

اثرات محتمل تغییر اقلیم بر دماهای حدی بیشینه ایران تحت سناریوهای RCP طی قرن بیست و یکم

مجید چراغعلی زاده^۱، رسول همتی^۲، سجاد عسگری^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب-هواشناسی کشاورزی، دانشگاه تهران

۲- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، مدیر کل هواشناسی استان زنجان

۳- کارشناس هواشناسی اداره کل هواشناسی استان زنجان

(تاریخ دریافت: ۹۸/۰۷/۲۴، تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۸/۲۱)

چکیده

پژوهش حاضر به منظور ارزیابی اثرات محتمل تغییر اقلیم بر روند تغییرات دماهای حدی بیشینه در سه مقیاس نقطه‌ای (ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی)، ناحیه‌ای (۱۰ منطقه جغرافیایی از ایران) و میانگین منطقه‌ای در سه دوره اقلیمی آتی نزدیک، میانی و دور تا پایان قرن بیست و یکم نسبت به دوره اقلیمی پایه (۱۹۸۶-۲۰۰۵) است. در این تحقیق از خروجی‌های ریزمقیاس شده مدل جهانی CNRM-CM5 از مجموعه مدل‌های CMIP5 تحت سناریوهای RCP استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داد، میانگین سالانه دمای بیشینه ایران در اقلیم‌های آتی نزدیک، میانی و دور تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰.۷ و ۱.۲؛ ۱.۷ و ۱.۹؛ ۳.۹ و ۱.۹ درجه سلسیوس نسبت به دوره اقلیمی پایه احتمالاً افزایش خواهند داشت. در بین مناطق مختلف جغرافیایی ایران، بیشترین شدت افزایش دمای بیشینه در اقلیم آتی نسبت به دوره اقلیمی پایه مربوط به مناطق زاگرس و کمترین آن مربوط به مناطق سواحل خزر است.

واژه‌های کلیدی: ایران، تغییر اقلیم، دمای بیشینه، سناریوهای RCP

مقدمه

طبق رویکرد جدید در گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC AR5)^۲ که تحت چهار سناریو RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 ارائه شده است، میانگین دمای مناطق مختلف کره زمین تحت هر چهار سناریو بسته به منطقه جغرافیایی با شدت‌های متفاوت افزایش خواهد یافت [3]. در این میان انتظار می‌رود دمای بیشینه به عنوان یک کمیت حدی نیز دستخوش تغییرات اساسی گردد. تغییرات اندک در مقادیر حدی دما، می‌تواند منجر به وقوع بسیاری از پدیده‌های حدی نظیر توفان، بارش‌های سنگین و خشکسالی گردد [4]. از جمله مطالعاتی که در گستره جهان مقادیر حدی دما را با سناریوهای RCP مورد بررسی قرار داده‌اند می‌توان به لارس و گستاو [5]، ژانگ و همکاران [6] و بنت و والشاند [7] را ذکر کرد که به صورت جامع و یا در بخشی از مطالعات خود مقادیر حدی دما از جمله دمای بیشینه را در اقلیم آتی در مناطق مطالعاتی خود تحلیل کرده‌اند که نتایج این مطالعات حاکی از افزایش معنی‌دار دمای بیشینه ولی با شدت‌های مختلف در مناطق مطالعاتی است. در ایران نیز تحت سناریوهای گزارش سوم و چهارم IPCC مطالعاتی در

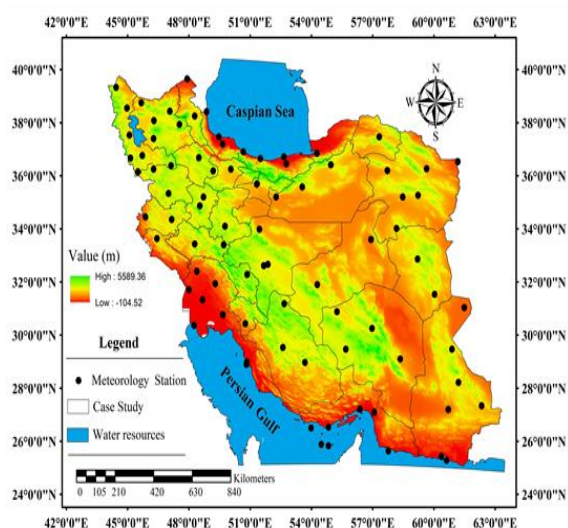
امروزه پدیده گرمایش زمین یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های است که بشر در قرن بیست و یکم با آن مواجه است. در این میان افزایش مقادیر دماهای حدی بیشینه می‌تواند به طور محسوس باعث افزایش تنش‌های گرمایی (THI)^۱ گردد، این افزایش می‌تواند به طور مستقیم بر سلامتی انسان‌ها و همین‌طور تأثیرات سویی به بخش‌های مختلف تولیدی به خصوص بخش کشاورزی و تولیدات دامی و لبنیات کشور داشته باشد، به طوری که نتایج مطالعات داخلی و خارجی زیادی نشان می‌دهد که با افزایش تنش گرمایی عملکرد تولید در دام‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [1] و [2]. بنابراین دمای بیشینه مؤلفه مهمی در تولید محصول و امنیت غذایی محسوب می‌شود. از این منظر پیش‌نگری اثرات محتمل تغییر اقلیم بر دماهای حدی بیشینه امروزه امری ضروری و لازمه حیات بشری است، که این مهم توسط سناریوهای اقلیمی بخصوص سناریوهای جدید مسیر غلظت‌های شاخص (RCP) امکان‌پذیر است.

² Fifth Assessment Report IPCC (AR5,2014)¹ Temperature-Humidity Index (THI)

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق منطقه مورد مطالعه گستره کل ایران است. در این پژوهش داده‌های مشاهداتی دمای بیشینه روزانه ۲۹۰ ایستگاه هواشناسی همدیدی در سطح کشور، معرف اقلیم‌های گوناگون کشور، گردآوری و کنترل کیفی شد که در نهایت ۸۵ ایستگاه در گستره ایران به عنوان ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی شاخص انتخاب شد. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی و پراکندگی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. معیار اصلی انتخاب ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی شاخص، داشتن حداقل بیست سال همپوشانی با دوره اقلیمی پایه مورد مطالعه (۲۰۰۵-۱۹۸۶) و داشتن حداقل خلاءهای آماری پیوسته بود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در گستره ایران

مدل‌های اقلیمی CMIP5

مجموعه مدل‌های اقلیمی (CMIP5)^۱ با ابعاد سلولی تقریبی ۲.۵ درجه طول جغرافیایی و ۲ درجه عرض جغرافیایی به منزله مدل‌های اقلیم جهانی هستند. نظر به اینکه خروجی‌های این مدل‌ها از تفکیک مکانی کمی برخوردار است، به همین دلیل خروجی‌های این مدل‌ها، توسط مرکز هیدرولوژی و هواشناسی سوئد (SMHI)^۲ با عنوان پروژه (CORDEX)^۱،

زمینه تغییرات روند دمای هوا انجام شده است که از جمله آن می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد.

