

تغییرپذیری فرین‌های اقلیمی براساس شاخص‌های ترکیبی و امواج گرمایی در گستره حوضه‌های آبریز کشور

حسین اسماعیلی^۱، احمد روشنی^{۲*} و فاطمه پرک^۲

^۱ کارشناس ارشد آب و هواشناسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۲ دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۲۳، تاریخ پذیرش: ۹۷/۴/۱۹

چکیده

تغییرات آب و هوایی و گرمایش جهانی اثرات بسیار زیادی بر جوامع و بوم سامانه‌ها دارد. شناسایی حوادث فرین آب و هوایی در مقیاس مکانی و زمانی، به منظور برنامه ریزی جهت کاهش آثار سوء و افزایش استراتژی‌های انطباق بسیار حائز اهمیت است. به همین جهت مجموعه‌ای از شاخص‌های ترکیبی و موج گرما ارائه شده توسط گروه بین‌المللی (ECA&D)^۱، به منظور ترسیم بهتر روند فرین‌های آب و هوایی در گستره ایران و با تمرکز بر حوضه‌های آبریز درجه یک استفاده گردید. بر این اساس داده‌های روزانه ۴۷ ایستگاه سینوپتیک کشور در دوره آماری ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۵ استخراج و مورد آنالیز قرار گرفت. در این پژوهش شاخص‌های سرد-خشک، سرد-مرطوب، گرم-خشک، گرم-مرطوب، دو کلاس شاخص اقلیم گردشگری و شاخص جهانی حرارتی به عنوان مجموع شاخص‌های ترکیبی و شاخص‌های فراوانی، مدت زمان، فرکانس، دامنه و بزرگی موج گرما به عنوان مجموع شاخص‌های موج گرما محاسبه شده است. نتایج این پژوهش نشان دهنده رخداد تغییر اساسی در رفتار مقادیر فرین ترکیبی دما و بارش در سه دهه گذشته است. کاهش در فراوانی حالت‌های سرد و افزایش در فراوانی حالت‌های گرم در بیش از ۸۰ درصد ایستگاه‌ها دیده می‌شود. به طوری که کاهش معنادار در شاخص روزهای سرد و خشک و افزایش معنادار در شاخص روزهای گرم و خشک مویید این مطلب می‌باشد. همچنین، شاخص جهانی حرارتی نیز نشان دهنده افزایش معنی دار فراوانی روزهای با تنش گرمای شدید ($32-38^{\circ}\text{C}$) و کاهش معنادار فراوانی روزهای بدون تنش گرمایی ($9-26^{\circ}\text{C}$) است که در مقایسه با سایر شاخص‌های ترکیبی دما و بارش از پیوستگی فضایی مناسبی در سطح ایران برخوردار است. روند شاخص اقلیم گردشگری (TCI)، شامل دو زیر مجموعه، تعداد روزهای با $\text{TCI} \geq 60$ و تعداد روزهای با $\text{TCI} \geq 80$ نیز تغییرات مشابهی دارد و پیوستگی ضعیف‌تری را در سطح کشور نشان می‌دهد. افزایش حالت‌های گرم در شاخص‌های موج گرما نیز تقریباً در تمامی حوضه‌های آبریز درجه یک کشور مشهود می‌باشد. این موضوع در تعداد و فرکانس موج گرما نمود معنادار تری در سطح کشور نشان می‌دهد. بیشینه وردایی معنادار فرین‌های ترکیبی در بخش‌های شمال غربی کشور دیده می‌شود که می‌تواند در برنامه ریزی برای کاهش آثار سوء و افزایش سازگاری در کشور مورد توجه قرار گیرد.

کلمات کلیدی: وردایی و تغییر اقلیم، شاخص‌های ترکیبی، شاخص‌های موج گرما، حوضه‌های آبریز درجه یک

1-European Climate Assessment & Dataset

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: ahmadroushani@gmail.com

مقدمه

تغییر اقلیم به عنوان یک چالش جهانی است که اثرات آن در مقیاس محلی و بر اساس ویژگی‌های مکانی هر منطقه متفاوت است (لئونارد و همکاران، ۲۰۱۴؛ فیلهو و همکاران، ۲۰۱۶)^۱. در چند دهه گذشته، در بسیاری از نقاط جهان افزایش میانگین دما به یک روند عادی تبدیل شده است. نرخ افزایش دما در سطح خشکی‌ها نسبت به سطح اقیانوس‌ها در هر دو نیمکره بسیار سریعتر بوده است (IPCC, 2007)^۲. بیشینه گرمایش سطح زمین از سال ۱۸۵۰ میلادی تاکنون در سه دهه گذشته دیده شده است. در ۱۴۰۰ سال گذشته، دوره ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۲ گرم‌ترین دوره ۳۰ ساله در نیمکره شمالی بوده است. روند خطی میانگین داده‌های سطح زمین و اقیانوس نشان دهنده افزایش دمای بین ۸۵/ تا ۲ درجه سلسیوس در طول دوره زمانی ۲۰۱۲-۱۸۸۰ است (IPCC, 2013). نحوه برنامه‌ریزی و عملکرد زیرساخت‌های جوامع بشری در ارتباط با غذا، آب، انرژی، مسکن و حمل و نقل به مقادیر فرین متغیرهای هواشناسی بستگی دارد (WMO2009)^۳. اثرات اقتصادی تغییرات و وردایی فرین‌های آب و هوایی و حوادث اقلیمی شدید، به عنوان یکی از جدی‌ترین چالش‌های بشر در مواجهه با تغییرات آب و هوایی است (CCSP, 2008)^۴. گرمایش جهانی باعث افزایش بزرگی و شدت رخدادهای شدید آب و هوایی در مناطق مختلف زمین همانند خشکسالی، امواج گرما، سیلابهای گرمسیری، سیل و آتش‌سوزی شده است (الکساندر و همکاران، ۲۰۰۵؛ لئونارد و همکاران، ۲۰۱۴؛ آقا کوچکی و همکاران، ۲۰۱۴).

در این بین امواج گرما یکی از پدیده‌های محیطی و بخش جدایی ناپذیر تغییرات اقلیمی می‌باشد که دارای ویژگی‌ها و اثرات متفاوتی در رژیم‌های مختلف آب و هوایی است. در مناطق حساس خشک و نیمه خشک اثرات شدیدی بر منابع آب و به تبع آن اثرات منفی

بسیاری بر روی کشاورزی و امنیت غذایی محیط‌های انسانی، زیستی و اکولوژیکی می‌گذارد. هر چه شدت و گستره امواج گرما بیشتر باشد تأثیرات آن عمیق‌تر بوده و موجب ایجاد بحران در منطقه می‌شود (IPCC, 2007). پیش‌بینی پدیده‌های فرین آب و هوا براساس شاخص‌های دما و بارش در گزارش پنجم IPCC، نشان دهنده افزایش تعداد و شدت دوره‌های خشک و گرم است (فیلهو و همکاران، ۲۰۱۶؛ هائو و همکاران، ۲۰۱۳)^۵. وابستگی بین بارش و دما، عمدتاً به دلیل روابط ترمودینامیکی بین این دو متغیر، در مطالعات گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است (هائو و همکاران، ۲۰۱۳). شاخص‌های وردایی و فرین‌های آب و هوایی اغلب برای ارزیابی وضعیت آب و هوایی یک منطقه بر اساس آستانه‌های مشخص فیزیکی برای یک دوره بلند مدت استفاده می‌شوند (زانگ و همکاران، ۲۰۱۱)^۶. هدف اصلی از تجزیه و تحلیل فرین‌ها اغلب توصیف وضعیت ترازمندی و تغییرات سامانه آب و هوا، برای یافتن توازن مطلوب در برنامه‌های کلان برای اتخاذ استانداردهای ایمنی بالا و جلوگیری از خسارت عمده به جوامع و بوم سامانه‌ها در اثر حوادث شدید است (WMO, 1983). تأثیر این حوادث می‌تواند ناشی از یک متغیر تنها در یک حالت فرین باشد، اما در بیشتر مواقع رخداد پدیده نتیجه عملکرد ترکیبی از متغیرها است که همه آنها ضرورتاً فرین نیستند (لئونارد و همکاران، ۲۰۱۴). ترکیبی از متغیرهایی که منجر به رخداد یک اثر شدید در سامانه آب و هوا می‌شوند، به یک رویداد ترکیبی اشاره دارد (بینستون، ۲۰۱۱)^۷. شاخص‌های ترکیبی در مطالعات اخیر براساس مقادیر مشترک دما و بارش در شرایط آب و هوایی "سرد/خشک"، "سرد/مرطوب"، "گرم/خشک" و "گرم/مرطوب" تعریف شده‌اند (بینستون و همکاران، ۲۰۰۹؛ لوپز و همکاران، ۲۰۱۱؛ استرالا و منزیل، ۲۰۱۲؛ هائو و همکاران، ۲۰۱۳؛ آرسنویک و همکاران، ۲۰۱۳)^۸.

5- Hao et al

6- Zhang et al

7- Beniston

8- Lopez et al, Estrella and Menzel, Arsenovic et al.

1- Leonard et al, Filho et al

2- Intergovernmental Panel on Climate Change

3- World Meteorological Organization

4- Climate Change Science Program

با پراکنش مناسب در مناطق مختلف آب و هوایی انتخاب شد. داده‌های دما و بارش روزانه برای این ایستگاه‌ها در دوره آماری سال‌های ۱۹۸۱-۲۰۱۵ از سازمان هواشناسی ایران (IRIMO)^۹ دریافت شده است.

