

پیش‌نگری تنش گرمایی در ایران بر اساس برون‌داد چند مدلی همادی CMIP6

الهام کدخدا^۱، کمال امیدوار^{۲*}، آذر زرین^۳، احمد مزیدی^۴ و عباسعلی داداشی رودباری^۵

^۱ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۳ دانشیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۴ دانشیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۵ پژوهشگر پسادکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۳)

چکیده

هدف این مطالعه پراکنش فضایی شاخص UTCI طی دوره‌های تاریخی و آینده در ایران است. برای این منظور سه متغیر دما، رطوبت نسبی و تندی باد روزانه از دو دسته داده شامل داده‌های ۱۷۴ ایستگاه هواشناسی همدیدی و پنج مدل از سری مدل‌های CMIP6 شامل GFDL-ESM4، IPSL-CM6A-LR، MRI-ESM2-0، MPI-ESM1-2-HR و UKESM1-0-LL بررسی شدند. سپس یک مدل همادی (CMIP6-MME) از این پنج مدل با روش میانگین وزنی مستقل (IWM) تولید شد. کارایی مدل‌های منفرد و مدل همادی تولید شده با نمودار تیلور مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد چند مدلی همادی از مدل‌های منفرد کارایی بالاتری را برای هر سه متغیر مورد بررسی دارد. نتایج نشان داد پراکنش فضایی میانگین‌های اقلیمی فصلی شاخص UTCI وردایی قابل توجهی در ایران نشان می‌دهد و وردایی این شاخص تحت تأثیر عرض جغرافیایی، توپوگرافی پیچیده و دوری و نزدیکی به منابع آبی در ایران است. به‌طور کلی تنش گرمایی در ایران تا پایان قرن افزایش قابل توجهی خواهد داشت و شاهد کاهش قابل توجه پهنه‌هایی با عدم تنش گرمایی تا پایان قرن حاضر خواهیم بود. در مقابل، در اواخر قرن تنش گرمایی قوی تا خیلی قوی به‌طور قابل توجهی در کشور افزایش می‌یابد. در حالی که پهنه‌هایی با عدم تنش گرمایی جابجایی مکانی به مناطق مرتفع‌تر و عرض‌های جغرافیایی بالاتر را نشان می‌دهند. این نتایج نشان می‌دهد که اقدامات مؤثری برای سازگاری با گرمایش جهانی و کاهش پیامدهای آن باید انجام شود تا از تأثیر نامطلوب تغییرات پیش‌نگری شده تنش گرمایی در ایران جلوگیری شود.

واژه‌های کلیدی: تنش گرمایی، شاخص UTCI، مدل همادی، CMIP6، ایران

۱ مقدمه

تغییر اقلیم که به دنبال گرمایش جهانی انسان ساخت ایجاد شده است؛ شدت، مدت و فراوانی فرین‌های دمایی را در سراسر جهان افزایش داده است (IPCC، ۲۰۲۱). فعالیت‌های انسانی تحت تأثیر شرایط اقلیمی و تغییر اقلیم قرار دارد (برتون و همکاران، ۲۰۰۹). در واقع، انسان به دمای محیط بسیار حساس است. به عنوان مثال، گرم‌زدگی می‌تواند باعث مرگ ناگهانی شود یا ممکن است به اندام‌های اصلی بدن و عملکردهای فیزیولوژیکی آسیب برساند. همچنین افزایش دما و فرین‌های دمایی می‌تواند احتمال بیماری‌های قلبی-عروقی را افزایش دهد (بریجر، ۲۰۰۸).

فرین‌های اقلیمی بر همه ابعاد زندگی بشر از جمله غذا، آب و امنیت تأثیر می‌گذارند. یکی از فرین‌های دمایی که اثر قابل توجهی را بر بدن انسان دارد، تنش گرمایی است. تنش گرمایی با ترکیب عوامل زیست-هواشناسی متعدد تعیین می‌شود و به دلیل ماهیت پیچیده آن تأثیرات نسبتاً شدیدتری بر سلامت عمومی نسبت به رخدادهایی با دمای بالا دارد (یان و همکاران، ۲۰۲۱). تنش گرمایی پیامدهای فاجعه باری بر سلامت انسان و گروه‌های جمعیتی آسیب‌پذیر دارد. علاوه بر سلامت عمومی، استرس ناشی از فرین‌های دمایی بهره‌وری نیروی کار را نیز کاهش می‌دهد (کومار و میسرا، ۲۰۲۰). در سال‌های اخیر، تنش گرمایی به دلیل شدت یافتن گرمایش جهانی توجه جامعه علمی را به خود جلب کرده است. با این حال هنوز بررسی جامعی از آن طی دوره تاریخی و آینده در ایران انجام نشده است.

در دهه‌های اخیر، زمین گرمایش سریع و بی‌سابقه‌ای را تجربه کرده است و پیش‌بینی می‌شود که این روند در دهه‌های آینده نیز با شدت بیش‌تری ادامه یابد (IPCC، ۲۰۲۱). استفاده از شاخص‌های ترکیبی اقلیمی همانند تنش گرمایی به‌عنوان شاخصی برای بررسی اثرات تغییر اقلیم، درک عملی روشن‌تری نسبت به متغیرهای خام هواشناسی

مانند دما و رطوبت دارد (بوزان و هوپر، ۲۰۲۰). برای مثال، استفاده از شاخص‌های تنش گرمایی برای پیش‌بینی امواج گرمایی در قرن بیست و یکم نسبت به مطالعاتی که صرفاً دما را پیش‌نگری می‌کنند بهتر توانسته تهدیدات بالقوه سلامت انسانی ناشی از گرمایش جهانی را با در نظر گرفتن نقش مهم رطوبت برجسته کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲). تنش‌های گرمایی علاوه بر انسان بر محیط‌زیست (گیاهان، جانوران و ...) نیز اثرگذار است. در همین راستا بیش از ۱۰۰ شاخص و روش مختلف برای مطالعه تنش گرمایی توسعه داده شده است (اولا و همکاران، ۲۰۲۲). از بین شاخص‌های مورد بررسی شاخص جهانی اقلیم-گرمایی (UTCI) به دلیل در نظر گرفتن متغیرهای اقلیمی بیشتر مقبولیت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها دارد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲).

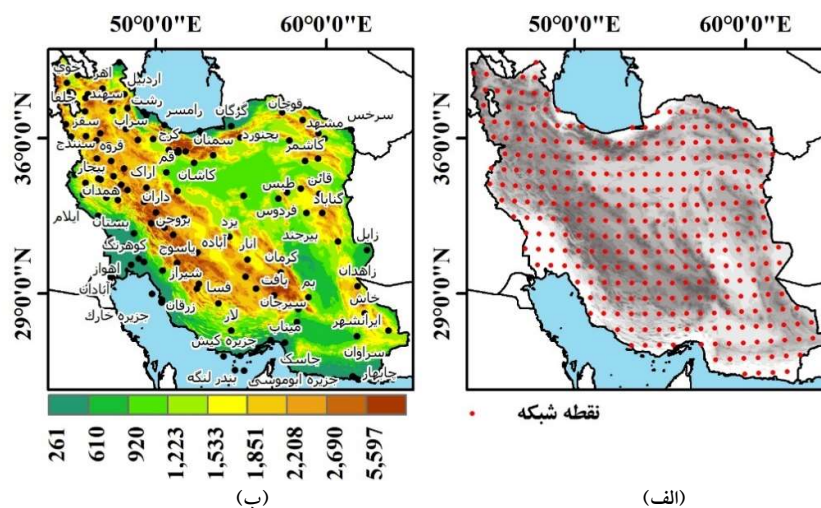
شاخص جهانی اقلیم-گرمایی (UTCI) در سال ۱۹۹۹ توسط گروهی از متخصصان ترموفیزیولوژی، طب شغلی، علوم محیطی، فیزیک، زیست-هواشناسی و اقلیم‌شناسی توسط انجمن بین‌المللی هواشناسی زیستی ایجاد شد (بلازیچک، ۲۰۲۱). شاخص UTCI یک شاخص پیشرفته است که راحتی فیزیولوژیکی بدن انسان را در شرایط خاص هواشناسی تعیین می‌کند. این شاخص به عنوان دمای هوای شرایط مرجع تعریف می‌شود که باعث ایجاد تنش گرمایی مشابه با شرایط واقعی می‌شود. این روش تأثیر متغیرهای هواشناسی (دمای محیط، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و تندی باد) و عوامل انسانی (لباس سازگار با محیط و نوع فعالیت بدنی) را در نظر می‌گیرد (بلازیچک و همکاران، ۲۰۱۲). شاخص UTCI پیشرفته‌ترین شاخص هواشناسی زیستی است (کاتاوتاس و فوندا، ۲۰۱۹). از این شاخص به‌طور گسترده در رویکردهای عملی متعدد، مانند تأثیر کوتاه‌مدت و بلندمدت محیط جوی بر بدن انسان، تغییر اقلیم، فرین‌های اقلیمی، در مطالعات پزشکی و بسیاری از جنبه‌های تحقیقات گردشگری یا در زیست اقلیم شهری

استفاده شده است (استایگر و همکاران، ۲۰۱۹). ترکیب متغیرهای مختلف اقلیمی و در نظر گرفتن عوامل انسانی، شاخص UTCI را به عنوان یک شاخص کارآمد برای مطالعه اثرات تغییر اقلیم به خصوص بر سلامت انسان معرفی کرده است که از این نظر بررسی این شاخص می‌تواند دستاوردهای بسیاری در حوزه‌های مختلف طبیعی، اجتماعی، اقتصادی و بسیاری دیگر از جنبه‌ها داشته باشد. از شاخص UTCI به طور گسترده‌ای برای بررسی تنش گرمایی در نقاط مختلف جهان استفاده شده است (بروده و همکاران، ۲۰۱۲؛ لام و لائو، ۲۰۱۸؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۹؛ ابراهیم و همکاران، ۲۰۲۱). از این شاخص همچنین برای تحلیل زمانی-مکانی عوامل زیست‌اقلیمی در کشورهای مختلفی همانند لهستان (کرزیژوسکا و همکاران، ۲۰۲۱)، جنوب شرقی برزیل (سیلوا و هیریشما، ۲۰۲۱) و سریلانکا (سیمات و امانوئل، ۲۰۲۲) استفاده شده است. همچنین از شاخص UTCI برای بررسی اثرات تنش گرمایی بر مرگ‌ومیر در کشورهای مختلفی همانند استرالیا و هند استفاده شده است (صادقی، ۲۰۲۲؛ کومار و شارما، ۲۰۲۲). گروه دیگری از مطالعات نیز به پیش‌نگری شاخص UTCI در مناطق مختلف همانند کل جهان (شوینگ‌شاکل و همکاران، ۲۰۲۱)؛ ۳۵۲ شهر چین (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲) و جنوب چین (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲) پرداختند. نتایج این مطالعات نشان داد که تنش گرمایی در مناطق مختلف جهان در حال افزایش است.