عباسی و همکاران [8] با استفاده از دو الگوی گردش عمومی جو (HadCM2 و ECHAMA) تحت ۱۸ سناریو وضعیت اقلیم ایران را در دهه‌های ۲۰۰۰، ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ مورد بررسی قرار دادند، نتایج تحقیقات آنها نشان داد که در هر دو الگو، دمای تمامی استان‌های کشور در دهه‌های آینده افزایش خواهد یافت، و در دهه ۲۱۰۰ بطور میانگین دمای کشور در حدود ۳ تا ۳.۶ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت.

بابائیان و همکاران [9] تغییرات اقلیم ایران را در دوره اقلیمی ۲۰۷۱-۲۱۰۰ نسبت به دوره اقلیمی پایه ۱۹۹۰-۱۹۶۱ با استفاده از مدل اقلیمی PRECIS تحت دو سناریو A2 و B2 مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد در هر دو سناریو مورد بررسی دمای کشور روند افزایشی خواهد داشت.

پژوهش حاضر به منظور ارزیابی اثرات محتمل تغییر اقلیم بر روند تغییرات دماهای حدی بیشینه در سه مقیاس نقطه‌ای، ناحیه‌ای و منطقه‌ای (میانگین کشوری) است، که مقیاس نقطه‌ای شامل ایستگاه‌های همدیدی شاخص کشور بوده و مقیاس منطقه‌ای شامل ۱۰ منطقه جغرافیایی کشور (مناطق خزری، زاگرس، شرقی، شمال غربی، شمال شرقی، جنوبی، جنوبی غربی، جنوب شرقی و مناطق مرکزی کشور و استان تهران) است. در این پژوهش روند تغییرات دماهای حدی بیشینه در سه دوره اقلیمی آتی نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، میانی (۲۰۴۶-۲۰۶۵) و دور (۲۱۰۰-۲۰۸۱) تا پایان قرن بیست و یکم نسبت به دوره اقلیمی پایه (۱۹۸۶-۲۰۰۵) توسط آزمون ناپارامتری من کندیال مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این تحقیق به منظور شبیه سازی تغییرات دماهای حدی بیشینه از خروجی‌های ریزمقیاس شده مدل جهانی CNRM-CM5 از مجموعه مدل‌های CMIP5 تحت سناریوهای مسیر غلظت‌های شاخص (RCP) استفاده شده است.

¹ Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5 (CMIP5)

² Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)

به صورت دینامیکی با تفکیک مکانی ۰.۲۲ و ۰.۴۴ ریزمقیاس شده‌اند. این مدل‌ها بر اساس چهار سناریوی جدید RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 و RCP8.5 تدوین شده‌اند که اساس تعریف سناریوهای جدید در گزارش پنجم، واداشت تابشی زمین در انتهای قرن بیست و یکم است، به گونه‌ای که هر یک از چهار سناریوی یاد شده به ترتیب معرف ۲.۶، ۴.۵، ۶ و ۸.۵ وات بر مترمربع، واداشت تابشی زمین در سال ۲۱۰۰ است. نظر به گستره کاری این پژوهش که شامل کل ایران است، در این تحقیق از خروجی‌های ریزمقیاس شده مدل جهانی CNRM-CM5 با دقت مکانی ۰.۴۴ استفاده شد.

$$Mean_{fut} = (Mean_{base}^{GCM} - Mean_{base}^{obs}) + Mean_{fut}^{GCM} \quad (1)$$

که در آن $Mean_{fut}$ میانگین داده‌های آینده اقلیمی، $Mean_{base}^{GCM}$ میانگین خروجی مدل برای دوره اقلیمی پایه، $Mean_{base}^{obs}$ میانگین داده‌های مشاهده شده در دوره پایه و $Mean_{fut}^{GCM}$ میانگین داده‌های برآورد شده توسط مدل برای دوره اقلیمی آینده است.

$$STD_{fut} = \frac{STD_{base}^{obs}}{STD_{base}^{GCM}} * STD_{fut}^{GCM} \quad (2)$$

که در آن STD_{fut} انحراف معیار داده‌های آینده اقلیمی، STD_{base}^{obs} انحراف معیار داده‌های مشاهده شده در دوره اقلیمی پایه، STD_{base}^{GCM} انحراف معیار خروجی مدل برای دوره اقلیمی پایه و STD_{fut}^{GCM} انحراف معیار داده‌های برآورده شده توسط مدل برای دوره اقلیمی آینده است [10] و [11].

راستی آزمایی روش ریزمقیاس نمایی و ارزیابی کارایی BCMV

بعد از پس پردازش برون داد مستقیم مدل، به منظور اطمینان از کارایی BCMV و ارزیابی دقت خروجی مدل در شبیه سازی دماهای بیشینه اقلیم آتی ایران، با محاسبه معیارهای RMSE، CVMSE و MBA به مقایسه برون داد مستقیم مدل با داده‌های پس پردازش شده و مقادیر مشاهده‌ای پرداخته شد.

ترسیم نقشه‌های دماهای حدی بیشینه ایران در دوره اقلیمی پایه و دوره اقلیمی آتی (نزدیک، میانی و دور) تحت سناریوهای RCP تا پایان قرن بیست و یکم

به منظور شبیه سازی روند تغییرات دمای بیشینه در اقلیم آتی، معادلات سه بعدی توزیع فضایی میانگین سالانه دمای بیشینه در گستره ایران تعیین شد. بدین منظور ابتدا معادلات سه بعدی توزیع فضایی میانگین سالانه دمای بیشینه در دوره

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از داده‌های مشاهداتی روزانه دمای بیشینه برای بررسی دوره اقلیمی پایه اقلیم گذشته (۱۹۸۶-۲۰۰۵) و برای اقلیم آتی از خروجی‌های ریزمقیاس شده مدل جهانی CNRM-CM5 از مجموعه مدل‌های CMIP5 تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد.

کنترل کیفی داده‌ها

در این پژوهش کنترل کیفی داده‌ها با روش‌های آماری در سطح اطمینان پنج درصد مورد بررسی قرار گرفت. در محله اول خلأهای آماری شناسایی و به روش رگرسیون‌های چندگانه بازسازی شدند. در ادامه احتمال وجود داده‌های پرت با روش دامنه میان چارکی تعدیل شده شناسایی و مورد بررسی قرار گرفت. سپس توسط آزمون هارست (Hurst) کفایت طول دوره آماری و در ادامه با استفاده از آزمون گردش والد-ولفویتز (Wald-Wolfowitz) تصادفی بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، داده‌ها تصادفی و دارای حافظه بلندمدت در سطح اطمینان ۵ درصد هستند.