کنترل کیفی و همگن‌سازی داده‌ها

به دلیل اهمیت مطالعات تغییر اقلیم، سازمان هواشناسی جهانی تاکید بر کنترل کیفیت و همگنی داده‌ها قبل از انجام مطالعات دارد (WMO, 2009). از مهمترین عوامل ناهمگنی داده‌ها می‌توان به تغییر در شیوه‌های مشاهده شامل تغییر زمان مشاهده و تغییر در نوع ابزار هواشناسی، تغییر موقعیت ایستگاه، فرمول مورد استفاده برای محاسبه و تغییر در پردازش داده‌ها اشاره کرد (WMO, 2011؛ وانگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ وینست و همکاران، ۲۰۱۲؛ فن و چن، ۲۰۱۶).^{۱۰} در ایران اغلب مطالعات آشکارسازی روند شاخص‌های حدی در تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر براساس مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی انجام شده است. با توجه به اینکه این اندازه‌گیری‌ها معمولاً با خطا و یا محدوده‌هایی از عدم قطعیت همراه هستند (رحیم زاده و همکاران، ۲۰۰۹)، به همین دلیل سری‌های اقلیمی مورد نظر دچار ناهمگنی به صورت جهش ناگهانی و غیرطبیعی و انحرافات زیادی از واقعیتها در نتایج مربوطه و تفسیرهای غیرواقعی از آنها در مطالعات اقلیمی گردیده است. در این مطالعه، فرایند بررسی کنترل کیفی داده‌ها در برنامه ClimPACT انجام گردید. این برنامه در اولین اجرا مقادیر غیر منطقی از دما و بارش، همچون مقادیر بارش منفی روزانه، کمتر بودن حداکثر دما روزانه نسبت به حداقل دما روزانه را مشخص می‌کند. همچنین داده‌های پرت شناسایی می‌شود. شایان ذکر است که هر داده پرت بالقوه را می‌توان با استفاده از اطلاعات روز قبل و بعد از این رویداد همراه با دانش تخصصی در مورد شرایط آب و هوایی محلی ارزیابی کرد (الکساندر و همکاران، ۲۰۱۳).^{۱۱}

ترکیب حالت‌های مذکور نشان دهنده رخداد تغییری سیستماتیک در همه مکان‌های مورد مطالعه است.

کشور ایران نیز به لحاظ شرایط خاص جغرافیایی و قرار گرفتن بخش اعظم آن در ساختار شکننده کمربند بیابانی به شدت از وردایی و تغییرات آب و هوایی متأثر می‌باشد. وقوع پیایی خشکسالی‌های شدید و بلند مدت بویژه در مناطق حساس و شکننده و به تبع آن افزایش امواج گرما موجب زیان‌های شدید اقتصادی می‌شود. بر این اساس، آگاهی از رخداد وردایی و تغییرات آب و هوایی و اثرات آنها، به منظور برنامه‌ریزی جهت مدیریت ریسک در ارتباط با جوامع، بوم سامانه‌ها و زیرساخت‌ها از طریق استراتژی‌های سازگاری و کاهش آثار سوء تغییر اقلیم ضروری و اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در دهه‌های اخیر اغلب تحلیل‌های بلند مدت تغییر اقلیم بر اساس تمرکز بر وردایی داده‌های دما، بارش و تغییرات در میانگین آنها صورت گرفته است. بیشتر این مطالعات از جمله: رحیم‌زاده و همکاران، ۲۰۰۹؛ طبری و همکاران، ۲۰۱۱؛ پرک و همکاران، ۲۰۱۵، بر شاخص‌های فرین منفرد بارش و دما تاکید داشته‌اند و در زمینه سایر شاخص‌ها، از جمله شاخص‌های ترکیبی عناصر اقلیمی و شاخص‌های امواج گرما بررسی علمی صورت نگرفته است. بنابراین، هدف این پژوهش استفاده از مقادیر مشترک و شاخص‌های ترکیبی دما و بارش و سایر متغیرهای آب و هوایی، و همچنین تغییر پذیری امواج گرما از جنبه‌های بزرگی، فرکانس و ... در سطح حوضه‌های آبریز درجه یک کشور به منظور ارائه یک دید کلی نسبت به رفتار حالت‌های خاصی از گرما و رطوبت است که اثر زیادی بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز کشور داشته و دارد.

مواد و روش‌ها

محدوده فضایی این مطالعه گستره کشور ایران از عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ تا ۶۲ درجه شرقی است. به منظور بررسی وردایی و تغییر آب و هوا براساس شاخص‌های ترکیبی و شاخص‌های امواج گرما، ۴۷ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک (جدول ۱)

9- IRAN Meteorological Organization

10- Wang et al, Vincent et al, Fan and Chen.

11- Alexander et al

جدول ۱. مشخصات ایستگاه های سینوپتیک مورد مطالعه در حوضه های آبریز کشور

نام حوضه آبریز	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	نام حوضه آبریز	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع
فلات مرکزی	آباده	52.40	31.11	2030	خلیج فارس - دریای عمان	آبادان	48.21	30.37	3
	اراک	49.78	34.07	1072		اهواز	48.74	31.34	22.5
	بیم	58.35	29.1	1066		بندرعباس	56.37	27.21	9.8
	بیرجند	59.28	32.89	14.91		بندر لنگه	54.50	26.32	22.7
	همدان	48.32	34.52	1741		بوشهر	50.81	28.96	9
	فرودگاه					چابهار	60.37	25.17	8
	همدان نوژه	48.69	35.19	1679		فسا	53.41	28.58	12.88
	ایران شهر	60.42	27.12	591		کرمانشاه	47.15	34.35	1318
	اصفهان	51.7	32.51	1550		شهرکرد	50.83	32.29	2048
	شرق اصفهان	51.52	32.40	1543		خرم آباد	48.28	33.43	1147
	کاشان	51.27	33.59	982		جزیره کیش	53.59	26.30	30
	کرمان	56.96	30.25	1754		سنندج	47.01	35.25	1373
	قزوین	50.05	36.25	12.79	دریای مازندران	رشت	49.62	37.32	-8.6
دریاچه ارومیه	سبزوار	57.65	36.2	972		اردبیل	48.17	38.15	1332
	سمنان	53.25	35.35	1127		بابلسر	52.65	36.72	-21
	شاهرود	54.92	36.38	1325		بندر انزلی	49.45	37.47	-23.6
	مهرآباد	51.30	35.69	1191		بجنورد	57.16	37.28	1112
	تربت حیدریه	59.21	35.26	1451		گرگان	54.41	36.90	0
	یزد	54.28	31.90	1230		زنجان	48.52	36.66	1659
	شیراز	52.60	29.56	1488		خوی	44.99	38.55	1103
	ارومیه	45.05	37.65	1328		نوشهر	51.30	36.369	-20.9
	تبریز	46.24	38.12	1361		رامسر	50.68	36.90	-20
	سقز	46.31	36.22	1522	قره قوم	مشهد	59.63	36.23	999
	مرزی شرق	61.54	31.08	489					
	زاهدان	60.90	29.47	1370					
	زابل	61.54	31.08	489					

شاخص‌ها

هدف نمایه‌های تغییر اقلیم به تصویر کشیدن پراکنش زمانی و مکانی تغییر اقلیم می باشد. شاخص‌های ترکیبی و شاخص‌های موج گرما مجموعه‌ای از شاخص‌های آماری هستند که می‌توانند طیف وسیعی از ویژگی‌های آب و هوا را پوشش دهند و وردایی و تغییرات در شرایط آب و هوا را تشخیص دهند. به عبارت دیگر بیشتر رویدادهای فرین آب و هوایی، نتایج ترکیب متغیرهای اقلیمی هستند. به عنوان مثال، دمای بالا همراه با کاهش بارندگی باعث وقوع امواج گرما و خشکسالی می‌شود. به همین جهت در مطالعه حاضر ۷ شاخص ترکیبی و ۵ شاخص موج گرما مورد ارزیابی قرار گرفته است که تعاریف هریک در جدول ۲ ذکر شده است.

چهار ترکیب آب و هوایی، سرد-خشک (دمای

کنترل کیفی سایر متغیرهای آب و هوایی مانند رطوبت، ساعات آفتابی و سرعت باد بوسیله روش‌های آماری در برنامه *spss* انجام شد. در صورت عدم وجود ایستگاه مرجع برای تشخیص ناهمگونی در سریهای زمانی اقلیمی از آزمون *f* استفاده می شود (*WMO, 2011*)، وانگ، ۲۰۰۸ و وانگ و فنگ، ۲۰۱۳). بنابراین در این پژوهش با استفاده از روش حداکثر مجاز *f* (*PMF*)^{۱۲}، همگنی ماهانه داده‌های دما، بارش و سایر متغیرهای هواشناسی با استفاده از نرم افزار *RH-test* نسخه ۵، بررسی شده است. سپس بر اساس نمودارهای ترسیمی، در صورت عدم وجود جهش در روند سری زمانی، آن سری همگن و در صورت وجود تغییرات مربوط به عوامل ناهمگنی، سری زمانی ناهمگن فرض شده است (وانگ و فنگ، ۲۰۱۳).

12- penalized maximal F

جدول ۲. لیست شاخص‌های حدی ترکیبی و موج گرما انتخاب شده در این مطالعه (ECA&D)

نام شاخص	تعریف	واحد
شاخص‌های ترکیبی	تعداد روزهای با دمای میانگین کمتر از صدک 25 ام میانگین دمای روزانه و بارش کمتر از صدک 25 ام مجموع بارش روزانه	روز
	تعداد روزهای با دمای میانگین کمتر از صدک 25 ام میانگین دمای روزانه و بارش بزرگتر از صدک 75 ام مجموع بارش روزانه	روز
	تعداد روزهای با دمای میانگین بزرگتر از صدک 25 ام میانگین دمای روزانه و بارش کمتر از صدک 25 ام مجموع بارش روزانه	روز
	تعداد روزهای با دمای میانگین بزرگتر از صدک 75 ام میانگین دمای روزانه و بارش بزرگتر از صدک 75 ام مجموع بارش روزانه	روز
	توضیحات مربوطه در بخش روش شناسی اشاره شده است	روز
	تعداد روزهایی که شاخص اقلیم گردشگری بزرگتر یا مساوی 60 باشد	روز
	تعداد روزهایی که شاخص اقلیم گردشگری بزرگتر یا مساوی 80 باشد	روز
شاخص‌های موج گرما	فراوانی موج گرما	تعداد
	مدت زمان موج گرما	مدت زمان طولانی‌ترین موج گرمایی در تابستان که این شرایط حداقل برای سه روز متوالی ادامه داشته باشد (مطابق با تعریف ارائه شده در متن).
	فرکانس موج گرما	کل تعداد روزهای در تابستان که در همه امواج گرمایی مشارکت دارد که این شرایط حداقل برای سه روز متوالی ادامه داشته باشد (مطابق با تعریف ارائه شده در متن).
	دامنه موج گرما	گرمترین روز از گرمترین موج تابستان که در آن شرایط حداقل برای سه روز متوالی ادامه داشته باشد (مطابق با تعریف ارائه شده در متن).
	بزرگی موج گرما	میانگین بزرگی از همه روزهای موج گرما در تابستان که در آن شرایط حداقل برای سه روز متوالی ادامه داشته باشد (مطابق با تعریف ارائه شده در متن).