۱۴۰۰) اشاره کرد که به بررسی تغییرات آسایش حرارتی این مناطق پرداخته‌اند. برخی دیگر از مطالعات همانند زارع و همکاران (۲۰۱۹) از شاخص UTCI برای بررسی شرایط فیزیولوژیکی کارگران در جنوب شرقی ایران استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که بر اساس برون‌داد شاخص UTCI کارگران معدنی واقع در جنوب شرقی ایران طی ماه‌های تیر تا مرداد ۱۳۹۶ در مواجهه با تنش گرمایی قرار گرفته‌اند. روشن و همکاران (۲۰۱۹) نیز به بررسی شاخص UTCI در مناطق مختلف اقلیمی ایران پرداختند و خروجی‌های این شاخص را برای مناطق مختلف اقلیمی تحلیل کردند.

بررسی پیشینه مطالعات انجام شده از تنش گرمایی در ایران نشان می‌دهد که از این شاخص در زمینه‌های مختلفی همچون سلامت کارگران، گردشگری، آسایش حرارتی و سلامت انسانی استفاده شده است. با این حال پیش‌نگری تنش گرمایی در ایران که یک حوزه پژوهشی بسیار مهم است تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. مطالعه حاضر اولین مطالعه در نوع خود است که به پیش‌نگری تنش گرمایی با شاخص UTCI در ایران پرداخته است. یافته‌های این مطالعه در درک تنش گرمایی و اتخاذ استراتژی‌های مدیریت ریسک در مقابل فرین‌های دمایی در ایران حیاتی است. این پژوهش در سه بخش کلی سازمان‌دهی شده است. نخست درستی مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) برای سه متغیر دما، رطوبت نسبی و تندی باد با داده‌های ایستگاهی درستی سنجی شد. سپس یک مدل همادی از مدل‌های منتخب تولید شد و در نهایت تنش گرمایی در مقیاس فصلی طی دوره تاریخی و پیش‌نگری در ایران محاسبه و نتایج آن تحلیل شد. همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد دستاوردهای این مطالعه در حوزه‌های مختلفی همچون تغییر اقلیم، گردشگری، حوزه سلامت، انرژی، مدیریت و برنامه‌ریزی‌های آب و کشاورزی حائز اهمیت است.

علیرغم استفاده گسترده از شاخص UTCI در سراسر جهان، مطالعات بسیار کمی در ایران این شاخص را مورد استفاده قرار داده‌اند. بیش‌تر این مطالعات از این شاخص برای یک منطقه یا چند ایستگاه برای بررسی وضعیت گردشگری و اقلیم گردشگری استفاده کرده‌اند که می‌توان به مطالعات انجام شده در باغ فین و بافت تاریخی کاشان (فتاحی و همکاران، ۱۴۰۰) و زاهدان (نظری پور و طاوسی،



شکل ۱. (الف) نقطه شبکه‌های ۰/۵ درجه (شبکه‌بندی مجدد) CMIP6 در ایران؛ (ب) موقعیت ایستگاه‌های همدیدی مورد استفاده؛ در پس‌زمینه ایستگاه‌ها توپوگرافی ایران ارائه شده است (واحد: متر).

۲ روش تحقیق

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه این پژوهش کشور ایران است که در جنوب غربی آسیا واقع شده است (شکل ۱-ب). این کشور دارای توپوگرافی پیچیده‌ای است که باعث شکل‌گیری اقلیم‌های متنوعی در آن شده است. به‌طور کلی ارتفاعات در تمام ایران نقش تعیین‌کننده‌ای را در شکل‌گیری خرد اقلیم‌های کشور دارند.

۲-۲ داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق از دو گروه داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی و برون‌داد متغیرهای هواشناسی پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) استفاده شده است. از داده‌های ایستگاهی برای درستی سنجی برون‌داد دما، رطوبت نسبی و تندی باد مدل‌های CMIP6 طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) استفاده شده است.

۲-۳ داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی

در این تحقیق از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی

طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) برای سه متغیر دما، رطوبت نسبی و تندی باد استفاده شده است. در انتخاب ایستگاه چندین شرط مورد بررسی قرار گرفته است. نخست آنکه داده‌های گمشده کمتر از ۱۰ درصد سری زمانی مورد مطالعه باشد. دوم، داده‌هایی با بیش از ۳ انحراف معیار از مقادیر متوسط روزانه در نظر گرفته نشود؛ سوم، داده‌های تکراری بیش از ۱۰ روز با مقادیر غیر صفر از مطالعه کنار گذاشته شدند دلیل این امر حساسیت روند خطی سری‌های روزانه به مقادیر فرین اقلیمی است (زولینا و همکاران، ۲۰۰۵). با در نظر گرفتن این شروط ۱۲۴ ایستگاه هواشناسی همدیدی برای این مطالعه انتخاب شده است که موقعیت آن‌ها در شکل (۱) ارائه شده است.

۲-۴ پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6)

پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) آخرین نسل از مدل‌های CMIP است که جایگزین CMIP5 شده است. مدل‌های CMIP6 اثرات واداشت‌های مختلف طبیعی و انسانی را در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته و

پیش‌نگری آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶). برای تحلیل پیش‌نگری‌های آینده سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد استفاده قرار گرفتند. سناریوهای SSP را می‌توان به عنوان شرایط محتمل در آینده در نظر گرفت که در آن SSP2-4.5 سناریو حد واسطه با در نظر گرفتن توسعه انرژی‌های سبز در کنار شرایط فعلی و SSP5-8.5 سناریو بسیار بدبینانه با در نظر گرفتن توسعه سوخت‌های فسیلی است (اونیل و همکاران، ۲۰۱۶).

۵-۲ تولید مدل همادی از مدل‌های منفرد CMIP6

جهت تولید مدل همادی از یک روش آماری استفاده می‌شود که در آن وزن‌های نابرابر (میانگین وزنی) یا برابر (میانگین حسابی) به مدل‌ها اختصاص داده می‌شوند (هونگ و همکاران، ۲۰۲۲). علی‌رغم برخی استدلال‌ها، وزن برابر یا میانگین حسابی یا «دموکراسی مدل» (ناتی، ۲۰۱۰) مورد انتقاد قرار گرفته است زیرا قطعیت، استقلال و کارایی هر مدل را در ساخت یک مجموعه چند مدلی (MME) در نظر نمی‌گیرد (آیرینگ و همکاران، ۲۰۱۹). مدل همادی وزنی در یک تعریف ساده و کلی به وزن دهی نابرابر به مدل‌ها گفته می‌شود. این روش شامل تخصیص وزن‌های بیشتر به مدل‌هایی است که برای یک فرآیند یا استفاده خاص کارایی بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها دارند (هونگ و همکاران، ۲۰۲۲). کارایی مدل همادی به شکل قابل توجهی بهبود یافته و عدم قطعیت پیش‌نگری‌ها را کاهش می‌دهد. روش‌های مختلفی برای تولید مدل همادی توسعه داده شده است که از جمله این روش‌ها می‌توان به روش میانگین وزنی مستقل (IWM) اشاره کرد که در مطالعات مختلف در سطح جهانی (بیشاپ و ابراموویتز، ۲۰۱۳؛ بای و همکاران، ۲۰۲۱) و داخلی (زرین و داداشی‌رودباری، ۱۴۰۰؛ زرین و همکاران، ۱۴۰۱) مورد استفاده قرار گرفته و تأیید شده است که برون‌داد مدل همادی وزنی با روش

ارتقاء آن موجب مزیت‌های بسیاری نسبت به نسل‌های قبلی (CMIP3 و CMIP5) در جنبه‌های مختلفی گردیده است. در این مطالعه، از پنج مدل مشارکت یافته در پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) شامل GFDL-ESM4، MPI-ESM1-2-HR، IPSL-CM6A-LR و MRI-ESM2-0 از گونه اجرا اول (r1i1p1f1) به منظور محاسبه شاخص UTCI استفاده شده است. تفکیک افقی مدل‌های مذکور به ترتیب ۱۰۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۱۰۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلومتر است. این پنج مدل از سوی پروژه تحقیقات هماهنگ در سامانه زمین و اقلیم: آزمایش‌ها، دانش، انتشار و گسترش (CRESCENDO) به عنوان مدل‌هایی که فرآیندهای اقلیمی را به خوبی نمایش می‌دهند، معرفی شدند. از نظر حساسیت اقلیمی، پنج مدل GFDL-ESM4، MRI-ESM2-0، MPI-ESM1-2-HR، IPSL-CM6A-LR و UKESM1-0-LL نمایندگان خوبی برای کل مجموعه CMIP6 هستند؛ زیرا شامل سه مدل با حساسیت اقلیمی کم (GFDL-ESM4، MRI-ESM1-2-HR، IPSL-CM6A-LR) و دو مدل با حساسیت اقلیمی بالا (MRI-ESM2-0، UKESM1-0-LL) می‌شوند. به دلیل استفاده از داده‌های شبکه‌ای WFDEI که تفکیک افقی ۰/۵ درجه دارند و به عنوان داده مشاهداتی مبنا برای تصحیح اریبی از آن‌ها استفاده شده است از روش درون‌یابی نگاهشت دوخطی (BIM) برای شبکه‌بندی مجدد (Regridding) مدل‌ها استفاده شده است و تمامی مدل‌ها به تفکیک افقی ۰/۵ درجه رسیدند. سپس اریبی این مدل‌ها با روش تصحیح مرتبه متوالی (SEC: Sequential Elevation Correction) (ویدون و همکاران، ۲۰۱۱) تصحیح شده است.