پس پردازش خروجی مدل

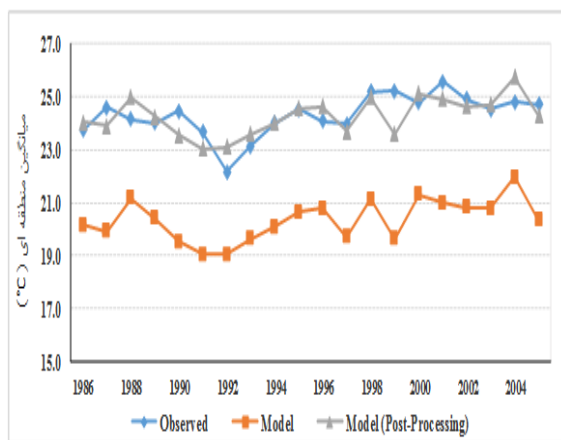
به منظور بهبود شبیه سازی، خروجی‌های مدل در همه ۸۵ ایستگاه، در محیط برنامه‌نویسی R با تکیه به روش (BCM)

معیار	برون داد مستقیم مدل	برون داد پس پردازش شده مدل	کارایی BCMV
RMSE ¹	4.00	0.32	0.92
	16.48	1.33	
NRMSE ²	Good	Excellent	0.94
	Underestimated	Underestimated	
MAE ⁴	3.95	0.53	0.87

جدول ۲ - طبقه بندی مقادیر NRMSE

Classification NRMSE (Jamieson et al., 1991) [13]	
Excellent	NRMSE < 10
Good	10 ≤ NRMSE < 20
Fair	20 ≤ NRMSE < 30
Poor	NRMSE ≥ 30

در ادامه به منظور تشریح و مقایسه بهتر، نمودار سری زمانی میانگین منطقه‌ای (گستره کل کشور) دمای حدی بیشینه ایران برای مقادیر مشاهداتی، برون داد مستقیم مدل و مقادیر پس پردازش شده در دوره اقلیمی پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۶) آورده شده است (شکل ۲).



شکل ۲ - مقایسه مقادیر میانگین منطقه‌ای (گستره کل کشور) دمای بیشینه مشاهداتی، برون داد مستقیم مدل و خروجی‌های پس پردازش شده در دوره اقلیمی پایه - نگرش کلی

نتایج بررسی روند تغییرات دماهای حدی بیشینه در مقیاس نقطه‌ای در گستره کشور

اقلیمی پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۶) و دوره اقلیمی آتی در مختصات فضایی (X, Y, Z) ایران بر اساس روش لایه خطا محاسبه شد. به‌طورکلی اساس این روش بر جستجوی یک معادله با مؤلفه‌های طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع به صورت معادله $P(\theta) = \alpha + \beta x + \gamma y + \lambda z + \varepsilon$ است که در آن $P(\theta)$ ویژگی مورد نظر و ε خطای برآورد است که به روش ایجاد و اعمال لایه خطا بر معادله اضافه می‌گردد [12]. در ادامه تغییرات این کمیت در قالب نقشه‌هایی با تفکیک مکانی 1×1 کیلومتر و به روش ایجاد لایه تصحیح خطا برای دوره اقلیمی پایه و برای سه دوره اقلیمی آتی ذکر شده در محیط GIS ترسیم شد. سپس روند تغییرات سالانه و منطقه‌ای دمای بیشینه با محاسبه ضرایب آزمون ناپارامتری من کندال به تفکیک هر ۸۵ ایستگاه مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج بررسی راستی آزمایی روش ریزمقیاس نمایی و ارزیابی کارایی BCMV

جدول ۱ نتایج راست آزمایی منطقه‌ای (گستره کل کشور) مدل اقلیمی CNRM-CM5 از مجموعه مدل‌های CMIP5 تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 را در پیش‌بینی مقادیر حدی دمای بیشینه را نشان می‌دهد، همان طوری که مشاهده می‌گردد، توانایی مدل برای شبیه‌سازی دماهای حدی بیشینه در گستره ایران بدون عملیات پس پردازش در وضعیت خوب قرار دارد، بعد از عملیات پس پردازش بر روی برون داد مستقیم مدل از وضعیت خوب به وضعیت عالی می‌رسد جدول ۲. طبق نتایج جدول ۱ برون داد مستقیم مدل کم برآوردی را نشان می‌دهد که بعد از عملیات پس پردازش تا حدود ۹۴ درصد کم برآوردی مدل نسبت به حالت اولیه تعدیل می‌گردد.

همچنین روش پس پردازش BCMV برای معیار RMSE، MBE و MAE به ترتیب ۹۲، ۹۴ و ۸۷ درصد موجب بهبود شبیه‌سازی دماهای حدی بیشینه در اقلیم آتی شده است.

جدول ۱- نتایج راست آزمایی روش ریزمقیاس نمایی و ارزیابی کارایی BCMV

¹ Root Mean Square Error (RMSE)

² Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

³ Mean Bias Error (MBE)

⁴ Mean Absolute Error (MAE)