شاخص اقلیم گردشگری (TCI) نشان دهنده ارزیابی کمی از آب و هوای جهان برای اهداف گردشگری و شاخص کاملی از رفاه اقلیمی گردشگران است. این شاخص در ابتدا در سال ۱۹۸۵ توسط میکزکوفسکی^{۱۵}، به عنوان یک شاخص اقلیم گردشگری که از چندین عامل آب و هوایی استفاده می‌کند معرفی شد (معادله ۱).

$$TCI = 2(4CID + CIA + 2R + 2S + W) \quad (1)$$

CID شاخص آسایش روزانه شامل متغیرهای میانگین حداکثر دمای هوا و میانگین حداقل رطوبت نسبی است. CIA شاخص آسایش شبانه روزی است که شامل متغیرهای میانگین دمای هوا و میانگین رطوبت نسبی می‌باشد. همچنین، R بارندگی (میلی متر)، S زمان تابش آفتاب روزانه (h) و W میانگین سرعت باد (m/s) است. با استفاده از یک سیستم رتبه‌دهی استاندارد ارزش TCI بین مقدار ۱۰۰ (ایده آل) تا ۱۰ (غیر ممکن) متفاوت است. کلاس‌های رده بندی شاخص $UTCI$ و $UTCI$ در جدول ۳ نشان داده شده است.

پنج شاخص تعداد، مدت زمان، فرکانس، بزرگی و

پایین/ بارش کم)، سرد-مرطوب (دمای پایین/ بارش زیاد)، گرم-خشک (دمای بالا/ بارش کم) و گرم-مرطوب (دمای بالا/ بارش زیاد) به عنوان ترکیب مقادیر دما - بارش لحاظ می‌شود (ECA&D, ۲۰۱۳). بر اساس گزارش $IPCC$ (۲۰۰۷) مقادیر ۱۰ و ۹۰ درصد به عنوان حوادث فرین معرفی شده است لیکن به منظور قرارگیری طیف وسیع‌تری از رویدادهای حدی مقادیر، در اینجا مقادیر ۲۵ و ۷۵ درصد از داده‌های دما و بارش به عنوان آستانه‌های شاخص‌های ترکیبی دما و بارش در نظر گرفته شده است. شاخص جهانی حرارتی ($UTCI$)^{۱۴} شاخص ترکیبی دیگری است که به بیان تفاوت‌های جزئی در شدت محرک‌های هواشناسی می‌پردازد. برای اندازه‌گیری اثرات ترموفیزیولوژیکی محیط جوی در بیومتریولوژی انسان، شاخص $UTCI$ توسط $COST 730$ توسعه داده شده است. هدف اصلی این شاخص ارائه یک مدل ارزیابی فیزیولوژیکی محیط زیستی می‌باشد تا برنامه‌های مربوط به سلامت و رفاه را در زمینه خدمات آب و هوای عمومی، سیستم بهداشت عمومی، طرح‌های پیشگیرانه و تحقیق اثرات آب و هوایی افزایش دهد (برود و همکاران، ۲۰۱۲)^{۱۴}.

13- Universal Thermal Climate Index

14- Broede et al

15- Mieczkowski

جدول ۳. طبقه بندی شاخص UTCI و شاخص TCI

TCI	UTCI(°C)
90-100 ایده آل	> 46 تنش حداکثر گرما
80-89 عالی	38-46 تنش گرمای خیلی شدید
70-79 خیلی خوب	32-38 تنش گرمای شدید
60-69 خوب	26-32 تنش گرمای متوسط
50-59 قابل قبول	9-26 بدون تنش حرارتی
40-49 حاشیه‌ای	0-9 تنش کمی سرد
30-39 نامطلوب	-13-0 تنش سرد متوسط
20-29 بسیار نامطلوب	-13-27 تنش سرمای شدید
10-19 بشدت نامطلوب	-27-40 تنش سرمای خیلی شدید
<10 غیر ممکن	< -40 تنش حداکثر سرما

است چرا که این آزمون بر پایه رتبه داده‌ها در سری‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند استوار می‌باشد. آزمون ناپارامتریک من‌کندال ابتدا توسط من (۱۹۴۵) و سپس توسط کندال (۱۹۷۵) بسط و توسعه یافت. آزمون غیر-پارامتری من‌کندال برای تعیین اینکه آیا روند در سطح $\alpha = 0.05$ معنی دار بود یا خیر ($\alpha < 0.05$) مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش روند تغییرات در سطح اطمینان ۹۵ درصد و روند تغییرات شاخص‌های ترکیبی حدی بر حسب روز در دهه محاسبه شده است. روند شاخص ترکیبی (y_j) با استفاده از معادله رگرسیون خطی کمترین مربعات مدل (معادله ۲) به دست آمده است:

$$y_j = a + 0.1b_j + e_j \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

در این جا y_j مقدار شاخص در سال j است و e_j به عنوان باقی مانده با میانگین صفر است. ضریب رگرسیون b تغییرات در هر دهه را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

شاخص‌های مشترک دما و بارش

روند سالانه شاخص ترکیبی روزهای سرد و خشک (CD) براساس داده های دما و میزان بارش برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در گستره ایران و پراکنش آن‌ها

دامنه موج گرما برای بررسی جنبه های مختلف موج گرما مورد ارزیابی قرار می گیرد. این شاخص ها بر اساس حداقل سه روز متوالی در دوره زمانی ماه می تا سپتامبر در نیمکره شمالی و ماه نوامبر تا مارس در نیمکره جنوبی در نظر گرفته می شوند (جدول ۲). شاخص های مذکور بایستی حداقل برای سه روز متوالی طبق تعریف زیر تداوم داشته باشند:

$$TX90 > TXib90p^{16}$$

$$EHF^{17} > 0$$

$$EHI_{accl}^{18} \times EHI_{sig}^{19} EHF = \max [1, \text{Where}]$$

$$EHI_{accl} = (Tmi + Tmi-1 + Tmi-2)/3 - \text{And}$$

$$(Tmi-3 + \dots + Tmi-32)/30$$

$$\text{And } EHI_{sig} = (Tmi + Tmi-1 + Tmi-2)/3 - Tmij$$

آزمون من‌کندال و روش رگرسیون خطی

اگر چه آزمون های پارامتریک مثل آزمون t برای مقایسه نمونه ها قوی تر است، اما برای بررسی وجود روند در سری‌های زمانی از آزمون من‌کندال با فرض نفی "عدم وجود روند در سری زمانی" استفاده شده

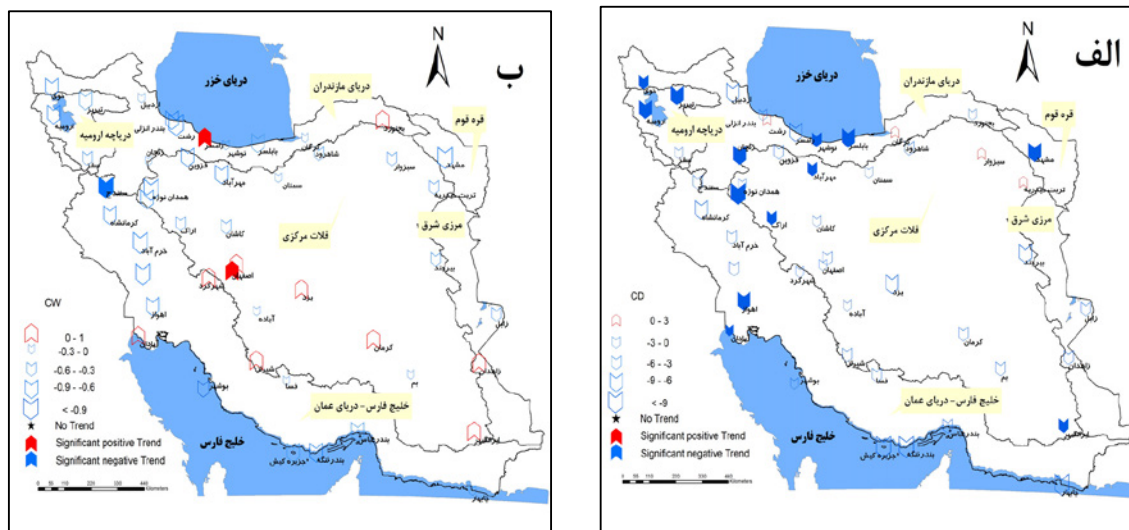
16- The calendar day 90th percentile of daily maximum temperature calculated for a five-day window centred on each calendar day in the base period b (e.g. 1971-2000).

17- Excess heat factor

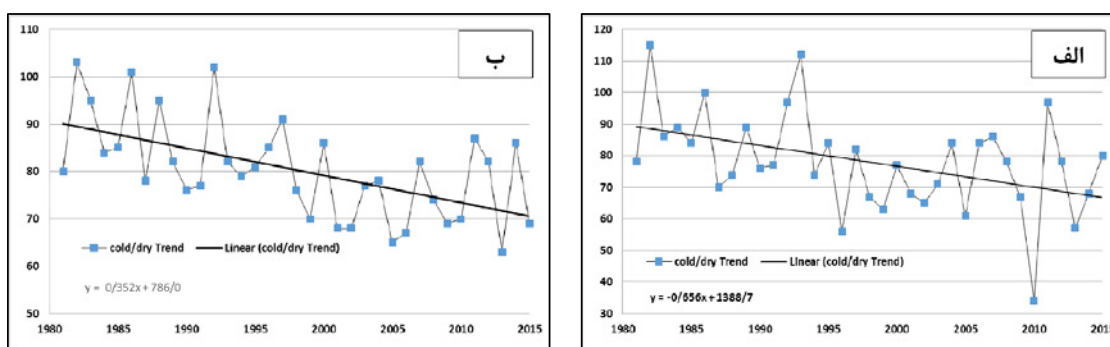
18- Acclimatization factor

19- significance factor

20- Mann-Kendall



شکل ۱. روند شاخص روزهای سرد و خشک (الف) و شاخص روزهای سرد و مرطوب (ب) در دوره آماری ۱۹۸۱-۲۰۱۵ (روز در دهه)



شکل ۲: سری زمانی شاخص CD برای ایستگاه‌های تبریز (الف) و آبادان (ب) برای دوره ۱۹۸۱-۲۰۱۵ (روز / سال).