برای دستیابی به هدف اصلی این مطالعه که پایش و پیش‌نگری تنش گرمایی در ایران تا پایان قرن حاضر بوده است، سه متغیر دما، رطوبت نسبی و تندی باد برای چهار دوره مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این چهار دوره عبارت‌اند از دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) و سه دوره

شرایط مرجع مشابه با پاسخ دینامیکی مدل فیزیولوژیکی» اشاره دارد (جندریتسکی و همکاران، ۲۰۱۲). به این ترتیب که شاخص UTCI یک دمای معادل یا هم‌ارز (Equivalent Temperature) است. در شاخص UTCI تأثیر شرایط هواشناسی با محیط استاندارد شده مرجع «داخلی» با آستانه‌های $WS = (Ta < 29^\circ C) \% RH = 50$ ، $0.5ms^{-1}$ ($Ta < 29^\circ$)، $20hPa$ (pa = مقایسه شده است (جندریتسکی و همکاران، ۲۰۱۲؛ شین و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین در شاخص UTCI از مدل انتقال گرمایی پیشنهاد شده توسط فیلا و همکاران (۲۰۱۲) استفاده شده است. یک معادله رگرسیونی بر اساس UTCI محاسبه شده توسط مدل اصلی پیشنهاد شده است که از این رابطه می‌توان در شرایط مختلف محیطی برای محاسبه شاخص UTCI استفاده کرد (بروده و همکاران، ۲۰۱۲). این رابطه رگرسیون منجر به برآورد دقیق شاخص UTCI با هزینه محاسباتی کم‌تر می‌شود. بر این اساس شاخص UTCI را می‌توان به صورت رابطه (۲) بیان کرد.

$$UTCI = T_a + offset(T_a, T_{mrt}, U_{wind}, P_{vapour}) \quad (2)$$

در رابطه بالا T_a ، دمای هوای محیطی، T_{mrt} میانگین دمای تابشی، U_{wind} تندی باد و P_{vapour} فشار بخار آب است. این رابطه دمای هوا در محدوده ۵۰- درجه سانتی‌گراد تا ۵۰+ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی از ۰ تا ۱۰۰ درصد و تندی باد حداقل ۰/۵ و حداکثر ۱۷ متر بر ثانیه را می‌تواند بکار گیرد. همچنین تفاوت بین T_a و T_{mrt} از ۳۰- درجه سانتی‌گراد تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد است. در محاسبه UTCI از تندی باد در ۱۰ متر بالاتر از سطح زمین استفاده می‌شود؛ بنابراین، UTCI را می‌توان به راحتی بر اساس داده‌های مشاهداتی از ایستگاه‌های هواشناسی استاندارد، داده‌های بازتحلیل و برون‌داد مدل‌های تغییر اقلیم مورد استفاده قرار داد (جندریتسکی و همکاران، ۲۰۱۲). خروجی شاخص UTCI در ده طبقه قرار می‌گیرد که در جدول (۱) ارائه شده است.

IWM کارایی مدل را به شکل قابل توجهی نسبت به مدل‌های منفرد افزایش می‌دهد. در این پژوهش نیز برای تولید چند مدلی همادی (MME) از مدل‌های CMIP6 (CMIP6-MME) از روش استفاده شد که شرح آن توسط بای و همکاران (۲۰۲۱) و زرین و داداشی‌رودباری (۱۴۰۰) ارائه شده است. این روش همانند رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$\sum_{j=1}^J (\mu_e^j - y^j)^2 \text{ where } \mu_e^j = w^T x^j = \sum_{k=1}^K w_k x_k^j \quad (1)$$

در رابطه (۱) $(1, \dots, j, \dots, J)$ گام‌های زمانی مقادیر روزانه متغیر مدنظر و $(1, \dots, k, \dots, K)$ GCM های منتخب در این مطالعه هستند μ_e^j . مقدار متغیر همادی شده مدل‌های چندگانه و j_{th} گام زمانی مدل و y^j نشان‌دهنده گام زمانی داده مشاهداتی است. w وزن هر مدل از مدل‌های همادی و در نهایت x^j ضریب مدل در ترکیب خطی است (بیشاپ و ابراموویتز، ۲۰۱۳؛ بای و همکاران، ۲۰۲۱).

۶-۲ درست‌سنجی برون‌داد مدل‌های CMIP6

برای درست‌سنجی برون‌داد مدل‌های مورد بررسی و مدل همادی تولید شده از نمودار تیلور (تیلور، ۲۰۰۱) استفاده شد. نمودار تیلور برای تعیین کمیت درجه مطابقت بین شبیه‌سازی مدل و مشاهدات استفاده شد. این نمودار الگوهای اقلیم‌شناسی میانگین دما، رطوبت نسبی و تندی باد طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) را در برابر داده‌های ایستگاهی در نظر می‌گیرد و از ضرایب همبستگی فضایی، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و نسبت انحرافات استاندارد (SD) استفاده می‌کند. هنگامی که ضریب همبستگی و انحراف استاندارد نزدیک به یک و RMSE نزدیک به صفر باشد، بهترین تطابق بین داده‌های مشاهداتی و مدل را نشان می‌دهد.

۷-۲ شاخص جهانی اقلیم-گرمایی (UTCI)

شاخص UTCI به «دمای هوای هم‌دما (Isothermal) در

جدول ۱. طبقه‌بندی تنش حرارتی بر اساس شاخص UTCI (برده و همکاران، ۲۰۱۲).

نوع تنش گرمایی	UTCI (°C)	نوع تنش گرمایی	UTCI (°C)
تنش گرمایی خفیف	۹-۰	عدم تنش گرمایی	۲۶-۹
تنش گرمایی متوسط	(۰) - (-۱۳)	تنش گرمایی متوسط	۳۲-۲۶
تنش گرمایی قوی	(-۱۳) - (-۲۷)	تنش گرمایی قوی	۳۸-۳۲
تنش گرمایی خیلی قوی	(-۲۷) - (-۴۰)	تنش گرمایی خیلی قوی	۴۶-۳۸
تنش گرمایی بی‌نهایت قوی	<(-۴۰)	تنش گرمایی بی‌نهایت قوی	>۴۶

۲-۸ تحلیل‌های آماری

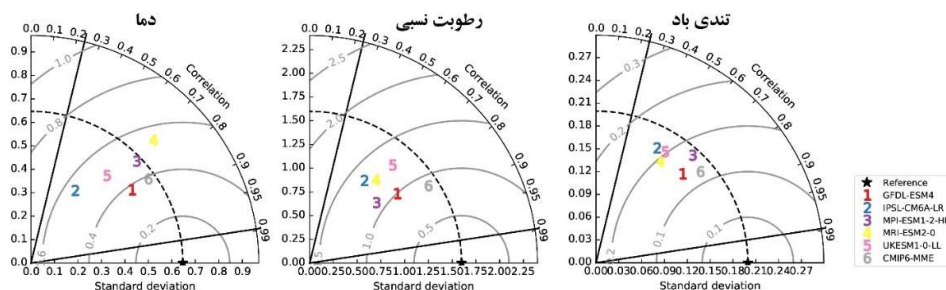
این مطالعه از برآوردگر شیب سن (SSE) برای تعیین بزرگی روند شاخص UTCI استفاده شد. آزمون SSE در برابر مقادیر پرت و داده‌های مفقود در یک سری زمانی بسیار کارآمد است. علاوه بر این، این روش به شکست‌های ناگهانی در یک سری زمانی حساسیت کمتری دارد و نیازی به نرمال‌سازی داده‌ها ندارد (خان و همکاران، ۲۰۱۹).