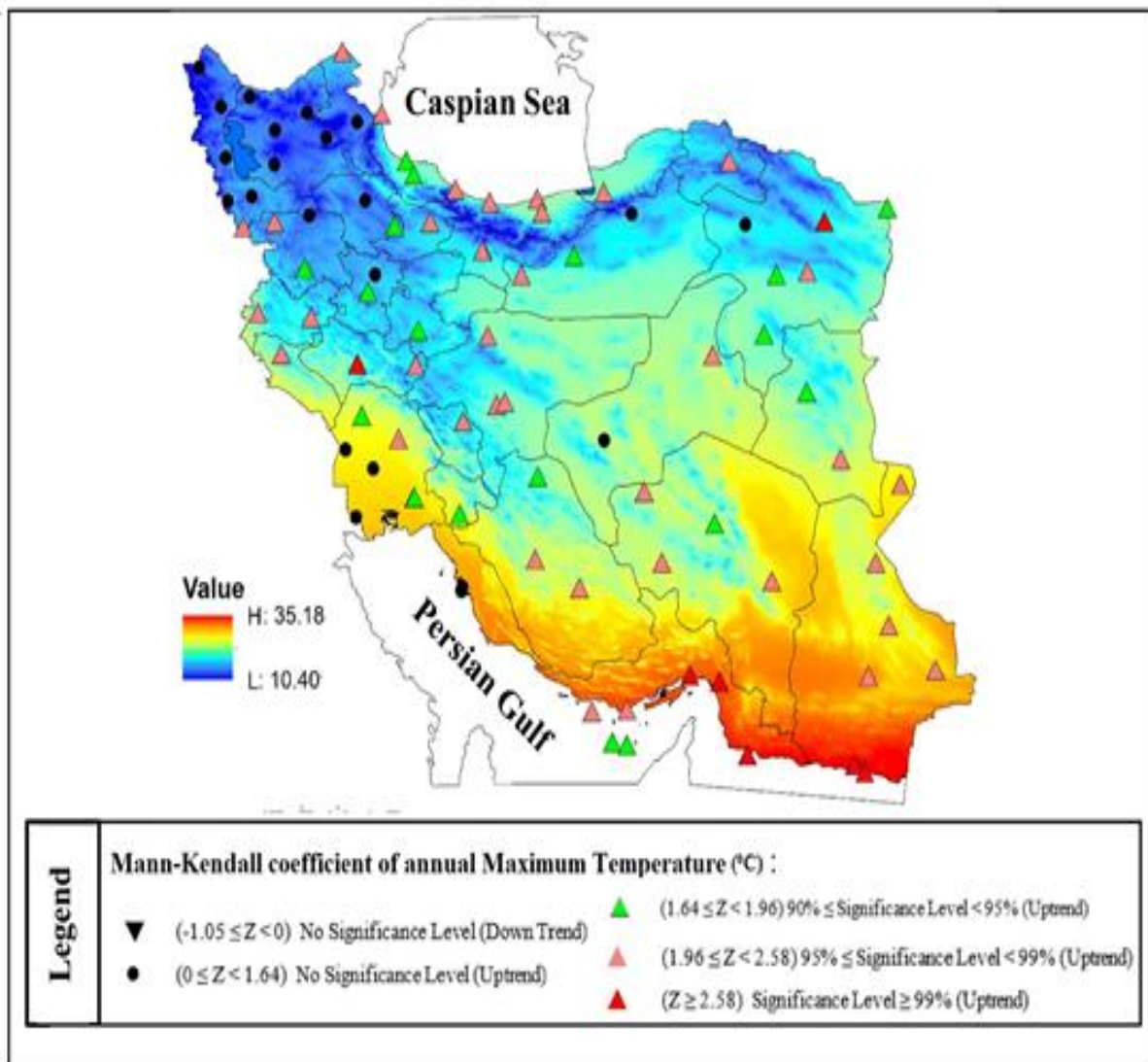
به منظور بررسی روند تغییرات دماهای حدی بیشینه در مقیاس نقطه‌ای، ابتدا معادلات تغییرات متوسط سالانه دمای بیشینه ایران با مختصات جغرافیایی مطابق جدول ۳ بدست آورده شد، در ادامه در مقیاس ماتریسی ۱×۱ کیلومتر مقادیر متوسط

سالانه برای دوره اقلیمی پایه و آتی (نزدیک، میانی و دور) تحت سناریوهای RCP، برای گستره کل ایران محاسبه و نقشه‌ها ترسیم شدند شکل ۳ و ۴.

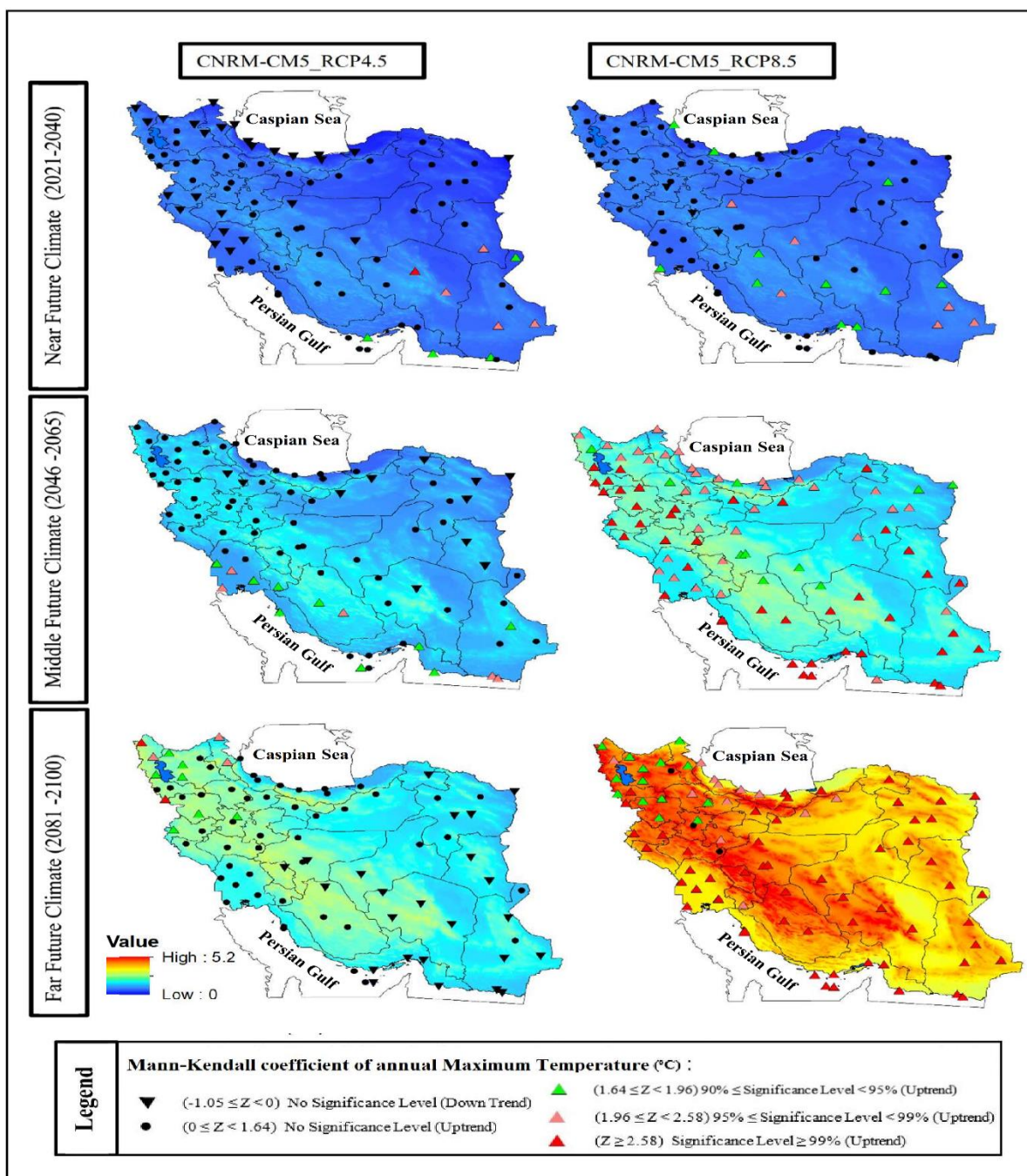
جدول ۳- معادلات فضایی (ارتفاع و طول و عرض جغرافیایی) میانگین سالانه دمای بیشینه ایران در دوره اقلیمی پایه (۱۹۸۶-۲۰۰۵) و اقلیم آتی (نزدیک،