هر دهه و کمینه منفی معنادار این شاخص در ایستگاه آبادان در حوضه آبریز خلیج فارس - دریای عمان حدود ۳/۵- روز در هر دهه رخ داده است (شکل ۲). در شاخص روزهای سرد و خشک روندهای مثبت بصورت پراکنده در ایستگاه‌های: ایستگاه‌های شهرکرد، سبزوار، گرگان، رشت و تربت حیدریه دیده می‌شود. دامنه تغییرات روند افزایشی در این شاخص، سالانه بین ۳ روز در هر دهه در ایستگاه شهرکرد تا ۰٫۳ روز در هر دهه در ایستگاه سبزوار متفاوت است. سری زمانی این شاخص در برخی مناطق مانند خرم آباد و بجنورد از روند بسیار ضعیف و غیر قابل تشخیص برخوردار است.

در حوضه‌های آبریز درجه یک در شکل ۱ الف نشان داده شده است.

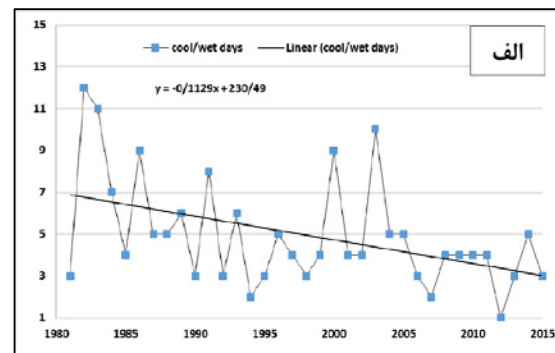
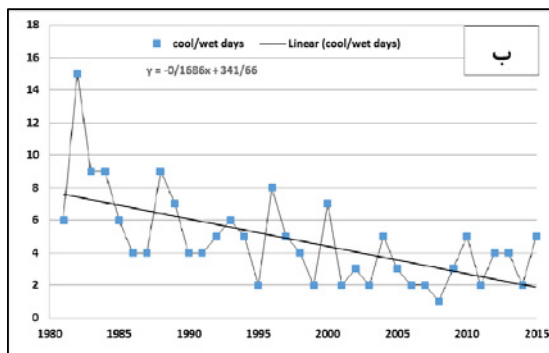
شاخص مذکور در بیشتر ایستگاه‌ها از روند کاهشی برخوردار است. نرخ تغییرات این شاخص در دوره مطالعاتی براساس موقعیت مکانی ایستگاه بین ۱۰-۱ روز در هر دهه تا ۱ تا ۳ روز در هر دهه با کاهش روبه‌رو بوده است. در پانزده ایستگاه که بیشتر در شمال غرب کشور قرار دارند روند منفی معنیدار در سطح اطمینان ۹۵ درصد مشاهده می‌شود و سایر ایستگاه‌ها روند معناداری ندارند. بیشینه کاهشی معنادار این شاخص در ایستگاه تبریز در حوضه آبریز دریاچه ارومیه حدود ۶/۵- روز در

ضعیف می‌باشند، سایر نقاط کشور از روند منفی برای شاخص CW برخوردار هستند. به عبارتی تعداد روزهای سرد/مرطوب در هشت ایستگاه از مجموع ۴۷ ایستگاه انتخاب شده (۱۷ درصد کل ایستگاه‌ها) افزایش یافته است، و روند کاهشی نیز در سایر ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود. روند معنادار (سطح اطمینان ۹۵ درصد) تنها در دو ایستگاه رامسر و سنندج دیده می‌شود.

بیشینه روند منفی این شاخص در نیمه شمالی کشور و حوضه آبریز دریای مازندران و بطور پراکنده در بخش‌های جنوبی و به ویژه جنوب شرقی کشور دیده می‌شود. بیشینه روند منفی در ایستگاه سنندج در حدود

همچنین، در ایستگاه‌های قرار گرفته در نواحی ساحلی دریای خزر و خلیج فارس روندهای روزانه بالاتری دیده می‌شود. از جمله نکته حائز اهمیت این است که نتایج بدست آمده برای این شاخص با نتایج مطالعات در اروپا منطبق می‌باشد (بینستون، ۲۰۰۹).

شاخص روزهای سرد و مرطوب (CW)، به عنوان تعداد روزهای با T_{25} / p_{75} تعریف می‌شود. نتایج آزمون‌های آماری در سری CW سالانه در دوره‌های سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۵ در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است. بجز ناحیه جنوبی کوه‌های زاگرس (جنوب غرب کشور) و برخی مناطق کوچک پراکنده که دارای روند مثبت



شکل ۳. سری زمانی شاخص CW در ایستگاه‌های همدان (الف) و سنندج (ب) برای دوره ۲۰۱۵-۱۹۸۱ (روز / سال).



شکل ۴. روند شاخص روزهای گرم و خشک (الف) و شاخص روزهای گرم و مرطوب (ب) در دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۸۱ {روز در دهه}

افزایشی در شاخص WD می باشد (شکل ۴ الف). شایان ذکر است که این ایستگاه در سایر مطالعات از جمله: پرک و همکاران (۲۰۱۵) و علیجانی و همکاران (۱۳۹۱) رفتار مشابهی داشته است که یافتن دلیل آن نیاز به تحقیق و بررسی های بیشتر و دقیق تر دارد.

اهمیت فرین‌های روزهای گرم و خشک در این است که به دلیل ارتباط فراوانی این روزها با وقوع موج‌های گرما و خشکسالی که می‌توانند آسیب‌های شدید محیط زیست و اجتماعی را ایجاد کنند نگران کننده است (هائو و همکاران، ۲۰۱۳) که اثرات آن می‌تواند به دلیل گرمایش جهانی، شهرنشینی و یا افزایش آتروسل تشدید شوند. به طور کلی، این روندهای مثبت در همراهی با یافته‌های $IPCC$ (۲۰۱۳) (گرمای دوره‌ای از سال های ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۲ بسیار بالاتر از هر دوره ۳۰ ساله در ۱۴۰۰ سال گذشته در نیمکره شمالی است)، در بیشتر ایستگاه‌ها بدست آمده است.

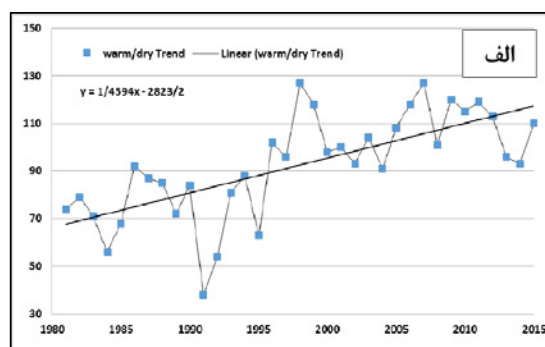
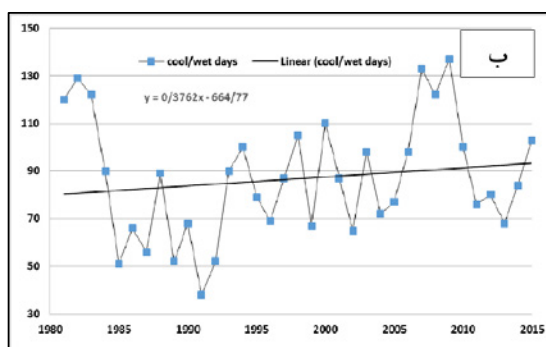
روند شاخص روزهای گرم و مرطوب (WW) در شکل ۴ ب نشان داده شده است. نتایج رگرسیون خطی نشان می‌دهد که در طی دوره ۳۵ ساله از ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۵ حدود ۴۲ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه در شاخص مذکور دارای روند مثبتی هستند. اما بیشتر روندها معنادار نبوده و به طور کلی دارای تغییرپذیری ضعیف می‌باشند. روند بیشینه این شاخص در ایستگاه نوشهر در کرانه دریای کاسپین با مقدار $+0.56$ در هر دهه دیده می‌شود. این شاخص در نواحی ساحلی خلیج فارس و جنوب غرب از

۱/۶۸- روز در هر دهه و در ایستگاه همدان (فرودگاه) با مقدار حدود ۱/۱۲- روز در هر دهه است (شکل ۳). روند مثبت در سایر ایستگاه‌ها بسیار ضعیف است و هیچ روند قابل تشخیصی وجود ندارد. به عبارت دیگر، روندها از نظر مکانی بسیار پراکنده هستند.