۳ نتایج و بحث

۳-۱ درستی سنجی برون‌داد مدل‌های CMIP6

شکل (۲) نمودارهای تیلور مدل‌های منفرد و مدل همادی تولید شده CMIP6 را در برابر مشاهدات برای سه متغیر دما، رطوبت نسبی و تندی باد نشان می‌دهد. تمامی مدل‌ها برای سه متغیر مورد بررسی همبستگی بیش‌تر از ۰/۵ را نشان می‌دهند که بیانگر کارایی مناسب مدل‌ها در شبیه‌سازی الگوهای فضایی میانگین‌های بلندمدت دما، رطوبت نسبی و تندی باد سالانه در طول دوره مورد بررسی است. مقدار انحراف معیار تمامی مدل‌ها و حتی مدل همادی تولید شده

برای دو متغیر رطوبت نسبی و تندی باد کمتر از داده‌های مشاهداتی است. این در حالی است که برای متغیر دما انحراف معیار مدل MRI-ESM2-0 بیش‌تر از داده‌های مشاهداتی در ایران است. به‌طور کلی مدل IPSL-CM6A-LR پایین‌ترین کارایی را برای هر سه متغیر مورد بررسی در ایران ارائه داده است و در مقابل، مدل‌های GFDL-CM4 و MPI-ESM1-2-HR بالاترین کارایی را برای دما، رطوبت نسبی و تندی باد در ایران ارائه داده‌اند. در مقایسه با نتیجه تک مدلی، چند مدلی همادی تولید شده (CMIP6-MME) به‌طور کلی در شبیه‌سازی فضایی دما، رطوبت نسبی و تندی باد سالانه کارایی بالاتری دارد. کارایی بالاتر مدل همادی CMIP6 نسبت به مدل‌های منفرد در پژوهش‌های بسیاری در مناطق مختلف همچون کل کره زمین (ونر و همکاران، ۲۰۲۰)، فلات تبت (کوی و همکاران، ۲۰۲۱)، چین (یو و همکاران، ۲۰۲۱) و ایران (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰) مورد تأیید قرار گرفته است.



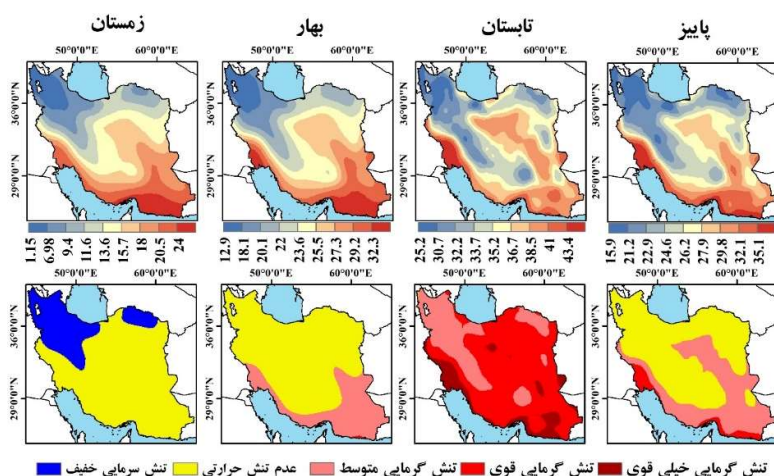
شکل ۲. نمودارهای تیلور مقایسه میانگین دما، رطوبت نسبی و تندی باد سالانه بین مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی تولید شده (CMIP6-MME) و داده‌های مشاهداتی (ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی) را در ایران طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۴ نشان می‌دهد.

۳-۲ وردایی شاخص UTCI طی دوره تاریخی در

ایران

پراکنش فصلی تنش گرمایی در ایران تغییرات زیادی را نشان می‌دهد. شاخص UTCI از تنش سرمایی خفیف در فصل زمستان تا تنش گرمایی خیلی قوی در فصل تابستان تغییر کرده است و از ۱۰ طبقه تنش گرمایی، پنج طبقه آن طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) در فصول مختلف در کشور دیده می‌شود. تنش گرمایی در تمامی فصول از شمال به جنوب در ایران روند افزایشی دارد. بیشینه شاخص UTCI از جنوب شرقی تا جنوب غربی ایران به ترتیب با مقادیر ۲۴، ۳۲/۳، ۴۳/۴ و ۳۵/۱ درجه سانتی‌گراد در فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز دیده می‌شود (شکل ۳). به‌طور کلی بالاتر از مدار ۳۵ درجه شمالی در فصول زمستان، بهار و پاییز هیچ‌گونه تنش گرمایی در کشور دیده نمی‌شود. تنش سرمایی فقط در دسته خفیف در فصل زمستان در شمال‌غرب و مناطق مرتفع شمال‌شرق ایران در استان خراسان شمالی دیده می‌شود. این طبقه ۲۴/۵۲ درصد از مساحت کشور را در بر گرفته است. در فصل بهار با افزایش دما در هیچ بخشی از ایران تنش سرمایی دیده نمی‌شود در این فصل سه چهارم از مناطق کشور (۷۵/۰۳ درصد) تنش

گرمایی ندارند. مناطقی با تنش گرمایی متوسط در این فصل حدود یک چهارم باقیمانده مساحت کشور (۲۴/۹۷ درصد) را در سواحل جنوبی و جنوب شرق ایران در بر می‌گیرد. در فصل تابستان تنش گرمایی متوسط به ارتفاعات ایران در شمال‌غرب، ارتفاعات شمال‌شرق، پهنه زاگرس و ارتفاعات کرمان محدود می‌شود که ۲۶/۸۵ درصد از مساحت کشور را در بر گرفته است. تنش گرمایی قوی در فصل تابستان در بیش از نیمی از مناطق کشور (۵۲/۸۵ درصد) دیده می‌شود (شکل ۶). در این فصل از سال، تنش گرمایی خیلی قوی عمدتاً در جنوب شرقی ایران در سواحل مکران، تنگه هرمز، سواحل خلیج فارس، جنوب غربی کشور و دشت لوت دیده می‌شود این مناطق یک پنجم (۲۰/۱۸ درصد) از مساحت کشور را در بر گرفته‌اند. در فصل پاییز با کاهش دما تنش گرمایی نیز در ایران به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این فصل ۶۱/۵۸ درصد از کشور تنش گرمایی ندارند و مناطقی با تنش گرمایی قوی به سواحل مکران در جنوب شرق و جنوب غربی ایران محدود می‌شوند که حدود ۵ درصد از مساحت کشور (۴/۹۶ درصد) را در بر گرفته‌اند (شکل ۳).



شکل ۳. برون‌داد شاخص UTCI طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) مبتنی بر برون‌داد CMIP6-MME.

تحت سناریو SSP2-4.5، ۱/۲۷ درصد از کشور را در بر می‌گیرد. این در حالی است که مناطقی با تنش گرمایی متوسط در همین دوره تحت سناریو SSP5-8.5 به ۱۰/۸۵ درصد می‌رسد که بیشتر در مناطق جنوب شرقی و جنوب غربی ایران دیده می‌شود.

افزایش بی‌سابقه تنش گرمایی به‌خصوص در فصول سرد سال برای حیات رودهای پر آب ایران همانند کارون، کرخه و زاینده‌رود بسیار مهم است که می‌تواند تهدیدات مهمی را برای انرژی (برق آبی)، کشاورزی و مدیریت منابع آب ایران به همراه داشته باشد. مطالعات انجام شده در سطح جهانی (پیین و همکاران، ۲۰۱۵) و همچنین در سطح منطقه-ای (برای مثال فلات تبت، یو و همکاران، ۲۰۱۸) نشان دادند که ارتفاعات با سرعت بیشتری نسبت به میانگین جهانی گرم می‌شوند. در همین راستا فلاح قاهری و همکاران (۲۰۱۹) و زرین و داداشی رودباری (۱۳۹۹) افزایش بیش‌تر دما در مناطق مرتفع غرب و شمال‌غرب ایران تا پایان قرن را گزارش کردند.

در فصل بهار با افزایش دما، تنش گرمایی نیز افزایشی قابل توجه خواهد داشت. همان‌طور که انتظار می‌رفت، پیش‌نگری‌های اقلیمی حاکی از روند افزایشی قابل توجه تنش گرمایی در ایران است. همانند فصل زمستان در فصل بهار نیز بیشینه بی‌هنجاری شاخص UTCI در مناطق مرتفع ایران به‌خصوص در شمال‌غربی ایران دیده می‌شود. مناطق داخلی، جنوب‌شرق و شرق ایران به همراه بخش‌های کوچکی از شمال‌شرقی ایران کمینه بی‌هنجاری افزایشی شاخص UTCI را طی دوره آینده نشان می‌دهند. پس از مناطق شمال‌غرب، غرب و پهنه زاگرس، سواحل جنوبی ایران به‌خصوص در سواحل خلیج فارس شاخص UTCI طی دوره آینده میانی و آینده دور تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 افزایشی بیش از ۳ درجه سانتی‌گراد را تجربه خواهند کرد. روند افزایشی این شاخص در مناطق ساحلی خلیج فارس می‌تواند شاخص

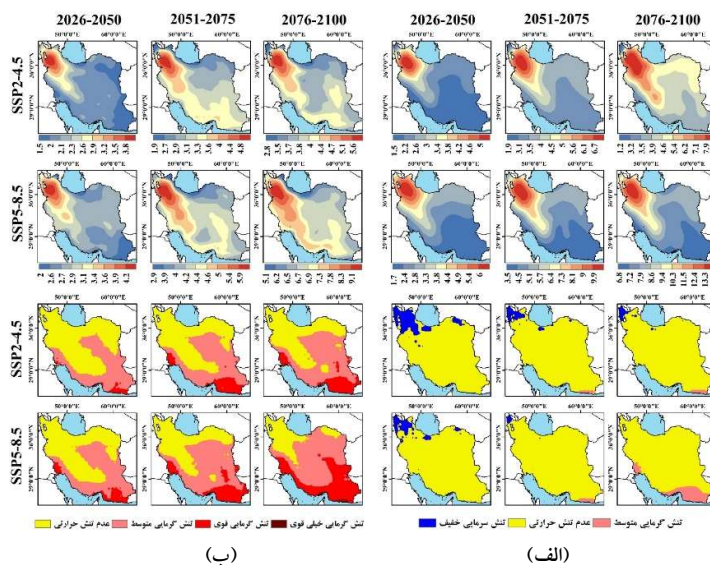
۳-۳ پیش‌نگری شاخص UTCI با مدل CMIP6-MME در ایران تحت سناریوهای SSP