میانی و دور) تحت سناریوهای RCP

R ²	معادله	سناریو	دوره‌های اقلیمی
79	Average annual maximum temperature = 56.35-0.002695 Z + 0.0386X-0.9372 Y	-	دوره اقلیمی پایه
41.1	Average annual maximum temperature = 2.286-0.01256 X-0.03265 Y + 0.000178 Z	RCP4.5	اقلیم آتی نزدیک
57.5	Average annual maximum temperature = 3.912-0.03058 X-0.05574 Y + 0.000233 Z	RCP8.5	
61	Average annual maximum temperature = 3.975-0.02503 X-0.05263 Y + 0.000357 Z	RCP4.5	اقلیم آتی میانی
51.8	Average annual maximum temperature = 5.263-0.03827 X-0.05680 Y + 0.000394 Z	RCP8.5	
60	Average annual maximum temperature = 5.713-0.05332 X-0.0426 Y + 0.000422 Z	RCP4.5	اقلیم آتی دور
63	Average annual maximum temperature = 7.002-0.0520 X-0.0303 Y + 0.000742 Z	RCP8.5	



شکل ۳- میانگین سالانه دمای بیشینه (°C) ایران و روند ضرایب من کندال ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره اقلیمی پایه (۱۹۸۶-۲۰۰۵)



شکل ۴- تغییرات میانگین سالانه دمای بیشینه (°C) ایران نسبت به میانگین دوره اقلیمی پایه، تغییرات روند ضرایب من کندال در چشم انداز آتی (اقلیم آتی نزدیک، میانی و دور) تحت سناریوهای مختلف RCP-نگرش یکپارچه.

به ترتیب ۲۲.۱، ۴۴.۲ و ۸.۱ درصد از ایستگاه‌های مورد بررسی دارای تغییرات معنی دار بودند و ۲۵.۶ درصد از ایستگاه‌ها با وجود اینکه روند افزایشی داشتند ولی معنی داری را تا سطح اطمینان ۹۰ درصد نشان ندادند. همچنین نتایج مربوط به دوره‌های اقلیمی آتی نزدیک، میانی و دور تحت سناریوهای RCP در جدول ۴ آورده شده است.

نتایج بررسی روند تغییرات دماهای حدی بیشینه ایستگاه‌های همدیدی مورد مطالعه

نتایج بررسی روند تغییرات میانگین سالانه دمای بیشینه در دوره اقلیمی پایه (۱۹۸۶-۲۰۰۵) به تفکیک ایستگاه‌ها نشان داد که در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه، این کمیت دارای روند افزایشی بوده که در سطوح اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد

جدول ۴- درصد معنی داری و عدم معنی داری ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطوح مختلف سطح اطمینان در دوره اقلیمی پایه و اقلیم آتی (نزدیک، میانی و دور) تحت سناریوهای RCP در گستره ایران

اقلیم آتی دور		اقلیم آتی میانی		اقلیم آتی نزدیک		دوره پایه	ضریب من کندانال	سطوح معنی داری
RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5			
۰	۵.۲۴	۰	۵.۱۰	۲۹	۳.۲	۰	$-1.05 \leq Z < 0$	عدم معنی داری (روند منفی)
۵.۳	۶۱	۳.۲	۱.۷۲	۴.۶۰	۹.۷۷	۶.۲۵	$0 \leq Z < 1.64$	عدم معنی داری (روند مثبت)
۳.۱۶	۳.۸	۳.۹	۶.۱۱	۷.۴	۸.۱۲	۱.۲۲	$1.64 \leq Z < 1.96$	سطح اطمینان ۹۰ درصد
۱۴	۷.۳	۴.۳۸	۸.۵	۷.۴	۷	۲.۴۴	$1.96 \leq Z < 2.58$	سطح اطمینان ۹۵ درصد
۲.۶۶	۵.۲	۵۰	۰	۲.۱	۰	۱.۸	$Z \geq 2.58$	سطح اطمینان ۹۹ درصد

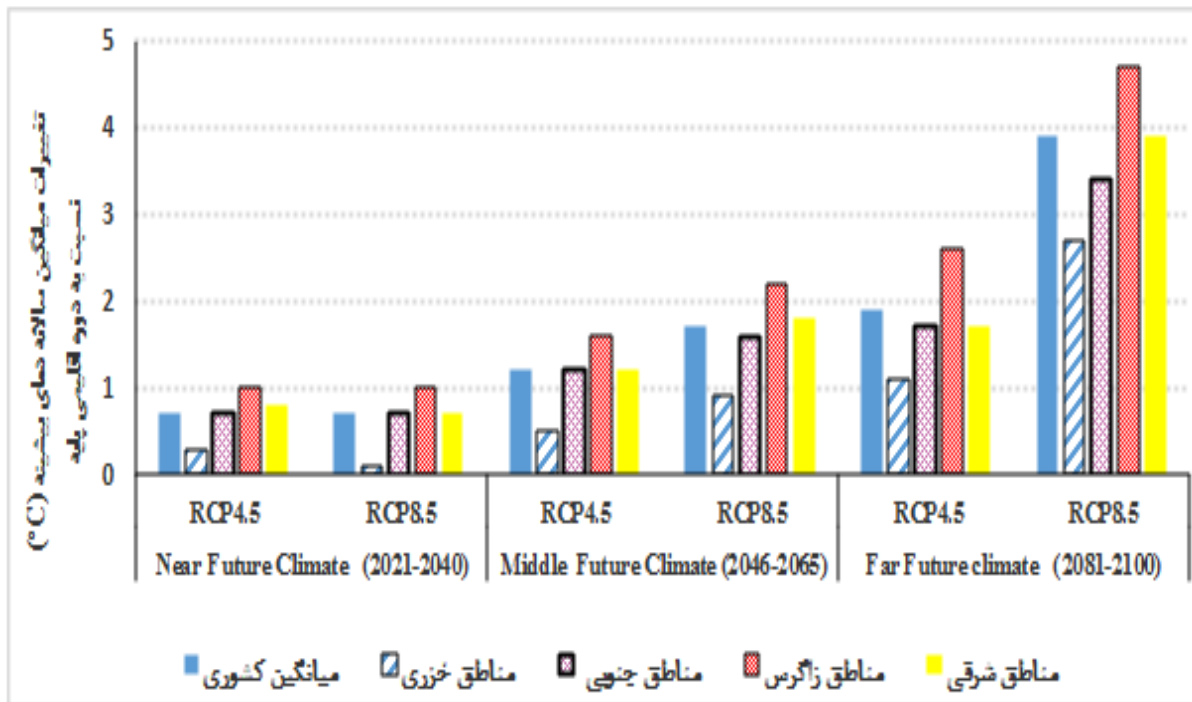
نتایج تحقیق نشان داد، روند میانگین ناحیه‌ای دماهای حدی بیشینه در همه مناطق جغرافیایی کشور (به تفکیک ده منطقه جغرافیایی مورد مطالعه) افزایشی است، اما در بین مناطق مختلف جغرافیایی کشور، بیشترین شدت افزایش دماهای بیشینه در اقلیم آتی نسبت به دوره اقلیمی پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۶) به ترتیب مربوط به مناطق زاگرس و شمال غرب ایران و کمترین آن به ترتیب مربوط به مناطق سواحل خزری و جنوب شرقی است (جدول ۵) و (شکل ۵).