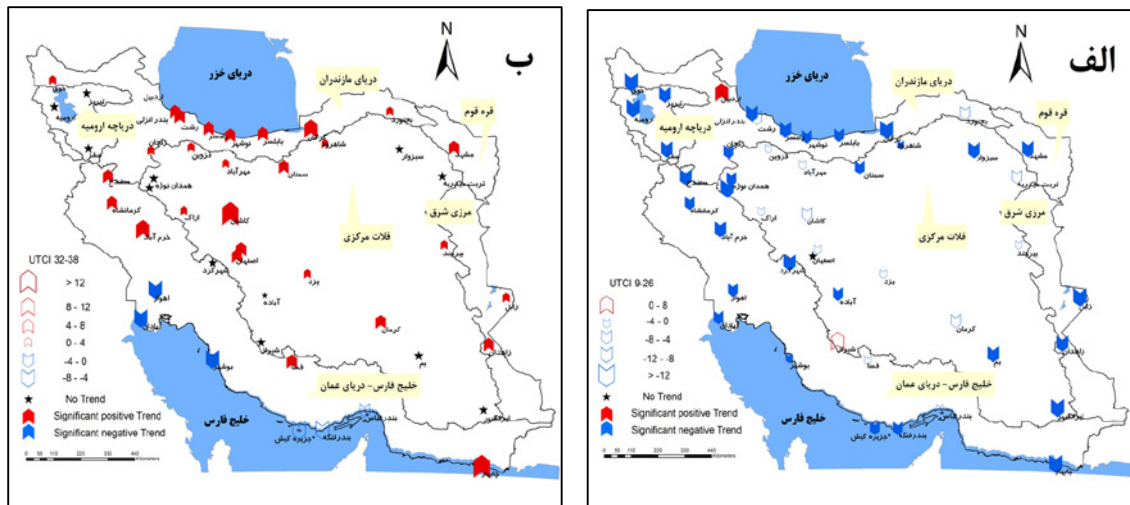
در مجموع، بیشتر گستره حوضه های آبریز درجه یک کشور (ایستگاه‌ها واقع در آنها) دو شاخص CD و CW روندهای منفی را تجربه کرده‌اند. نتایج این شاخص‌ها با مطالعه انجام شده توسط هائو و همکاران (۲۰۱۳) در مورد منطقه خاورمیانه مطابقت دارد.

بر اساس نتایج بدست آمده، روند شاخص روزهای گرم/ خشک (WD) افزایش قابل توجهی در سراسر کشور دارد. نتایج نشان می‌دهد که در بیش از ۸۰ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه در این شاخص روندهای افزایشی معنادار را تجربه کرده اند (شکل ۴، الف). روندهای افزایشی بیشتر در مناطق کوهستانی، خشک و نیمه خشک آب و هوایی دیده می‌شود. نرخ تغییر روند سالانه شاخص روزهای گرم و خشک بین $3/7+$ روز در هر دهه در ایستگاه چابهار تا $14/5+$ روز در هر دهه در ایستگاه جزیره کیش متفاوت می‌باشد (شکل ۵). این روندهای افزایشی با نتایج به دست آمده برای بسیاری از نقاط جهان، از جمله آفریقای مرکزی، شرق استرالیا و بخش‌های روسیه مطابقت دارد (هائو و همکاران، ۲۰۱۳).

بجز ایستگاه شهرکرد، واقع در جنوب غرب کشور، بقیه ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطح کشور دارای روند



شکل ۵. سری زمانی شاخص WD در ایستگاه‌های جزیره کیش (الف) و چابهار (ب) برای دوره ۱۹۸۱-۲۰۱۵ (روز / سال)



شکل ۶. روند شاخص جهانی گرم در کلاس بدون استرس حرارتی (الف) و شاخص جهانی روزهای گرم در کلاس ۳۸-۳۲ درجه سانتی گراد (ب) در دوره آماری ۱۹۸۱-۲۰۱۵ (روز در دهه)

گرمایش جهانی باشد که به نظر می‌رسد مناطق مرطوب را مرطوب تر و مناطق خشک را خشک تر می‌سازد (رومم، ۲۰۱۵)^{۲۱}، اما اثرات آن در هر بخش از کشور به اشکال مختلف ظاهر می‌شود. مقایسه نتایج بدست آمده برای دو شاخص روزهای گرم و خشک و گرم و مرطوب نشان دهنده رفتار مشابهی بین این دو شاخص است، اما بزرگی و میزان انسجام فضایی شاخص روزهای گرم و مرطوب نسبت به شاخص روزهای گرم و خشک بسیار کمتر است.

شاخص جهانی حرارتی (UTCI)

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بیشتر مساحت کشور، در فراوانی روزهای با تنش سرد کاهش و در فراوانی روزهای با تنش گرم افزایش را تجربه کرده است و بنابراین شرایط آسایش حرارتی دارای روندهای متفاوتی می‌باشد (شکل ۶ الف و ب).

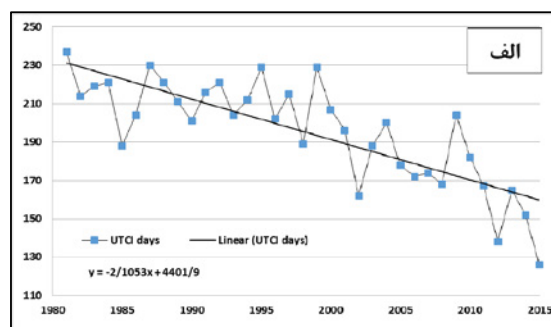
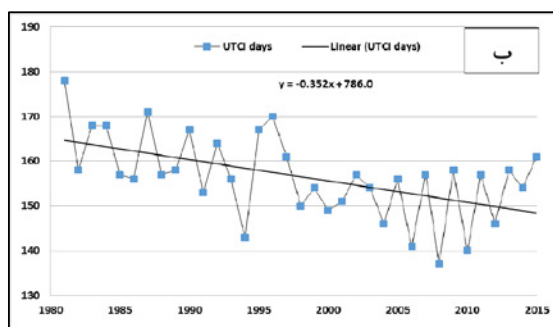
روزهای بدون تنش حرارتی در ۴۵ ایستگاه (۹۵ درصد ایستگاه‌ها)، دارای روند کاهشی است که در بیشتر ایستگاه‌ها معنی‌دار است (شکل ۶، الف). نرخ کاهش این شاخص در کل کشور از حدود ۴- روز در هر دهه در

روند خاصی برخوردار نیست. به عبارت دیگر در بیشتر قسمت‌های حوزه‌های آبریز فلات مرکزی و دریای عمان-خلیج فارس هیچ روند قابل توجهی در این شاخص مشاهده نمی‌شود. به طور کلی اگر کشور را به وسیله یک خط فرضی شمال شرقی-جنوب غربی به دو قسمت تقسیم شده تصور کنیم، ما روند مثبت این شاخص را در شمال خط مشاهده می‌کنیم (شکل ۴، ب). در مجموع، شدت شاخص روزهای گرم و مرطوب به ویژه در عرض جغرافیایی بالا افزایش یافته است، که با روند مشاهده شده در سایر نقاط نیمکره شمالی در مقیاس جهانی انطباق دارد (بینستون، ۲۰۰۹؛ هائو و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، نتایج ما نشان می‌دهد که در بیشتر سال‌های دوره آماری مورد مطالعه، ایستگاه‌هایی همچون رامسر، نوشهر، رشت، واقع در منطقه دریای خزر، فراوانی روزهای گرم/مرطوب را تجربه کرده اند این در حالی است که در سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه این شاخص در چندین سال متوالی هیچ فراوانی را نشان نمی‌دهد. بر همین اساس در ایستگاه‌های واقع در نواحی جنوبی کشور، تعداد روزهای گرم/مرطوب در بیشتر سال‌های مورد بررسی بسیار اندک و حتی برابر صفر بوده است. دلایل احتمالی رخداد این الگوها ممکن است ناشی از

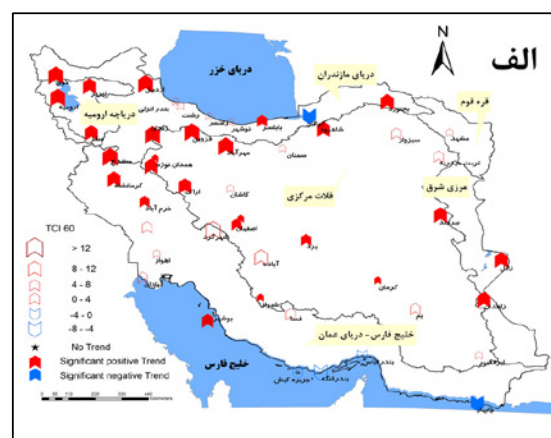
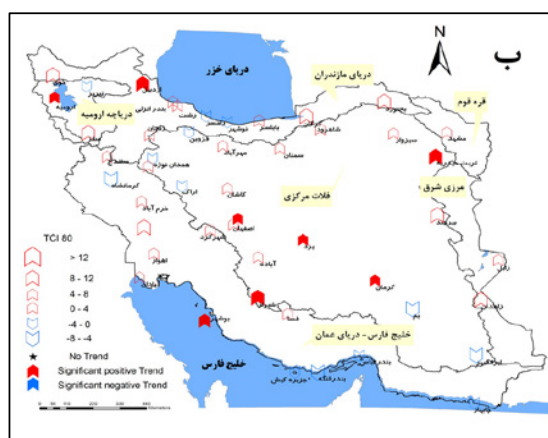
در کمتر از یک پنجم کشور، از جمله مناطق جنوب و جنوب‌غربی، روند منفی و یا روند نزولی در این طبقه (تنش شدید گرما) تجربه شده است، این در حالی است که بیشتر این ایستگاه‌ها از جمله اهواز، آبادان، بوشهر، فسا، جزیره کیش، بندر لنگه و بندرعباس روند افزایشی در تنش گرمایی را در طبقه بالاتر یعنی در طبقه تنش بسیار شدید گرما (۳۸-۴۶ درجه سلسیوس) نشان می‌دهند.

در مجموع، در مقایسه با شاخص‌های مشترک دما و بارش، شاخص UTCI نشان دهنده افزایش فراوانی حالت‌های گرم است. در این شاخص‌ها افزایش تنش های گرم و کاهش در تنش‌های سرد قابل مشاهده است. گرمایش جهانی با افزایش دمای متوسط زمین در طول زمان باعث شده تا امواج گرما شدیدتر از میانگین

ایستگاه اهواز تا حدود ۲۰- روز در هر دهه در ایستگاه گرگان متفاوت می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در دهه‌های گذشته روند کاهشی در طبقه بدون تنش حرارتی در نواحی شمال، شمال‌غرب و جنوب شرقی ایران نسبت به سایر مناطق قوی‌تر بوده است. در ایستگاه‌های قرار گرفته در رشته کوه زاگرس روند منفی به دست آمده چندان قوی نمی‌باشد. بر اساس نتایج تنها روند مثبت در این شاخص در محدوده طبقه بدون تنش حرارتی در ایستگاه‌های اردبیل و شیراز مشاهده می‌شود (شکل ۷). بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۶ (ب)، شاخص سالانه تنش شدید گرما (۳۲-۳۸ درجه سلسیوس) تقریباً در تمام حوضه های آبریز کشور افزایش یافته است. نرخ روند افزایشی این شاخص بین ۰٫۵+ در ایستگاه زنجان تا ۱۷/۳+ روز در هر دهه در ایستگاه چابهار متغیر می‌باشد.