پراکنش فضایی بی‌هنجاری شاخص UTCI افزایش قابل توجهی از تنش گرمایی را در فصل زمستان نشان می‌دهد (شکل ۴). بالاترین مقدار بی‌هنجاری را می‌توان در بخش‌های کوهستانی شمال‌غربی و غرب مشاهده کرد. این بی‌هنجاری مثبت تحت سناریو SSP5-8.5 طی دوره آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) به ۱۳/۳ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. روند افزایشی شدید تنش گرمایی در این مناطق را می‌توان به گرمایش وابسته به ارتفاع نسبت داد (پیین و همکاران ۲۰۱۵). بخش‌های شمالی، شمال‌شرق و مرکزی نیز افزایش زیادی را در شاخص تنش گرمایی تجربه کرده‌اند (شکل ۴). به‌طور کلی، بزرگی و پراکنش فضایی بی‌هنجاری تنش گرمایی در ایران برای مناطق سردسیر و با عرض‌های جغرافیایی بالاتر بیش‌تر از مناطق گرمسیر و با عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر است. بیشینه بی‌هنجاری شاخص UTCI تحت سناریو SSP2-4.5 و ۷/۹ تحت سناریوی SSP5-8.5، ۱۳/۳ درجه سانتی‌گراد به دست آمده است. در مقابل کمینه بی‌هنجاری مثبت در ایران در مناطق جنوبی و خشک داخلی اتفاق افتاده است. این نتیجه به روشنی نشان می‌دهد که تنش گرمایی ایران در مناطق کوهستانی و در عرض‌های جغرافیایی بالاتر بیشتر از مناطق پست داخلی و در عرض جغرافیایی پایین‌تر است.

تنش سرمایی خفیف در ایران تا پایان قرن حاضر تقریباً از بین خواهد رفت (رنگ آبی در شکل ۴). طی دوره آینده دور و تحت سناریوی SSP5-8.5 مناطقی با تنش سرمایی خفیف به ۰/۰۷ درصد خواهد رسید. در مقابل پهنه‌های بدون تنش گرمایی در ایران روند افزایشی خواهند داشت. در پایان قرن حاضر ۹۶/۸۲ درصد از مساحت کشور تحت سناریوی حد واسط و ۸۹/۰۶ درصد از آن تحت سناریو خیلی بدبینانه تنش گرمایی نخواهند داشت. بر اساس نتایج به دست آمده مناطقی با تنش گرمایی متوسط در آینده دور

(شکل ۴). همان‌طور که پیداست مناطقی با تنش گرمایی متوسط در آینده نزدیک تحت سناریو (SSP2-4.5)، ۲/۵۹ درصد از مناطق کشور را در بر خواهد گرفت. هر چه که به دوره پایانی قرن نزدیک‌تر می‌شویم بر وسعت پهنه‌هایی با تنش گرمایی قوی در ایران افزوده می‌شود. طی دوره آینده دور، تحت سناریوی SSP5-8.5 تقریباً یک سوم از کشور دارای تنش گرمایی قوی (۲۹/۱۱ درصد) خواهند بود. در فصل تابستان به دلیل حضور مداوم سامانه پرفشار جنب حاره، منجر به ایجاد دماهای بسیار گرم می‌شود. گرم‌ترین ماه‌های سال در ایران بر اساس تقویم رسمی کشور ماه‌های تیر و مرداد است. همگام با افزایش دما در این فصل تنش‌های گرمایی نیز بر کشور سیطره کامل دارند. مناطقی با عدم تنش حرارتی که دوره تاریخی تنها ۰/۱ درصد از مناطق کشور دیده می‌شود طی دوره پیش‌نگری تحت هیچ یک از دو سناریو مورد بررسی دیده نخواهد شد. بی‌هنجاری شاخص UTCI در کل دوره‌ها و سناریوها در ایران افزایشی است. بیشینه افزایش همان‌طور که در فصول

شدت شرحی را افزایش دهد. بالاترین پهنه از نبود تنش گرمایی در ایران با ۷۵/۰۳ درصد طی دوره تاریخی مشاهده می‌شود. این مقدار تحت شرایط تغییر اقلیم آینده برای دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 دستخوش تغییرات جدی خواهد شد. در دوره آینده دور تحت سناریو SSP5-8.5، مساحت مناطقی از کشور که تنش گرمایی ندارند به ۲۱/۸۲ درصد خواهد رسید که نشان دهنده افزایش قابل توجه دما در کشور است (شکل ۶). تنش گرمایی متوسط (۲۴/۸۰ درصد)، دومین طبقه از شاخص UTCI است که در فصل بهار در ایران غالب است. این مقدار تا پایان قرن در ایران به حدود ۵۰ درصد نیز خواهد رسید (تحت سناریو SSP5-8.5 طی دوره آینده دور به ۴۸/۲۳ درصد می‌رسد). از منظر پراکنش جغرافیایی مناطقی با تنش گرمایی متوسط، در پایین‌تر از مدار ۳۶ درجه شمالی دیده می‌شوند. تنش گرمایی قوی در ایران طی دوره تاریخی تقریباً وجود نداشته است (۰/۱۶ درصد)؛ اما این پهنه تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نتایج جالب توجهی را نشان داده است

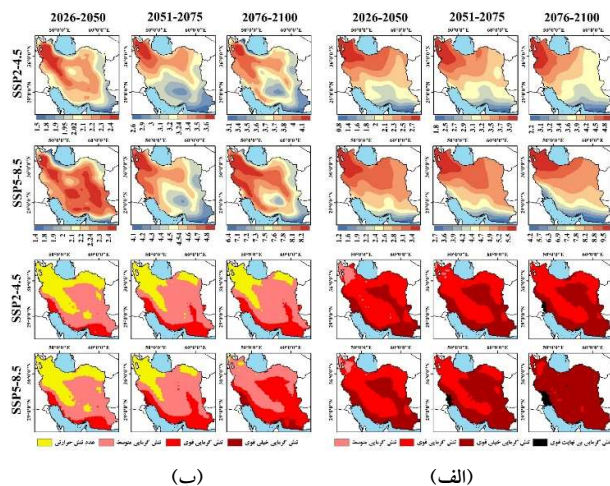


شکل ۴. شاخص UTCI طی دوره پیش‌نگری مبتنی بر پرونداد CMIP6-MME تحت سناریوهای SSP؛ (الف) فصل زمستان، (ب) فصل بهار طی دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور؛ دو ردیف بالا بی‌هنجاری شاخص UTCI و دو ردیف پایین نوع تنش گرمایی را نشان می‌دهند.

قوی در ۵۰/۱۹ درصد از کشور و در آینده دور تحت سناریو SSP5-8.5 در ۹۲/۱۰ درصد از مناطق کشور دیده می‌شود. در فصل تابستان طی دوره‌های آینده میانی و دور یک پهنه تنش گرمایی جدید نیز در کشور اضافه خواهد شد. پهنه تنش گرمایی بی‌نهایت قوی تحت سناریو SSP2-4.5 در ۴.۵ درصد از آینده میانی در ۰/۰۵ درصد و در آینده دور تحت همین سناریو در ۱/۱۴ درصد از مساحت کشور دیده می‌شود. به همین ترتیب تحت سناریو SSP5-8.5 طی دوره‌های آینده میانی و دور نیز پهنه‌هایی با تنش گرمایی بی‌نهایت قوی به ترتیب ۱/۳۹ درصد و ۳/۷۱ درصد از مساحت کشور را در مناطق جنوب غربی واقع در استان خوزستان به خود اختصاص می‌دهند.

این نتایج از تنش‌های گرمایی در فصل تابستان در ایران نشان از افزایش قابل ملاحظه دما و فراوانی بیش‌تر رخداد امواج گرمایی و با طول دوره بیش‌تر دارد. در همین راستا ایم و همکاران (۲۰۱۷) نیز با بررسی امواج گرمایی کشورهای آسیایی به این نتیجه رسیدند که در پایان قرن حاضر رخداد امواج گرمایی هر ۱۰ تا ۲۰ روز یک بار اتفاق خواهد افتاد و شهرهای ساحلی جنوب ایران، دوی، ابوظبی

بهار و زمستان دیده شد، در این فصل نیز در شمال غربی ایران و مناطقی با عرض جغرافیایی بالا دیده می‌شود. این در حالی است که کمینه بی‌هنجاری افزایشی شاخص UTCI در مناطق جنوبی ایران دیده می‌شود. بی‌هنجاری شاخص UTCI در ایران بین حداقل ۰/۸ درجه سانتی‌گراد تا حداکثر ۹/۵ درجه سانتی‌گراد به دست آمده است. مناطقی با تنش گرمایی متوسط در پایان قرن تقریباً تحت هر دو سناریو در ایران از بین خواهند رفت. تحت سناریو SSP5-8.5 تنش گرمایی خیلی قوی، پهنه غالب تنش گرمایی ایران خواهد شد. به طوری که از چابهار تا خوی و از سنندج تا بیرجند شاهد تنش گرمایی خیلی قوی خواهیم بود. همان‌طور که در شکل (۵) نیز دیده می‌شود مناطقی با تنش گرمایی متوسط و حتی قوی از آینده نزدیک تا آینده دور روند کاهشی دارند. در مقابل مناطقی با تنش گرمایی خیلی قوی روند افزایشی خواهند داشت. طی دوره تاریخی مناطقی با تنش گرمایی خیلی قوی در یک پنجم از مساحت کشور دیده می‌شود. این حالی است که طی دوره‌های آینده این شاخص رشد چشمگیری را خواهد داشت. در آینده دور تحت سناریوی SSP2-4.5 مناطقی با تنش گرمایی خیلی