همان طوری که از نتایج جدول ۳ پیداست، افزایش دماهای حدی بیشینه در دوره اقلیم آتی دور (۲۱۰۰-۱۹۸۶) نسبت به دوره اقلیمی پایه و دوره اقلیمی آتی نزدیک و میانی شدت بیشتری دارد. همچنین نتایج حاکی از آن است که در سناریو RCP8.5 شدت افزایش دمای بیشینه نسبت به سناریو RCP4.5 شدت بیشتری دارد.

نتایج بررسی تغییرات میانگین ناحیه‌ای دماهای حدی بیشینه ایران

جدول ۵- تغییرات میانگین ناحیه‌ای دماهای حدی بیشینه (°C) ایران نسبت به میانگین دوره اقلیمی پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۶) در چشم انداز آتی (اقلیم آتی نزدیک، میانی و دور) تحت سناریوهای مختلف RCP-نگرش یکپارچه

اقلیم آتی دور		اقلیم آتی میانی		اقلیم آتی نزدیک		میانگین دوره پایه	مناطق جغرافیایی
RCP8.5	RCP 4.5	RCP8.5	RCP 4.5	RCP8.5	RCP 4.5		
۴.۳	۲.۲	۱.۹	۱.۲	۰.۷	۰.۷	۱۸.۲	شمال غرب
۲.۷	۱.۱	۰.۹	۰.۵	۰.۱	۰.۳	۲۰.۷	مناطق خزری
۴.۷	۲.۶	۲.۲	۱.۶	۱	۱	۲۲.۲	مناطق زاگرس
۳.۹	۱.۷	۱.۵	۱.۱	۰.۵	۰.۶	۲۳	شمال شرق
۳.۹	۱.۷	۱.۸	۱.۲	۰.۷	۰.۸	۲۶	مناطق شرقی
۳.۴	۱.۶	۱.۶	۱.۲	۰.۷	۰.۷	۳۰.۷	مناطق جنوب شرقی
۳.۴	۱.۷	۱.۶	۱.۲	۰.۷	۰.۷	۳۱.۱	مناطق جنوبی
۴.۱	۲	۱.۹	۱.۳	۰.۸	۰.۸	۳۳.۲	مناطق جنوب غرب
۴.۳	۱.۸	۱.۸	۱.۴	۰.۶	۰.۷	۲۶.۳	مناطق مرکزی
۴.۱	۱.۸	۱.۵	۱.۲	۰.۴	۰.۵	۲۳.۷	استان تهران



شکل ۵- تغییرات میانگین سالانه دمای بیشینه (°C) منطقه‌ای (میانگین کشوری) و میانگین ناحیه‌ای ایران نسبت به میانگین دوره اقلیمی پایه (۱۹۸۶-۲۰۰۵)، در چشم انداز آتی (اقلیم آتی نزدیک، میانی و دور) تحت سناریوهای مختلف RCP-نگرش یکپارچه

جدول ۶- چشم‌انداز تغییرات منطقه‌ای (میانگین کشوری) دمای بیشینه ایران در اقلیم آتی (نزدیک، میانی و دور) نسبت به دوره اقلیمی پایه (۱۹۸۶-۲۰۰۵) تحت سناریوهای RCP

دوره اقلیمی	اقلیم آتی نزدیک (2021-2040)	اقلیم آتی میانی (2046-2065)	اقلیم آتی دور (2081-2100)
سناریوهای انتشار	میانگین و فاصله اطمینان در سطح اعتماد ۹۵٪	میانگین و فاصله اطمینان در سطح اعتماد ۹۵٪	میانگین و فاصله اطمینان در سطح اعتماد ۹۵٪
RCP4.5	0.7 (0.5-1.1)	1.2 (0.9-1.9)	1.8 (1.4-2.8)
RCP8.5	0.7 (0.4-1.2)	1.7 (1.3-2.5)	3.9 (3.3-5.3)

به منظور مقایسه شدت افزایش میانگین منطقه‌ای دمای بیشینه کشور در اقلیم پایه و آتی (اقلیم آتی نزدیک، میانی و دور)؛ متوسط ضرایب من کندهال ایستگاه‌های مورد مطالعه برای هر یک از دوره‌های اقلیمی پایه و آتی تحت سناریوهای RCP محاسبه شد، نتایج نشان داد شدت افزایش میانگین منطقه‌ای دمای بیشینه کشور در دوره اقلیمی دور (۲۱۰۰-۲۰۸۱) و تحت سناریو RCP8.5 نسبت به سناریو و دوره‌های اقلیمی دیگر بیشتر است (جدول ۷).

به نظر می‌رسد افزایش دما و متعاقباً گرمایش زمین باعث افزایش تبخیر و تزریق رطوبت بیشتر به جو در مناطق نزدیک به پهنه‌های آبی شده و در نتیجه این علت تا حدودی موجب تعدیل افزایش دما در این مناطق می‌گردد.