شکل ۷. سری زمانی شاخص بدون استرس حرارتی (۹-۲۶ درجه سانتی گراد) در ایستگاه‌های گرگان (الف) و اهواز (ب) برای دوره ۱۹۸۱-۲۰۱۵ (روز / سال)



شکل ۸. روند شاخص‌های اقلیم گردشگری (الف) (TCI ≥ 60) و (ب) (TCI ≥ 80) در دوره آماری ۱۹۸۱-۲۰۱۵ {روز در دهه}

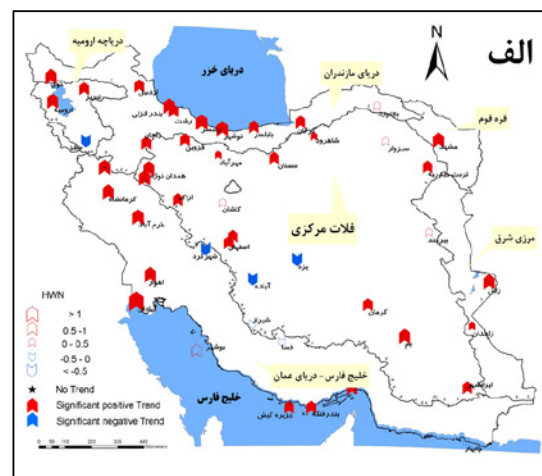
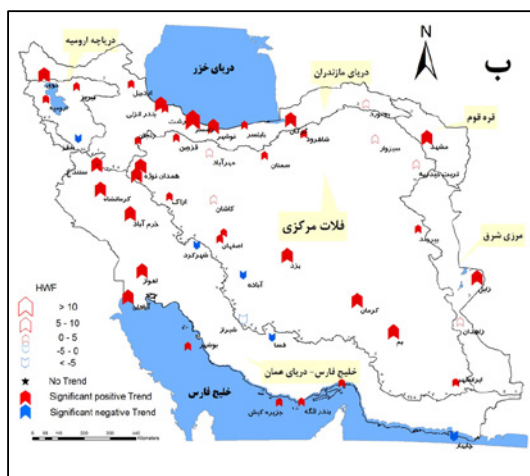
افزایش یابند و بازه زمانی آنها طولانی‌تر شده و مناطق با مقیاس بزرگ را پوشش دهند. در نتیجه این رویداد، در سال‌های اخیر، افزایش شدت خشکسالی و افزایش فراوانی موج‌های گرمایی در بسیاری از نقاط جهان مشاهده شده است (رومم، ۲۰۱۵). نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که عرض جغرافیایی و توپوگرافی نقش مهمی در توزیع شاخص UTCI بازی می‌کنند. شاخص UTCI سالانه با کاهش عرض‌های جغرافیایی در سراسر ایران، افزایش تنش گرمایی را نشان می‌دهد.

شاخص اقلیم گردشگری (TCI)

روند دو شاخص تعداد روزهای با $TCI \geq 60$ و تعداد روزهای با $TCI \geq 80$ در شکل ۸ الف و ب به ترتیب نشان داده شده است. بیشتر روندهای سالانه در این دو شاخص در سطح ۶ حوضه آبریز درجه یک کشور روند افزایشی را نشان می‌دهند. مقدار روند مثبت در سری TCI60 بین $+1/6$ روز در هر دهه در ایستگاه رشت تا $+16$ روز در هر دهه در ایستگاه اردبیل متفاوت می‌باشد. به طور کلی بزرگترین مقادیر این شاخص را می‌توان در استان‌های واقع در شمال غرب کشور، مشاهده کرد. همچنین، بیشینه روند منفی معنی‌دار در ایستگاه چابهار (جنوب شرقی کشور) با مقدار -8 روز در هر دهه و سپس در گرگان دیده شده است.

مقایسه شاخص‌های TCI80 و TCI60 بیانگر این مطلب است که شاخص TCI80 دارای توزیع نامنظم‌تر روندهای مثبت و منفی در کشور می‌باشد. بیش از ۷۵ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه در کشور، افزایش سالانه شاخص TCI80 را نشان می‌دهند که ۱۷ درصد از آنها دارای روند افزایش معنادار می‌باشند (شکل ۸، ب). بزرگترین روند مثبت قابل توجه در شاخص TCI80 در ایستگاه اردبیل، نشان دهنده افزایش ۱۰ روز در هر دهه است. حدود بیست درصد از ایستگاه‌ها، عمدتاً در شمال غرب و جنوب شرقی کشور، دارای روند منفی هستند. بزرگترین روند منفی در ایستگاه ایرانشهر با کاهش $2/2$ روز در هر دهه رخ داده است. به طور کلی، سازوکارهای مختلف فیزیکی از جمله تغییرات در پوشش ابر و یا تغییرات بارش و تغییرات در توازن انرژی می‌تواند در این روندها تاثیرگذار باشند (زاهو و کلیل، ۱۹۹۲) که تعیین اثرات هر یک از این عوامل نیازمند بررسی‌ها و مطالعات علمی بیشتری است.

در مجموع با توجه به مباحث مطرح شده در این بخش می‌توان بیان داشت، در زمینه موضوع تغییر اقلیم و فرین‌های آب و هوایی پژوهشهای بسیاری در شاخه‌های مختلف، به ویژه در اقلیم‌شناسی انجام شده است. نگاهی به مطالعات گذشته در این زمینه، مشخص می‌سازد که شاخص‌های ترکیبی به لحاظ اینکه پارامترهای اقلیمی را به صورت مشترک مورد ارزیابی قرار می‌دهد بیش از سایر



شکل ۹. روند شاخص‌های تعداد موج گرما (HWN) (الف) و فرکانس موج گرما (HWF) (ب) در دوره آماری ۱۹۸۱-۲۰۱۵ (روز در دهه)

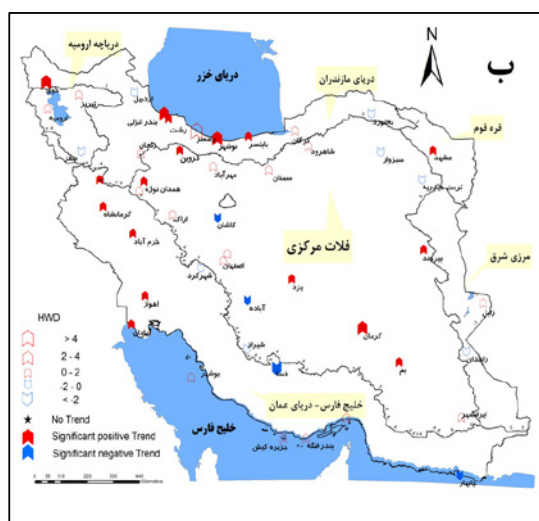
می‌شود، به عبارتی بیش از ۸۲ درصد ایستگاه‌ها روند افزایش معنادار در این شاخص را در طی دوره ۳۵ ساله انتخاب شده تجربه کرده‌اند. بیشترین افزایش معنادار در ایستگاه آبادان در حوضه آبریز خلیج فارس - دریای عمان و در جنوب غربی ترین قسمت کشور ایران به میزان ۱.۵ بار در هر دهه مشاهده می‌شود. روند منفی این شاخص بیشتر در محدود جنوب غرب حوضه آبریز فلات مرکزی در ایستگاه‌های یزد، آباده، شیراز و شهرکرد مشاهده می‌گردد. بیشترین مقدار روند منفی معنادار در ایستگاه آباده به میزان ۰.۷ بار در هر دهه می‌باشد.

شاخص فرکانس موج گرما نیز در ۸۶ درصد از ایستگاه‌های سطح کشور دارای روند افزایشی معنادار در سطح اطمینان ۹۵ درصد می‌باشد (شکل ۹ ب). بیشترین فرکانس موج گرما مربوط به ایستگاه رامسر در حوضه آبریز دریای مازندران با بیش از ۱۰ روز در هر دهه و کمترین آن مربوط به ایستگاه بوشهر با کمتر از ۱ روز در هر دهه در حوضه آبریز خلیج فارس - دریای عمان می‌باشد. در این شاخص نیز بیشتر روند‌های منفی مربوط به جنوب غرب حوضه آبریز فلات مرکزی می‌باشند. ایستگاه‌های: شهرکرد، آباده، فسا، شیراز، سقز و چابهار ایستگاه‌هایی هستند که روند کاهشی را در این شاخص در طول دوره

شاخص‌های تغییر اقلیم دارای اهمیت می‌باشند. چرا که نتایج این شاخص‌ها امکان تحلیل و ارزیابی رخدادهای حدی تحت عنوان پیامد حاصل از تغییر اقلیم در کشور را فراهم می‌سازد و بر همین اساس میتوان عوامل متأثر و پارامترهای مختلف اقلیمی شرکت کننده در رخدادهای حدی، متناسب با نواحی مختلف کشور را شناخت و به وسیله آنها تصویر جامعی از روندهای گذشته و درصد احتمال وقوع آن در آینده ارائه نمود. زیرا تحت تأثیر پیامدهای تغییر اقلیم، فراوانی و شدت رخدادهای حدی در نواحی مختلف کشور می‌توانند روندهای متفاوتی را تجربه کنند، به طوری که برخی نواحی روند افزایشی و برخی دیگر روند کاهشی داشته باشند.

شاخص‌های موج گرما (Heat wave)

نتایج دو شاخص تعداد موج گرما (HWN) و فرکانس موج گرما (HWF) در حوضه‌های آبریز درجه یک در سطح کشور به ترتیب در شکل ۹ الف و ب نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود فراوانی این شاخص در سطح حوضه‌های آبریز دارای افزایش معنادار در سطح اطمینان ۹۵ درصد می‌باشد. در ۳۹ ایستگاه سینوپتیک از مجموع ۴۷ ایستگاه روند معنادار این شاخص مشاهده



شکل ۱۰. روند شاخص‌های دامنه موج گرما (HWA) (الف) و مدت زمان موج گرما (HWD) (ب) در دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۸۱ (روز در دهه)

۳۵ ساله مورد مطالعه تجربه کرده اند.