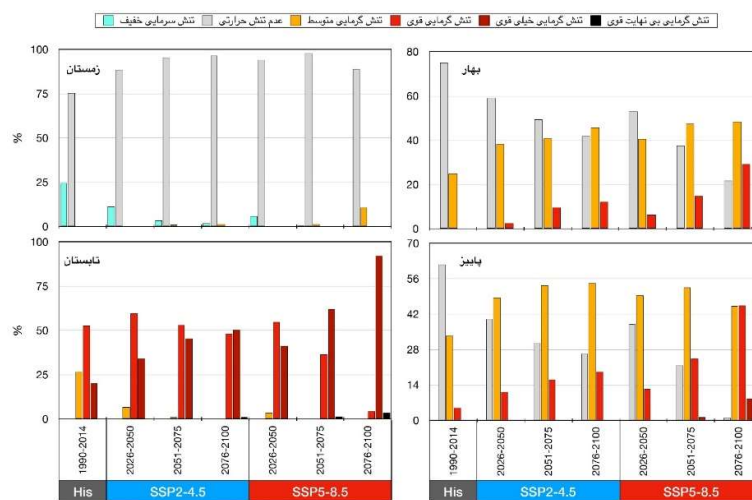


شکل ۵. شاخص UTCI طی دوره پیش‌نگری مبتنی بر برون‌داد CMIP6-MME تحت سناریوهای SSP: (الف) فصل تابستان، (ب) فصل پاییز طی دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور دو ردیف بالا بی‌هنجاری شاخص UTCI و دو ردیف پایین نوع تنش گرمایی را نشان می‌دهند.

بالاتر بیشینه بی‌هنجاری تنش گرمایی را در ایران نشان داده- اند. کمینه بی‌هنجاری افزایشی شاخص UTCI نیز همانند فصل پیشین در جنوب شرقی و مناطق شرقی ایران دیده می- شود. پهنه‌های کوهستانی ایران طی فصل پاییز تنش گرمایی ندارند و هر چه به دوره‌های پایانی قرن حاضر نزدیک می- شویم از وسعت مناطقی با نبود تنش گرمایی کاسته خواهد شد. طی دوره آینده دور مناطقی با نبود تنش گرمایی تحت سناریو SSP5-8.5 تنها یک درصد از مساحت کشور را در شمال غرب در بر می‌گیرد. همگام با روند کاهش پهنه‌هایی با نبود تنش گرمایی، پهنه‌های با تنش گرمایی متوسط و قوی در ایران روند افزایشی خواهند داشت. همانند فصل تابستان در فصل پاییز نیز یک پهنه به پهنه‌هایی با تنش گرمایی طی دوره‌های آینده افزوده خواهد شد. پهنه تنش گرمایی خیلی قوی تحت سناریوی SSP5-8.5 در دوره‌های آینده میانی (۱/۱۵ درصد) و آینده دور (۸/۵۵ درصد) در سواحل مکران و جنوب غربی ایران شکل می‌گیرند. بررسی درصد پهنه‌های با تنش گرمایی مختلف بر اساس شاخص UTCI طی دوره تاریخی و دوره‌های آینده در

و دوحه از جمله مناطقی خواهند بود که بیش‌ترین تأثیر را خواهند پذیرفت. همچنین آن‌ها نشان دادند دمای حباب مرطوب (TW) در تابستان ۲۰۱۵ در بندر ماهشهر ایران، سواحل خلیج فارس و کشور عربستان سعودی، به نزدیک ۳۵ درجه سانتی‌گراد رسید که نشان می‌دهد این آستانه زودتر از شرایط پیش‌نگری عبور کرده است (شر و همکاران، ۲۰۱۷). نتایج به‌دست آمده در این پژوهش حاکی از افزایش تنش‌های گرمایی ایران در سال‌های پیش‌رو است که نتایج پژوهش‌های پیشین (شر و همکاران، ۲۰۱۶؛ ایم و همکاران، ۲۰۱۷) را تأیید می‌نماید.

فصل پاییز همانند سایر فصول بی‌هنجاری افزایشی را برای تنش گرمایی ایران نشان داده است. کمینه بی‌هنجاری مثبت شاخص UTCI در فصل پاییز در تمام دوره‌ها و سناریوها بیش‌تر از فصل تابستان است. در این فصل بی‌هنجاری شاخص UTCI بین حداقل ۱/۵ درجه سانتی‌گراد تا حداکثر ۸/۲ درجه سانتی‌گراد در نوسان است. شمال غربی ایران، مناطق مرتفع و عرض‌های جغرافیایی



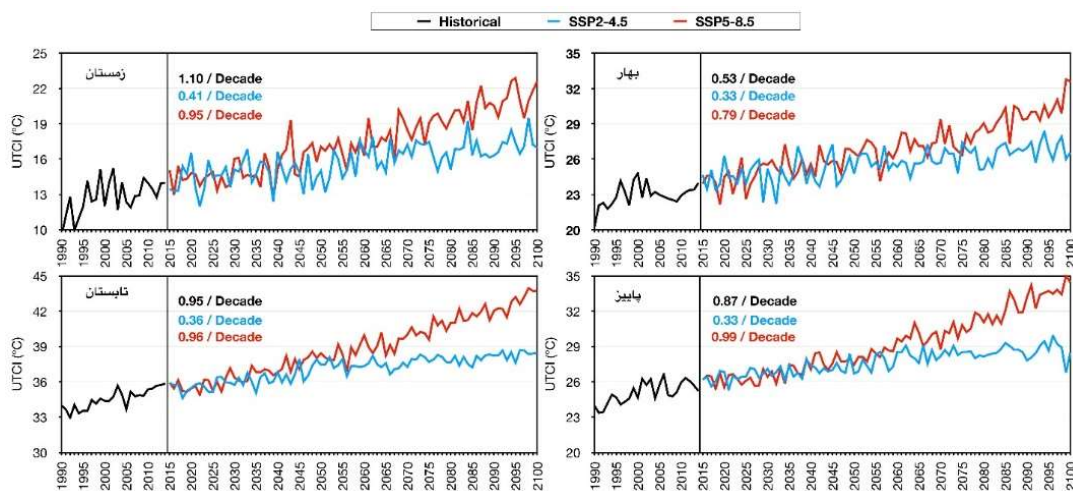
شکل ۶. درصد پهنه‌هایی با تنش گرمایی مبتنی بر برونداد شاخص UTCI در ایران تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 طی دوره‌های آینده نزدیک،

آینده میانی و آینده دور با مدل CMIP6-MME.

دوره مورد بررسی هم در دوره تاریخی و هم تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان می‌دهد (شکل ۷). بررسی روند شاخص UTCI طی دوره تاریخی نشان داد که این شاخص از ابتدای دهه ۲۰۰۰ میلادی با شیب تندی افزایش یافته است. در همین راستا سازمان هواشناسی جهانی (WMO) دو دهه گذشته (۲۰۲۰-۲۰۰۱) را به عنوان گرم‌ترین دهه‌های تاریخ جهان معاصر (از زمانی که داده ثبت شده است) گزارش کرده است (WMO, ۲۰۲۱). بر اساس آمارهای سازمان هواشناسی کشور سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۴، ۱۳۹۷، ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ گرم‌ترین تابستان‌ها و به عبارتی گرم‌ترین سال‌های ایران بوده‌اند. توزیع زمانی پیش‌نگری شاخص UTCI افزایش غیرعادی را از میانه قرن حاضر (۲۰۵۵) به بعد نشان می‌دهد که اوج اثر گرمایش جهانی بر تنش گرمایی و رخداد فرین‌های دمایی را در ایران برجسته می‌کند. همان‌طور که گفته شد روند فصلی شاخص UTCI از میانه قرن حاضر به بعد نشان‌دهنده تغییر به سمت اقلیمی گرم‌تر برای یک دوره طولانی در ایران است.

ایران نشان از افزایش قابل توجه پهنه‌هایی با تنش گرمایی متوسط تا خیلی قوی است (شکل ۶). همان‌طور که انتظار می‌رود هر چه به پایان قرن حاضر نزدیک‌تر می‌شویم بر وسعت پهنه‌هایی با تنش گرمایی قوی تا بی‌نهایت قوی در ایران افزوده می‌شود. این در حالی است که تنش‌های سرمایی خفیف و نبود تنش گرمایی در ایران روند کاهشی خواهند داشت. این تغییرات آماری برای تنش گرمایی متوسط و قوی نیز دیده می‌شود. این دو پهنه نیز در ایران روند کاهشی دارند و جای خود را بسته به فصل با پهنه بعدی خود تغییر می‌دهند (تنش گرمایی متوسط به تنش گرمایی قوی، تنش گرمایی قوی به خیلی قوی و خیلی قوی به بی‌نهایت قوی). این رفتار از شاخص UTCI را به راحتی می‌توان در فصل تابستان دید.

۳-۴ متوسط پهنه‌ای روند شاخص UTCI با مدل CMIP6-MME
روندهای فصلی شاخص UTCI افزایش خطی را در طول



شکل ۷. روند شاخص UTCI در متوسط پهنه‌ای ایران طی دوره تاریخی و پیش‌نگری تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مبتنی بر برونداد CMIP6-MME؛ اعداد داخل نمودار معرف شیب روند در دهه است.