نتایج بررسی روند تغییرات میانگین منطقه‌ای دمای حدی بیشینه ایران

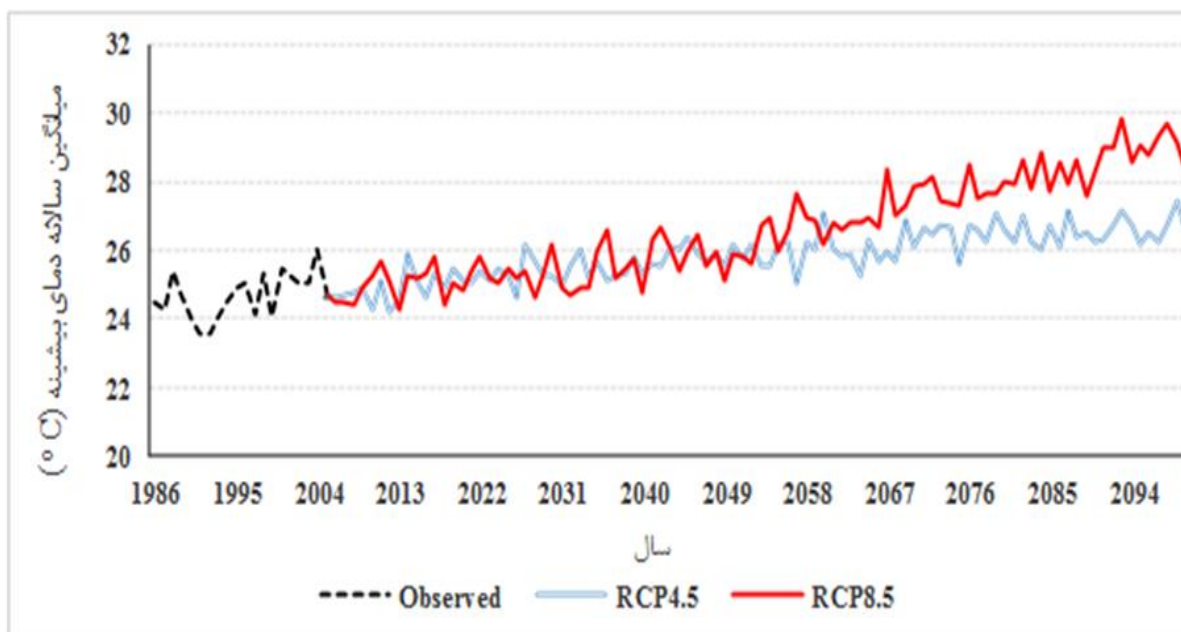
در مقیاس منطقه‌ای (میانگین کشوری) میانگین دمای بیشینه کشور در دوره ۲۰۰۵-۱۹۷۶ به ازای هر دهه حدود ۰.۳ درجه سلسیوس افزایشی معنی دار ($p < 0.1$) داشته است. این مقدار در اقلیم آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰.۲ و ۰.۵ درجه سلسیوس احتمالاً افزایشی خواهد بود. همین طور نتایج نشان داد، میانگین منطقه‌ای سالانه دمای بیشینه کشور در دوره اقلیمی پایه (°C)، ۲۵.۴ بوده که این مقدار در اقلیم‌های آتی نزدیک، میانی و دور تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰.۷ و ۰.۷؛ ۱.۲ و ۱.۷؛ ۱.۹ و ۳.۹ درجه سلسیوس نسبت به دوره اقلیمی پایه احتمالاً افزایش خواهند داشت. جدول ۶ نتایج مربوطه را با فاصله اطمینان ۹۵ درصد را نشان می‌دهد.

در ادامه سری زمانی میانگین سالانه دمای بیشینه ایران در دوره اقلیمی پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۶) و آتی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 آورده شده است شکل ۶. همان طوری که ملاحظه می‌گردد روند میانگین سالانه دمای بیشینه در ایران در دوره اقلیمی پایه و آتی افزایشی است ولی شدت افزایش در سناریو RCP8.5 نسبت به سناریو RCP4.5 بیشتر است، این تفاوت در اقلیم آتی دور (۲۰۸۱-۲۱۰۰) بیشتر می‌گردد.

جدول ۷- میانگین منطقه‌ای ضریب من‌کندال ایران در دوره اقلیمی پایه

و در سه اقلیمی آتی نزدیک، میانی و دور تحت سناریوهای RCP

دوره‌های اقلیمی	سناریو	میانگین منطقه‌ای
دوره پایه	-	1.9
اقلیم آتی نزدیک	RCP 4.5	1.1
	RCP 8.5	0.6
اقلیم آتی میانی	RCP 4.5	0.8
	RCP 8.5	2.6
اقلیم آتی دور	RCP 4.5	0.6
	RCP 8.5	2.7



شکل ۶- سری زمانی میانگین سالانه دمای بیشینه ایران در اقلیم پایه و آتی تحت سناریوهای RCP

در مقیاس میانگین ناحیه‌ای، شدت افزایش دما بیشینه به ترتیب در مناطق زاگرس و شمال غرب ایران بیشترین و به ترتیب در مناطق خزری و جنوب شرقی کمترین است. میزان افزایش میانگین سالانه دمای بیشینه در اقلیم آتی دور (۲۰۸۱-۲۱۰۰) تحت سناریو RCP8.5 نسبت به دوره اقلیمی پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۶) در مناطقی از زاگرس و شمال غرب کشور می‌تواند تا حدود ۵.۲ درجه سلسیوس افزایش یابد که این مقدار افزایش بسیار محسوس است.

مناطق زاگرس و شمال غرب ایران

طبق تحقیقات مرکز ملی اقلیم شناسی مشهد وابسته به سازمان هواشناسی ایران، شدت کاهش بارش در مناطق زاگرس و شمال غرب ایران نسبت به سایر مناطق دیگر کشور بیشتر

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر اثرات محتمل تغییر اقلیم بر روند تغییرات دماهای حدی بیشینه در سه مقیاس نقطه‌ای (ایستگاههای هواشناسی)، ناحیه‌ای (۱۰ منطقه جغرافیایی از کشور) و میانگین کشوری در سه دوره اقلیمی آتی نزدیک، میانی و دور تا پایان قرن بیست و یکم نسبت به دوره اقلیمی پایه (۱۹۸۶-۲۰۰۵) مورد بررسی قرار گرفت که نتایج تحقیق به طور خلاصه به شرح ذیل است.

در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه (۸۵ ایستگاه همدیدی) روند سالانه دماهای حدی بیشینه در دوره اقلیمی پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۶) افزایشی است، ولی شدت افزایش به ترتیب در ایستگاه‌های واقع در مناطق زاگرس و شمال غرب ایران است.

بشری در مناطق نزدیک به پهنه‌های آبی ایران بویژه مناطق خزری بسیار محتمل به نظر می‌رسد.

قدردانی

نویسندگان این مقاله از سازمان هواشناسی کشور به علت همکاری لازم در تهیه داده‌های مورد نیاز این تحقیق و همچنین از دانشگاه تهران که امکان این تحقیق را میسر ساخته کمال تشکر و قدردانی دارند.