روند شاخص دامنه موج گرما (HWA) در ۳۰ ایستگاه به صورت افزایشی و در مابقی ایستگاه ها روند کاهشی مشاهده می شود (شکل ۱۰ الف). بر اساس نتایج بدست آمده از مجموع ایستگاه های انتخابی صرفا روند معناداری در ایستگاه مشهد مشاهده می شود و در سایر ایستگاه ها هیچگونه روند معناداری مشاهده نمی شود. میزان تغییرات این شاخص از ۳+ تا ۲- درجه سانتی گراد در هر دهه متغیر می باشد. بیشترین مقدار مربوط به ایستگاه مشهد با ۳+ درجه سانتی گراد و کمترین مقدار مربوط به ایستگاه فسا با ۲- درجه سانتی گراد می باشد. بیشتر روندهای کاهشی در این شاخص در قسمت های منطبق بر رشته کوه های زاگراس و در غرب حوضه آبریز فلات مرکزی و همچنین ایستگاه های واقع در شمالی ترین قسمت حوضه آبریز دریای مازندران مشاهده می شود.

روند شاخص مدت زمان موج گرما (HWD) در ۷۴ درصد ایستگاه ها دارای روند افزایشی می باشد که از این روند در ۱۵ ایستگاه یعنی در ۳۱ درصد ایستگاه ها روند افزایشی معنادار می باشد (شکل ۱۰ ب). ایستگاه بندر انزلی در این شاخص بیشترین مقدار روند افزایشی به میزان بیش از ۲٫۵ روز در دهه را در دوره زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۵ تجربه کرده است. در این شاخص نیز روندهای

کاهشی در محدوده مرز بین حوضه آبریز فلات مرکزی و دریای عمان- خلیج فارس و قسمت شمال شرقی حوضه آبریز فلات مرکزی مشاهده می شوند.

نتایج بدست آمده برای شاخص بزرگی موج گرما (HWM) در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان طوری که مشاهده می گردد این شاخص دارای روندهای افزایشی و کاهشی در سطح کشور با تغییر پذیری ۰٫۵+ روز در هر دهه تا حدود ۱- درجه سانتی گراد در هر دهه می باشد که این شاخص در بیش از ۵۰ درصد ایستگاه ها روند کاهشی تجربه کرده است که از این بین در دو ایستگاه نوشهر و رامسر این روند کاهشی دارای روند معنادار در سطح اطمینان ۹۵ درصد می باشند. با نگاهی به نتایج بدست آمده که در شکل ۱۱ ترسیم شده است، مشاهده می گردد که بیشتر حوضه آبریز دریای مازندران در این شاخص روند کاهشی را تجربه کرده است و برعکس حوضه های آبریز قره قوم و مرزی شرق روندهای افزایشی را تجربه کرده اند.

در مجموع می توان انطباق نسبتا خوبی را بین شاخص های امواج گرما با شاخص های ترکیبی در ایستگاه های مختلف انتخاب شده در سطح حوضه های آبریز درجه یک کشور مشاهده کرد. بررسی شاخص های مذکور در مجموع موید افزایش حالت های گرم در سطح کشور می باشد که این افزایش را می توان در مناطق دیگری از دنیا مشاهده کرد. به طور کلی می توان این افزایش در حالت های گرم و آستانه های امواج گرما را در ارتباط با گرمایش جهانی دانست. از جمله نکات قابل ذکر این که در حد فاصل بین حوضه آبریز فلات مرکزی و خلیج فارس- دریای عمان و منطبق بر رشته کوه های زاگراس در چندین ایستگاه از جمله شهرکرد، فسا و ... روند های نسبتا متفاوت تری نسبت به سایر قسمت های کشور مشاهده می گردد که نیازمند بررسی دقیقتر این ایستگاه ها می باشد.

جمع بندی

برای داشتن یک تحلیل واقع بینانه از شرایط اقلیمی کشور و به ویژه زمانی که این تحلیل یک بررسی تطبیقی



شکل ۱۱. روند شاخص بزرگی موج گرما (HWM) در دوره آماری ۱۹۸۱-۲۰۱۵

به غیر از چند ایستگاه مانند: شهرکرد، بیشتر ایستگاه‌ها در شاخص‌های ترکیبی دما و بارش روندهای مشابهی را نشان می‌دهند. شاخص روزهای گرم و مرطوب (WW) در بیش از نیمی از کشور هیچ روندی را نشان نمی‌دهد. در بقیه ایستگاه‌ها این شاخص دارای روند مثبت افزایشی با نرخ تغییرات بسیار کم می‌باشد که بیشتر روندها معنادار نیستند.

همچنین، شاخص جهانی حرارتی نشان دهنده افزایش معنی‌دار فراوانی سالانه روزهای با تنش گرمای شدید ($32-38^{\circ}\text{C}$) و کاهش معنادار فراوانی سالانه روزهای بدون تنش گرمایی ($9-26^{\circ}\text{C}$) است که در مقایسه با سایر شاخص‌های ترکیبی دما و بارش از پیوستگی فضایی مناسبی در سطح ایران برخوردار است. روند شاخص اقلیم گردشگری (TCI)، شامل دو زیر مجموعه، تعداد روزهای با $\text{TCI} \geq 60$ و تعداد روزهای با $\text{TCI} \geq 80$ نیز تغییرات مشابهی دارد و پیوستگی ضعیف‌تری را در سطح کشور نشان می‌دهد. بیشینه وردایی معنادار فرین‌های ترکیبی در بخش‌های شمال‌غربی کشور دیده می‌شود. نتایج بدست آمده در شاخص‌های ترکیبی در این مقاله با نتایج حاصل از سایر مطالعات در مناطق دیگر دنیا همچون اروپا و خاورمیانه مطابقت نشان می‌دهد.

امواج گرما نیز در دوره مطالعاتی این پژوهش روند های افزایشی معنادار در همه حالت های خود در سطح حوضه های آبریز درجه یک کشور نشان می دهند. به طوری که در دو شاخص فراوانی و فرکانس یک روند منسجم معنادار افزایشی در بیش از ۸۰ درصد کشور مشاهده می گردد. در شاخص مدت زمان موج گرم نیز یک روند افزایشی در بیشتر مساحت حوضه های آبریز کشور مشاهده می گردد لیکن از مجموع ۴۷ ایستگاه انتخابی در کمتر از ۵۰ درصد ایستگاه ها روند معنادار قابل ردیابی می باشد.

در دو شاخص دیگر، دامنه و بزرگی موج گرما روندهای افزایشی و کاهشی به صورت پراکنده در سطح حوضه های آبریز درجه یک کشور مشاهده می شود که در شاخص دامنه موج گرما این روندها از انسجام فضایی

و مقایسه ای بین محدوده های زمانی و مکانی باشد، استفاده از شاخص های حدی منتخب با ویژگی های مکانی منطقه مورد مطالعه ضروری می باشد. امروزه به طور فزاینده‌ای محققان و متخصصان در حال توسعه شاخص‌های مختلف آب و هوایی به منظور ارزیابی چند بعدی تغییر اقلیم می‌باشند. به همین خاطر در این مقاله تلاش شده است تا با استفاده از مجموعه شاخص‌های ترکیبی و امواج گرما با تمرکز بر رخدادهای فرین شناخت خوبی از وضعیت روند فرین‌های آب و هوایی به دست آید. این شاخص‌ها برای داده‌های روزانه بارش و دما در ۴۷ ایستگاه سینوپتیک کشور در دوره ۲۰۱۵-۱۹۸۱ محاسبه و تحلیل شده‌اند.

نتایج حاصل از آزمون‌های آماری نشان دهنده وجود روند تغییرات سالانه و منسجمی در شاخص‌های ترکیبی دما و بارش (با استفاده از مقادیر ۲۵ و ۷۵ درصد) است. به طور کلی روند فرین‌های ترکیبی نشان می‌دهد که در بیش از ۸۰ درصد از ایستگاه‌ها فراوانی حالت‌های گرم مرتبط با امواج گرمایی افزایش و فراوانی حالت‌های سرد کاهش یافته است لیکن میزان انسجام فضایی این شاخص‌ها بر اساس موقعیت مکانی هر ایستگاه متفاوت می‌باشد. بر همین اساس، شاخص ترکیبی روزهای سرد و خشک (CD) در بیش از ۹۰ درصد سطح کشور روند کاهشی قابل توجه با نرخ تغییرات یک تا بیش از ده روز در هر دهه را نشان می‌دهد که در حدود ۳۵ درصد از ایستگاه‌ها این روند معنی‌دار (سطح اطمینان ۹۵ درصد) می‌باشد. در شاخص روزهای سرد و مرطوب (CW) نیز روند کلی در سطح کشور یک روند کاهشی را نشان می‌دهد. البته این روند در اکثریت ایستگاه‌ها روند معناداری نمی‌باشد. شاخص ترکیبی روزهای گرم و خشک سالانه (WD)، در بیش از ۹۷ درصد ایستگاه‌ها از روند مثبت افزایشی برخوردار است که در بیش از ۸۰ درصد ایستگاه‌ها روند معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد مشاهده می‌شود. مقدار روند شاخص ترکیبی WD سالانه از $3/7+$ روز در هر دهه در ایستگاه چابهار تا $14/5+$ روز در هر دهه در ایستگاه جزیره کیش متغیر می‌باشد.

(ET CRSCI).

