه.
۳. نوری، میلاد، مهدی همایی و محمد بنایا (۱۳۹۵). بررسی روند تغییرات شاخص خشکی طی دوره ۲۱۰۰-۱۹۶۶ در شمال غرب ایران، نشریه علمی - پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، شماره ۴، صص ۴۵۳-۴۳۹.
4. Alexandrov, V.A. and Hoogenboom, G. (2000). The impact of climate variability and change on crop yield in Bulgaria. *Agricultural and Forest Meteorology*. 104: 315-327.
5. Arora, Vivek, K. (2002). The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff, *Journal of Hydrology*, 265: 164-177.
6. Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models, *Nat. Clim. Change*, 3: 52-58.
7. Greve, P., Roderick, M.L., Ukkola, A.M. and Wada, Y. (2019). The aridity Index under global warming, *Environmental Research Letters*, 14: 4-13.
8. IPCC, Climate Change (2014). Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K., and Meyer, L.A., (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland; 151 pp.
9. Khasnis A.A. and Mary D. Nettleman (2005). Global Warming and Infectious Disease, *Archives of Medical Research*, 36: 689-696.
10. Imura, R., and Moriyama, M. (2021). Use of A MODIS Satellite-Based Aridity Index to Monitor Drought
- Conditions in Mongolia from 2001 to 2013, *Remote Sens*. 2021, 13, 2561. Liu, X., Zhang, D., Luo, Y., and Liu, C. (2012). Spatial and temporal changes in aridity index in northwest China: 1960 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 122(1-2), 307-316.
11. Maliva, R., and Missimer, T. (2012). Arid Lands Water Evaluation and Management. *Environmental Science and Engineering*.
12. Maunder. J.W. (1994). Dictionary of Global Climate Change, first published in North America in 1992 by Chapman & Hall, Inc.
13. Reilly, J., Schimmelfennig, D. & Lewandrowski, J. (2000). Global, regional and local food production and trade in a changing environment. In: *Climate Change and Global Crop Productivity* (Eds.: K.R. Reddy and H.F. Hodges). CABI Pub., New York, pp. 437-455.
14. Sahin, S. (2012). An aridity index defined by precipitation and specific humidity, *Journal of Hydrology*. 444-445: 199-208
15. Trenberth Kevin E, Aiguo Dai, G. Van der Schrier, P.D. Jones (2013). Global warming and changes in drought, *Nature Climate Change*, 4(1): 17-22.
16. Vicente-Serrano, S.M., Cuadrat-Prats, J.M., and Romo, A. (2006). Aridity influence on vegetation patterns in the middle Ebro Valley (Spain): Evaluation by means of AVHRR images and climate interpolations techniques. *Journal of Arid Environments*, 66: 353-375.
17. Wang, X., Dabang Jiang, and Xianmei Lang (2021). Future changes in Aridity Index at two and four degrees of global warming above preindustrial levels, 41: 278-294.
18. Wang F. and Jintao Zhang (2020) Arid/humid patterns over Asia in responseto national-committed emission

- irrigation demand and crop growth in a Mediterranean environment of Turkey. *Sensors*, 7: 2297-2315.
21. Zhang, C., Yuyu Ren, Lijuan Cao, Jia Wu, Siqu Zhang, Chuanye Hu and Sangbu Zhujie (2021). Characteristics of Dry-Wet Climate Change in China during the Past 60 Years and Its Trends Projection, *Atmosphere*, 13, 275.
- reductions under the Paris agreement, *Progress in Earth and Planetary Science*.
19. Werz, M. and Conley, L. (2012). *Climate Change, Migration, and Conflict (Addressing complex crisis scenarios in the 21st Century)*, Center for American progress, www.americanprogress.org.
20. Yano, T., Aydın, M. and Haraguchi, T. (2007). Impact of climate change on