منابع

- ۱- ورشایان، و.، خلیلی، ع.، قهرمان، ن.، حجام، س.، (۱۳۹۰): بررسی روند تغییرات مقادیر حدی دما حداقل، حداکثر و میانگین روزانه در چند نمونه اقلیمی ایران، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۷، شماره ۱، ۱۶۹-۱۷۹.
- ۲- عباسی، ف.، و اثمی، م.، (۱۳۹۰). پیش بینی و ارزیابی تغییرات دما و بارش ایران در دهه‌های آینده با الگوی MAGICC-SCENGEN. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۵ (۱): ۷۰-۸۳.
- ۳- باباییان، ا.، مدیریان، ر.، و کریمیان، م.، (۱۳۸۷). ارزیابی تغییرات اقلیمی ایران در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ با استفاده از مدل اقلیمی PRECIS. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تبریز.
- ۴- خلیلی، ع.، ع.، درویش صفت، ر.، برادران راد، ج.، بذرافشان. (۱۳۸۳). پیشنهاد روش برای پهنه‌بندی اقلیمی در محیط GIS. مطالعه موردی: شمال غرب ایران در سیستم سلیمانینف، نشریه بیابان، شماره ۲، صص ۲۲۷-۲۳۸.
- ۵- دفتر مرجع ملی هیات بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC)، پژوهشکده اقلیم‌شناسی مشهد (۱۳۹۶). آشکار سازی، ارزیابی اثرات و چشم‌انداز تغییر اقلیم در ایران طی قرن بیست و یکم.
- ۶- عسگری، س.، قهرمان، ن.، بابائیان، ا.، (۱۳۹۶): پیش‌نگری اثرات محتمل تغییر اقلیم بر شاخص گرمایی (THI) تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCP) در ایران، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، دوره ۱۳۹۶، شماره ۳۱، ۱-۱۸.

است، به طوری که میزان بارش در اقلیم آتی (۲۱۰۰-۲۰۸۱) در شمال غرب ایران تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰.۸ و ۹.۶ درصد نسبت به دوره اقلیمی پایه کاهش خواهد داشت و این مقدار برای منطقه زاگرس تحت سناریو RCP8.5 در حدود ۱۲.۱ درصد است [۱۳]. این در شرایطی است که طبق نتایج این تحقیق در این مناطق افزایش دمای بیشینه نیز نسبت به سایر مناطق کشور بیشتر و محسوس‌تر است، فلذا به نظر می‌رسد توأم شدن افزایش محسوس دماهای حدی بیشینه در مناطق زاگرس و شمال غرب با کاهش محسوس بارش در مناطق ذکر شده، موجب افزایش آسیب‌پذیری این مناطق نسبت به سایر مناطق ایران به پدیده تغییر اقلیم گردد، بنابراین بروز انواع مشکلات زیست‌محیطی از جمله تنش‌های شدید آبی در این مناطق در اقلیم آتی دور از تصور نیست.

مناطق نزدیک به پهنه‌های آبی در ایران، بویژه مناطق خزری

هر چند طبق تحقیقات این مقاله شدت افزایش دماهای حدی بیشینه در مناطق نزدیک به پهنه‌های آبی بویژه مناطق خزری نسبت به سایر مناطق ایران کمتر است، ولی از آنجایی که مناطق نزدیک به پهنه‌های آبی به منابع رطوبتی نزدیک‌تر هستند، به نظر می‌رسد در اقلیم آتی، افزایش دما منجر به افزایش رطوبت مطلق در این مناطق گردد، در نتیجه توأم شدن افزایش دما و رطوبت در این مناطق باعث بالا رفتن تنش حرارتی (THI) معمولاً شامل ترکیبی از دمای میانگین یا بیشینه با رطوبت هوا یا نقطه شبنم است) می‌گردد، نتیجه حاصل مطابق نتایج تحقیق عسگری و همکاران [۱۴] است.

افزایش تنش گرمایی در مناطق ذکر شده، باعث بروز انواع مشکلات زیست‌محیطی از جمله تهدید سلامتی انسان (افزایش ناراحتی‌های قلبی، بالا رفتن فشارهای عصبی و افزایش فشار خون [۱۵] و [۱۶]) و همین‌طور باعث کاهش راندمان تولیدات زراعی و دامی بویژه تولید شیر خواهد بود [۱] و [۲]. بنابراین در اقلیم آتی، تهدید امنیت غذایی و حیات

- the Intergovernmental Panel on Climate Change: Cambridge University Press.
- 12- Barrington, L., & Strandberg, G. (2018). Does the projected pathway to global warming targets matter? *Environmental Research Letters*, 13 (2), 024029.
- 13- Zhang, Y., Fu, L., Pan, J., & Xu, Y. (2017). Projected Changes in Temperature Extremes in China Using RECIS. *Atmosphere*, 8 (1), 15.
- 14- Bennett, K. E., & Walsh, J. E. (2015). Spatial and temporal changes in indices of extreme precipitation and temperature for Alaska. *International Journal of Climatology*, 35 (7), 1434-1452.
- 15- Pinya, M. A. S., Hundedcha, Y., Lawrence, D., Madsen, H., Willems, P., Martinkova, M. & Loukas, A. (2015). Inter-comparison of statistical downscaling methods for projection of extreme precipitation in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19 (4), 1827-1847.
- 16- de Carvalho, A. L., Menezes, R. S. C., Nóbrega, R. S., de Siqueira Pinto, A., Ometto, J. P. H. B., von Randow, C., & Giarolla, A. (2015). Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. *Renewable Energy*, 78, 26-34.
- ۷- نگهبان، سید امیر رضا، بابایی مسدوقی، یوسف، فرهادیان، مریم، کلاتری، بهزاد، جلالی، مهدی، ملاکاظمیه، مهدی، (۱۳۹۳): بررسی ارتباط تنش گرمایی و پاسخ فیزیولوژیک ناشی از آن به منظور تعیین شاخص بهینه واکنش گرمایی، مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دوره ۱، شماره ۱، ۸-۱۵.
- ۸- یزدان پناه، حجت اله، صالحی فرد، عذری، گلشاهی، جعفر، (۱۳۹۴): بررسی تاثیر امواج گرمایی بر تعداد مراجعات قلبی و عروقی شهر بندرعباس، مجله برنامه ریزی فضایی (جغرافیا)، دوره ۵، شماره ۳، ۴۵-۶۲.
- 9- Mauger, G., Bauman, Y., Nennich, T., & Salathé, E. (2015). Impacts of climate change on milk production in the United States. *The Professional Geographer*, 67 (1), 121-131.
- 10- Ghavi Hossein-Zadeh, N., Mohit, A., & Azad, N. (2013). Effect of temperature-humidity index on productive and reproductive performances of Iranian Holstein cows. *Iranian Journal of Veterinary Research*, 14 (2), 106-112.
- 11- Stocker, T. (2014): *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of*