- AghaKouchak A, Cheng L, Mazdiyasni O, Farahmand A. 2014. Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California drought. *Geophys. Res. Lett* 41: 8847–8852, doi:10.1002/2014GL062308.
- Arsenovic P, Tosic I, Unkasevic M. 2013. SEASONAL ANALYSIS OF WARM DAYS IN BELGRADE AND NIS. *J. Geogr. Inst. Cvijic*. 63(4): (1 10). DOI: 10.2298/IJGI1304001A.
- Beniston M. 2011. Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901 and projected for 2100. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 36, L07707, doi:10.1029/2008GL037119, 2009
- Broede P, Fiala D, Blazejczyk K, Holmer I, Jendritzky G, Kampmann B, Tinz B, Havenith G. 2012. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol*. 56(3): 481–494. doi:10.1007/s00484-011-0454-1
- CCSP. 2008. Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. Regions of Focus: North America, Hawaii, Caribbean, and U.S. Pacific Islands. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. [Thomas R. Karl, Gerald A. Meehl, Christopher D. Miller, Susan J. Hassol, Anne M. Waple and William L. Murray (eds.)]. Department of Commerce, NOAA's National Climatic Data Center, Washington, D.C., USA, 164 pp.
- Estrella N, Menzel A. 2012. Recent and future climate extremes arising from changes to the bivariate distribution of temperature and precipitation in Bavaria, Germany. *Int. J. Climatol*. 33 1687–95.
- Fan L, Chen D. 2016. Trends in extreme precipitation indices across China detected using quantile regression. *Atmos. Sci. Lett*. 17: 400–406.
- Filho W.L, Musa H, Cavan G, O'Hare P, Seixas J. 2016. *Climate Change Adaptation, Resilience and Hazards*. Springer. DOI 10.1007/978-3-319-39880-8.
- Hao Z, AghaKouchak A, Phillips T. J. 2013. Changes in concurrent monthly precipitation and temperature extremes. *Environ Res Lett*. doi:10.1088/17489326/8/3/034014.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 966 pp.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M.M.B., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.),

بهتری برخوردار می باشند. اما در مجموع این دو شاخص روندهای معنادار را در بیشتر ایستگاه ها از خود نشان نمی دهند. میزان تغییرات در شاخص دامنه موج گرما عددی بین ۲- تا ۳+ درجه سانتی گراد و در شاخص بزرگی موج گرما ۱- تا کمی بیش از ۵+ درجه سانتی گراد متغیر می باشد.

در مجموع از نتایج این مطالعه این چنین می توان استنباط کرد که، رویدادهای حدی در ایران پیچیدگی- های خاص رفتاری را از خود نشان میدهند و در مناطق مختلف کشور متفاوتند. محاسبه و تحلیل سری شاخص- های تغییر اقلیم در مناطق مختلف کشور متناسب با ماهیت اقلیمی آنها متفاوت است. در تحلیل تغییرات الگوهای مکانی شاخص های حدی باید به نوع شاخص های انتخابی برای یک منطقه توجه زیادی نمود. همچنین بررسی نتایج روند های فرین های ترکیبی و امواج گرما می تواند در برنامه ریزی های ملی و منطقه ای برای کاهش آثار سوء زیست محیطی و مشکلات اجتماعی ناشی از آن و افزایش سازگاری در کشور مورد توجه قرار گیرد.

منابع و مآخذ

References (in Persian):

- Alijani, B, Roshani, A, Parak, F and Heidari, R (2013). Trends in extreme daily temperature using climate change indices in Iran. *Geography and (2)*, 17-28. doi: 10.22067/environmental_hazards, 1 / geo.v1i2.18617

References (in English):

- Allen G.R, Pereira S.P, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration-Guideline for computing crop water requirements. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Natuins.
- Alexander LV, Zhang X, Peterson TC, Caesar J, Gleason B, Klein Tank AMG, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahim F, Tagipour A, Kumar Kolli R, Revadekar JV, Griffiths G, Vincent L, Stephenson DB, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M, Vazquez Aguirre JL. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 111: D05109. DOI: 10.1029/2005JD006290.
- Alexander L, Yang H, Perkins S, 2013. ClimPACT Indices and software. A document prepared on behalf of The Commission for Climatology (CCI) Expert Team on Climate Risk and Sector-Specific Climate Indices

- Volume 4.
- Project team ECA&D, Royal Netherlands Meteorological Institute KNMI. 2013. EUMETNET/ECSN optional programme: 'European Climate Assessment & Dataset (ECA&D)' Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version : 10.7.
- Rahimzadeh F, Asgari A, Fattahi E. 2009. Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades. *Int. J. Climatol.* 29:329-343.
- Romm. 2015. CLIMATE CHANGE (WHAT EVERYONE NEEDS TO KNOW). Oxford University Press, ISBN-13 978-0190250171.
- Tabari H, ShiftehSomee B, RezaeianZadeh M. 2011. Testing for long-term trends in climatic variables in Iran. *Atmosph. Res.* 100:132 -140.
- Vincent L.A, Wang X.L, Milewska E.J, Wan H, Feng Y, Swail V. 2012: A Second Generation of Homogenized Canadian Monthly Surface Air Temperature for Climate Trend Analysis. *JGR Atmospheres.* 117: D18110, do: 10.1029/2012JD017859.
- Wang X.L, Wen Q, Wu Y. 2007. Penalized Maximal t Test for Detecting Undocumented Mean Change in Climate Data Series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology.* DOI: 10.1175/JAM2504.1.
- Wang X. L. L. 2008: Accounting for autocorrelation in detecting mean-shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test. *J. App. Met. Climatol.* 47: 2423-2444.
- Wang X.L, Y. Feng, published online July 2013: RHtestsV4 User Manual. Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, science and Technology Branch, Environment Canada. 28 pp. [Available online at <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>].
- World Meteorological Organization. 2009. Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72.
- World Meteorological Organization, Geneva. 2011. Guide to Climatological Practices. WMO-No. 100.
- Yue S, Pilon P. and Cavadias G. 2002. Power of teh Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology.* 259: 254-271.
- Zhang X, Alexander L, Hegerl G.C, Jones P, Tank A.K, Peterson T.C, Trewin B, Zwiers F.W. 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Clim Change.*doi: 10.1002/wcc.147.
- Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 966 pp.
- Kanji G.K. 2006. 100 STATISTICAL TESTS. SAGE Publications Ltd, ISBN-13 978 1 4129 2376 7 (Pbk).
- Lemke B, Kjellstrom T. 2012. Calculating Workplace WBGT from Meteorological Data: A Tool for Climate Change Assessment. *IndustrialHealth.*50: 267-278.
- Leonard M, Westra S, Phatak A, Lambert M, Hurk, B.V.D, McInnes K, Risbey J, Schuster S, Jakob D, Stafford-Smith M. 2014. A compound event framework for understanding extreme impacts. *WIREs Clim Change.* 5:113-128. doi: 10.1002/wcc.252.
- Leonard M, Westra S, Phatak A, Lambert M, Hurk V.D B, McInnes K, Risbey J, Schuster S, Jakob D, Stafford-Smith M. 2014. A compound event framework for understanding extreme impacts. *WIREs Clim Change.*5:113-128. doi: 10.1002/wcc.252.
- Liu C, Allan R P, Huffman G J. 2012. Co-variation of temperature and precipitation in CMIP5 models and satellite observations. *Geophysics. Res. Lett.*39 : L13803.
- Lopez-Moreno g J.I, Vicente-Serrano S.M, Moran-Tejeda E, Lorenzo-Lacruz J, KenawyA, Beniston M. 2011. Effects of the North Atlantic Oscillation (NAO) on combined temperature and precipitation winter modes in the Mediterranean mountains: Observed relationshi-ps and projections for the 21st century. *Global and Planetary Change.* 77. 62-76.
- Miao C, Sun Q, Duan Q, Wang Y.2016. Joint analysis of changes in temperature and precipitation on the Loess Plateau during the period 1961-2011. *Climate Dynamics.*47: 3221. doi:10.1007/s00382-016-3022-x
- Mieczkowski Z. 1985. The Tourism Climatic Index: a method of evaluating world climate fortourism. *Can Geogr*29:220-233.
- Parak F, Roshani A, BodaghJamali J. 2015. Trends and Anomalies in Daily Climate Extremes over Iran during 1961-2010. *Journal of Environmental and Agricultural Sciences.* ISSN: 2313-8629.
- Pappenberger P, Jendritzky G, Staiger H, Dutra E, Giuseppe F. Di, Richardson D. S, Cloke H. L. 2015. Global forecasting of thermal health hazards: the skill of probabilistic predictions of the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol.*59:311-323.
- Parry, M.L. Climate Change 2007-Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the Ipcc; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2007;

The variability of climate compound extreme indices and thermal waves in the watershed area of the country

Hossein Esmaeili¹, Ahmad Roshani^{2*}, Fatemeh Parak²

¹M.Sc graduated, Department of Geography, University of Kharazmi, Tehran, Iran

²Ph.D., Department of Geography, University of Kharazmi, Tehran, Iran

*Corresponding Author Email: ahmadroushani@gmail.com

Received: 12 April 2018, accepted: 10 July 2018

ABSTRACT

Climate change and global warming have great impacts on communities and ecosystems. The identification of weather events in spatial and temporal scales is very important for mitigation and adaptation strategies. Therefore, a set of combined heat wave indices provided by the European Climate Assessment & Dataset were used. The data of 47 synoptic stations in the period from 1981 to 2015 were analyzed over Iran. In this research indexes such as cold-dry, cold-wet, warm-dry, warm-wet as combined indicators in climate tourism and the global thermal index are investigated. Moreover, heat wave indices such as duration, frequency, amplitude and magnitude of the heat wave are calculated. The results show that there has been a fundamental change in compound extreme indices over the past three decades. The decrease in the cold and the increase in the warm events is seen in more than 80 % of stations. There was a significant decrease in the index of cold and dry days and a significant increase in warm and dry days. The global thermal index also indicates a significant increase in the frequency of days with severe heat stress (32-38°C) and a significant reduction in the frequency of days without thermal stress (9-26°C) which has a considerable spatial continuity over the country. The trends of the number of days with $TCI \geq 60$, and the number of days with $TCI \geq 80$, have similar variations and show a weaker association across the country. The increase of warm conditions in the heat wave indices is almost observed in Iran watersheds. This issue in the number and frequency of the heat wave is more prevalent in the country. The maximum significance of the combined indices can be seen in the Northwest parts of the country that can have an important role in planning for mitigation and adaptation.

Keywords: Variability and Climate Change, compound indices, heat wave index, catchment basins

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Esmaeili, H.; Roshani, A.; Parak, F., (2018). The variability of climate compound extreme indices and thermal waves in the watershed area of the country. *J. Meteorol. Atmos. Sci.*, 1(2): 97-113.

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