۴ نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر تغییرات تاریخی و آینده تنش گرمایی در ایران را با شاخص UTCI طی سال‌های ۱۹۹۰-۲۱۰۰ بررسی کرده است. برای این منظور پنج مدل شامل GFDL-EFM2-3-0، MPI-ESM1-2-HR، IPSL-CM6A-LR، ESM4-MR و MRI-ESM2-0 از سری مدل‌های CMIP6 انتخاب شدند. سپس یک مدل همادی از این پنج مدل با روش میانگین وزنی مستقل (IWM) تولید شد. هر سه متغیر دما، رطوبت نسبی و تندی باد سالانه همبستگی فضایی بالاتر از ۰/۵ را بین مدل‌های منفرد و همادی چند مدلی CMIP6-MME از یکسو و داده‌های مشاهداتی از سوی دیگر ارائه داده‌اند. به‌طور کلی، مدل‌های تصحیح شده اریبی CMIP6 می‌توانند به خوبی متغیرهای اقلیمی را در ایران برآورد کنند. ذکر این نکته ضروری است که از بین پنج مدل CMIP6، هیچ یک از آن‌ها قادر به شبیه‌سازی همه ویژگی‌های اقلیمی نیستند. همان‌طور که در نمودار تبلور نیز نشان داده شد، یک مدل در برخی متغیرها کارایی خوبی دارد اما ممکن است در متغیرهای دیگر کارایی خوبی نداشته باشد (برای مثال مدل UKESM1-0-LL). علاوه بر این، در توافق با مطالعات قبلی (ونر و همکاران، ۲۰۲۰؛ زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰) چند مدلی همادی از مدل‌های منفرد کارایی بالاتری دارد.

پراکنش فضایی UTCI در ایران را می‌توان به شرایط توپوگرافی پیچیده و اقلیمی آن نسبت داد. اقلیم‌شناسی شاخص UTCI نشان داد که میانگین این شاخص برای فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب ۱۲/۶۶، ۲۲/۸۲، ۳۴/۳۲ و ۲۴/۹۲ درجه سانتی‌گراد است. نتایج این مطالعه افزایش قابل توجهی را در شدت تنش گرمایی ایران نشان داد. بالاترین روند افزایشی شاخص در شمال‌غرب و غرب دیده می‌شود که نشان‌دهنده افزایش بیشتر تنش گرمایی در این مناطق در دوره‌های آینده است. افزایش بیش‌تر دما در شمال‌غرب، غرب و مناطق مرتفع ایران

پیش‌تر تحت مدل‌های CMIP5 (فلاح قاهره و همکاران، ۲۰۱۹) و CMIP6 (زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹) گزارش شده است. از نظر رخداد تنش گرمایی، ایران طی دوره‌های آتی به احتمال زیاد تنش‌های گرمایی شدیدتر با اثرات نامطلوب قابل توجهی بر سلامت انسان را تجربه خواهد کرد.

نتایج کلی نشان دهنده روند سراسر افزایشی تنش گرمایی در ایران است. بیشترین افزایش بی‌هنجاری تنش گرمایی (۳/۱۳ درجه سانتی‌گراد در فصل زمستان طی دوره آینده دور تحت سناریو SSP5-8.5) را می‌توان در شمال-غرب و غرب کشور یافت. همان‌طور که گفته شد شدت فزاینده تنش گرمایی در بخش‌های غربی و شمال‌غربی ایران را می‌توان با گرمایش وابسته به ارتفاع (پیین و همکاران، ۲۰۱۵) مرتبط دانست.

مناطق جنوبی، جنوب‌غربی و جنوب شرقی کشور دارای اقلیم گرم است که در مجاورت خلیج فارس و دریای عمان قرار دارند که به عنوان منبع رطوبت و بخار آب عمل می‌کنند. این شرایط به‌خصوص در طول رخداد امواج گرمایی در سواحل جنوبی ایران رطوبت بالا برای چند روز متوالی ایجاد خواهد کرد که منجر به شکل‌گیری شرایط بسیار مرطوب و گرم خواهد شد. ترابرد رطوبت از این منابع به مناطق ساحلی منجر به ایجاد شرایط گرم و مرطوب بر روی کمربند ساحلی جنوب شده که باعث ایجاد تنش گرمایی قابل توجهی می‌شود. افزایش توأمان دو متغیر دما و رطوبت نسبی تنش گرمایی را در ایران تا پایان قرن به اوج خود می‌رساند. تحت سناریوی SSP5-8.5 در دوره آینده دور پهنه‌هایی با تنش گرمایی بی‌نهایت قوی، ۳/۷۱ درصد از مساحت کشور در جنوب‌غربی را به خود اختصاص خواهد داد. افزایش قابل توجه امواج گرمایی در ایران توسط زرین و همکاران (۲۰۲۱) نیز با کاربست مدل همادی CMIP5 گزارش شده است. همچنین شر و همکاران (۲۰۱۷) نیز افزایش قابل توجه تنش گرمایی را در شهرهای

نظری پور، ح.، طاوسی، ت.، ۱۴۰۰، ارزیابی آسایش حرارتی فضای باز همگانی با تأکید بر تقویت مناسبات اجتماعی در محله‌های شهری (مطالعه موردی: کوی قدس، زاهدان): جغرافیای اجتماعی شهری، ۸(۱)، ۲۸۷-۳۰۶.

- Bai, H., Xiao, D., Wang, B., Liu, D. L., Feng, P., & Tang, J., 2021, Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China Plain: *International Journal of Climatology*, **41**, E171-E186.
- Bishop, C. H., & Abramowitz, G., 2013, Climate model dependence and the replicate Earth paradigm: *Climate dynamics*, **41**(3-4), 885-900.
- Błażejczyk, K., 2021, UTCI—10 years of applications: *International Journal of Biometeorology*, **65**(9), 1461-1462.
- Blażejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., & Tinz, B., 2012, Comparison of UTCI to selected thermal indices: *International journal of biometeorology*, **56**(3), 515-535.
- Bridger, R., 2008, *Introduction to ergonomics*: Crc Press.
- Bröde, P., Krüger, E. L., Rossi, F. A., & Fiala, D., 2012, Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI—a case study in Southern Brazil: *International journal of biometeorology*, **56**(3), 471-480.
- Burton, I., Ebi, K. L., & McGregor, G., 2009, Biometeorology for adaptation to climate variability and change: In *Biometeorology for adaptation to climate variability and change* (pp. 1-5). Springer, Dordrecht.
- Buzan, J. R., & Huber, M., 2020, Moist heat stress on a hotter Earth: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **48**(1).
- Cui, T., Li, C., & Tian, F., 2021, Evaluation of temperature and precipitation simulations in CMIP6 models over the Tibetan Plateau: *Earth and Space Science*, **8**(7), e2020EA001620.
- Eyring, V., Cox, P. M., Flato, G. M., Gleckler, P. J., Abramowitz, G., Caldwell, P., ... & Williamson, M. S., 2019, Taking climate model evaluation to the next level: *Nature Climate Change*, **9**(2), 102-110.
- Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F., & Dadashi-Roudbari, A., 2019, Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran: *Theoretical and Applied Climatology*, **138**(3-4), 1539-1562.

ساحلی جنوب ایران، دویی، ابوظبی و دوحه تا پایان قرن حاضر گزارش کرده‌اند. این تحقیق نتایج به دست آمده توسط شر و همکاران (۲۰۱۷) و زرین و همکاران (۲۰۲۱) را تأیید می‌نماید.

افزایش دما طی دوره‌های آینده و طولانی شدن دوره مرطوب و گرم خطرات بالقوه‌ای را برای مردم محلی و مسافران را به صورت گرم‌زدگی و بیماری‌های بهداشتی به دلیل تنش گرمایی ایجاد می‌کند که لازم است مورد توجه برنامه‌ریزان و مسئولان کشور قرار گیرد. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش دانش بالقوه‌ای را برای سیاست‌گذاران برای طراحی استراتژی‌های سازگار با تغییر اقلیم در ایران فراهم می‌کند.

منابع

- زرین، آ.، داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۹، پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6): فیزیک زمین و فضا، **۴۶**(۳)، ۵۸۳-۶۰۲.
- زرین، آ.، داداشی رودباری، ع.، ۱۴۰۰، پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران مبتنی بر برون‌داد همادی مدل‌های تصحیح شده اریبی CMIP6: فیزیک زمین و فضا، **۴۷**(۳)، ۵۶۱-۵۷۸.
- زرین، آ.، داداشی رودباری، ع.، کدخدای، ا.، ۱۴۰۱، پیش‌نگری خشکسالی تحت سناریوهای SSP تا پایان قرن بیست و یکم، مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه: تحقیقات آب و خاک ایران. پذیرفته شده برای انتشار.
- فتاحی، ک.، نصراللهی، ن.، انصاری منش، م.، خداکریمی، ج.، عمرانی پور، ع.، ۱۴۰۰، مقایسه محدوده آسایش حرارتی باغ فین و بافت تاریخی کاشان: نقش جهان - مطالعات نظری و فناوری‌های نوین معماری و شهرسازی، **۱۱**(۱)، ۶۳-۵۳.

- Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., & Jendritzky, G., 2012, UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation: *International journal of biometeorology*, **56**(3), 429-441.
- Hong, J., Agustin, W., Yoon, S., & Park, J. S., 2022, Changes of extreme precipitation in the Philippines, projected from the CMIP6 multi-model ensemble: *Weather and Climate Extremes*, **37**, 10048
- Ibrahim, Y., Kershaw, T., Shepherd, P., & Elwy, I., 2021, A parametric optimisation study of urban geometry design to assess outdoor thermal comfort: *Sustainable Cities and Society*, **75**, 103352.
- Im, E. S., Pal, J. S., & Eltahir, E. A., 2017, Deadly heat waves projected in the densely populated agricultural regions of South Asia: *Science advances*, **3**(8), e1603322.
- IPCC, 2021, Climate change 2021: the physical science basis Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report (Cambridge University Press).
- Jendritzky, G., de Dear, R., & Havenith, G., 2012, UTCI—why another thermal index?: *International journal of biometeorology*, **56**(3), 421-428.
- Katavoutas, G., & Founda, D. 2019, Intensification of thermal risk in Mediterranean climates: evidence from the comparison of rational and simple indices: *International journal of biometeorology*, **63**(9), 1251-1264.
- Khan, N., Shahid, S., Ismail, T., Ahmed, K., & Nawaz, N., 2019, Trends in heat wave related indices in Pakistan: *Stochastic environmental research and risk assessment*, **33**(1), 287-302.
- Knutti, R., 2010, The end of model democracy?: *Climatic change*, **102**(3), 395-404.
- Krzyżewska, A., Wereski, S., & Dobek, M., 2021, Summer UTCI variability in Poland in the twenty-first century: *International Journal of Biometeorology*, **65**(9), 1497-1513.
- Kumar, P., & Sharma, A., 2022, Assessing the monthly heat stress risk to society using thermal comfort indices in the hot semi-arid climate of India: *Materials Today: Proceedings*, **61**, 132-137.
- Kumar, R., & Mishra, V., 2020, Increase in population exposure due to dry and wet extremes in India under a warming climate: *Earth's Future*, **8**(12), e2020EF001731.
- Lam, C. K. C., & Lau, K. K. L., 2018, Effect of long-term acclimatization on summer thermal comfort in outdoor spaces: a comparative study between Melbourne and Hong Kong: *International journal of biometeorology*, **62**(7), 1311-1324.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M., 2016, The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6: *Geoscientific Model Development*, **9**(9), 3461-3482.
- Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraer, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., ... & Yang, D. Q., 2015, Elevation-dependent warming in mountain regions of the world: *Nat Clim Change* **5**: 424-430.
- Roshan, G., Almomenin, H. S., da Silveira Hirashima, S. Q., & Attia, S., 2019, Estimate of outdoor thermal comfort zones for different climatic regions of Iran: *Urban Climate*, **27**, 8-23.
- Sadeghi, M., 2022, The Impact of Greenery on Heat-Related Mortality in Sydney, Australia: In *Urban Overheating: Heat Mitigation and the Impact on Health* (pp. 181-195). Springer, Singapore.
- Schär, C. 2016, The worst heat waves to come: *Nature climate change*, **6**(2), 128-129.
- Schwingshackl, C., Sillmann, J., Vicedo-Cabrera, A. M., Sandstad, M., & Aunan, K., 2021, Heat stress indicators in CMIP6: estimating future trends and exceedances of impact-relevant thresholds: *Earth's Future*, **9**(3), e2020EF001885.
- Shin, J. Y., Kang, M., & Kim, K. R., 2022, Outdoor thermal stress changes in South Korea: Increasing inter-annual variability induced by different trends of heat and cold stresses: *Science of The Total Environment*, **805**, 150132.
- Silva, T. J. V., & Hirashima, S. Q. S., 2021, Predicting urban thermal comfort from calibrated UTCI assessment scale-A case study in Belo Horizonte city, southeastern Brazil: *Urban Climate*, **36**, 100652.
- Simath, S., & Emmanuel, R., 2022: Urban thermal comfort trends in Sri Lanka: the increasing overheating problem and its potential mitigation: *International Journal of Biometeorology*, **66**(9), 1865-1876.
- Staiger, H., Laschewski, G., & Matzarakis, A., 2019, Selection of appropriate thermal indices for applications in human biometeorological studies: *Atmosphere*, **10**(1), 18.
- Taylor, K. E., 2001, Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **106**(D7), 7183-7192.

- Ullah, S., You, Q., Wang, G., Ullah, W., Sachindra, D. A., Yan, Y., ... & Jan, M. A., 2022: Characteristics of human thermal stress in South Asia during 1981–2019: *Environmental Research Letters*, **17**(10), 104018.
- Wang, S., Zhan, W., Du, H., Wang, C., Li, L., Jiang, S., ... & Huang, F. 2022, Identifying analogs of future thermal comfort under multiple projection scenarios in 352 Chinese cities: *Sustainable Cities and Society*, **82**, 103889.
- Weedon, G. P., Gomes, S., Viterbo, P., Shuttleworth, W. J., Blyth, E., Österle, H., ... & Best, M. 2011, Creation of the WATCH forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century: *Journal of Hydrometeorology*, **12**(5), 823-848.
- Wehner, M., Gleckler, P., & Lee, J., 2020, Characterization of long period return values of extreme daily temperature and precipitation in the CMIP6 models: Part 1, model evaluation: *Weather and Climate Extremes*, **30**, 100283.
- WMO, 2021, State of the global climate 2020.
- Xu, M., Hong, B., Jiang, R., An, L., & Zhang, T., 2019: Outdoor thermal comfort of shaded spaces in an urban park in the cold region of China: *Building and Environment*, **155**, 408-420.
- Yan, Y., Xu, Y., & Yue, S., 2021, A high-spatial-resolution dataset of human thermal stress indices over South and East Asia: *Scientific Data*, **8**(1), 1-14.
- You, Q., Cai, Z., Wu, F., Jiang, Z., Pepin, N., & Shen, S. S., 2021, Temperature dataset of CMIP6 models over China: evaluation, trend and uncertainty: *Climate Dynamics*, **57**(1), 17-35.
- You, Q., Jiang, Z., Wang, D., Pepin, N., & Kang, S., 2018, Simulation of temperature extremes in the Tibetan Plateau from CMIP5 models and comparison with gridded observations: *Climate Dynamics*, **51**(1-2), 355-369.
- Zare, S., Shirvan, H. E., Hemmatjo, R., Nadri, F., Jahani, Y., Jamshidzadeh, K., & Paydar, P., 2019, A comparison of the correlation between heat stress indices (UTCI, WBGT, WBDT, TSI) and physiological parameters of workers in Iran: *Weather and Climate Extremes*, **26**, 100213.
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Hassani, S., 2021, Historical variability and future changes in seasonal extreme temperature over Iran: *Theoretical and Applied Climatology*, **146**(3), 1227-1248.
- Zhang, J. T., Ren, G. Y., & You, Q. L., 2022, Detection and projection of climatic comfort changes in China mainland in a warming world: *Advances in Climate Change Research*.
- Zolina, O., Simmer, C., Kapala, A., & Gulev, S. 2005, On the robustness of the estimates of centennial-scale variability in heavy precipitation from station data over Europe: *Geophysical Research Letters*, **32**(14).

Projected heat stress in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble

Elham Kadkhoda ¹, Kamal Omidvar ^{2*}, Azar Zarrin ³ Ahmad Mazid ⁴ and Abbasali Dadashi-Roudbari ⁵

¹ Ph.D. student of Climatology, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

² Professor of Climatology, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

³ Associate Professor of Climatology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

⁴ Associate Professor of Climatology, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

⁵ Postdoctoral Research Associate of Climatology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 29 November 2022, Accepted: 23 January 2023)

Summary

Climate change has significantly increased the frequency and intensity of heat stress and has more effects than increasing average temperature. This study has investigated the spatial distribution of the universal thermal climate index (UTCI) during historical and future periods in Iran. The UTCI (°C) refers to “the isothermal air temperature of the reference condition that would elicit the same dynamic response (strain) of the physiological model” (Jendritzky et al., 2012). In this way, the UTCI is an equivalent temperature, similar to PT. The thermal impact of the meteorological conditions is compared to the one of a standardized reference “indoor” environment with RH = 50% (Ta < 29 °C), WS = 0.5 m s⁻¹, pa = 20 hPa (Ta < 29 °C), and Tmrt = Ta (Shin et al. 2022). Three variables of daily temperature, relative humidity, and wind speed from two sets of data, including 124 meteorological stations and five models from the Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6) model, including GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, and UKESM1-0-LL were investigated with a horizontal resolution of 0.5o. Then, an ensemble model (CMIP6-MME) was generated from these five models using the independent weighted mean (IWM) method. The performances of individual models and the generated ensemble model were examined by Taylor's diagram. The results showed that the multi-model ensemble has higher performance than individual models for all three variables. The results revealed that the spatial distribution of the seasonal averages of the UTCI index has significant variability in Iran, and the variability of this index is affected by the latitude, complex topography, and distance to water resources in Iran. In general, heat stress will increase significantly in Iran by the end of the century. So, we will witness a significant decrease in areas with no heat stress until the end of this century. On the contrary, strong to very strong heat stress events will increase significantly in the country at the end of the century. While the areas with no thermal stress show a spatial displacement to mountainous regions and higher latitudes. These results show that effective adaptation methods should be taken to adapt to global warming and reduce its consequences to avoid the adverse effect of increasing heat stress events in Iran. The results show the overall increasing trend of Iran's heat stress in the near and far future. The highest increase in heat stress anomalies (13.3 degrees Celsius in winter during the far future period under the SSP5-8.5 scenario) can be found in the northwest and west of the country. The increasing intensity of heat stress in the western and northwestern parts of Iran may be related to elevation-dependent warming (EDW).

Keywords: Heat stress, UTCI index, multi-model ensemble, CMIP6, Iran