

## دورنمای اثر گرمایش جهانی بر دگرگونی الگوی زمانی - مکانی رخداد استرس حرارتی ایران

میثم فغانی<sup>۱\*</sup>، جنیفر فیتچت<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانش آموخته کارشناسی‌ارشد تغییر اقلیم، کارشناس هواشناسی اداره کل هواشناسی استان گلستان، گرگان، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه ویس، ژوهانسبورگ، آفریقای جنوبی

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۹/۵/۰۳

### چکیده

اثرات تغییر اقلیم، پیامدهای متفاوتی را بدنبال دارد که یکی از مهمترین این پیامدها، تغییر الگوی فضایی- زمانی رخداد استرس‌های حرارتی می‌باشد. بهر حال استرس‌های حرارتی به‌عنوان یکی از مخاطرات جوی شناخته می‌شود که سلامت جوامع بشری را مورد تهدید قرار می‌دهد. کشور ایران با توجه به موقعیت جغرافیای آن بر روی کمربند خشک و نیمه خشک کره زمین، انتظار می‌رود که الگوی اقلیمی آن تحت تاثیر تغییرات سوء گرمایش جهانی قرار گیرد. لذا در این تحقیق سعی گردید که نقشه خطر استرس حرارتی، با دیدگاه ترکیب شاخص‌های متنوع بیوکلیمایی، برای دو دهه پایه ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ و دهه آینده ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۹ تهیه و مناطق خطر خیزشناسایی و معرفی گردند. لذا بر مبنای یک سناریوی میانه تحت عنوان RCP۴٫۵ و با توجه به مدل CanEMS۲، تغییرات اقلیمی ۴۱ ایستگاه اصلی ایران شبیه سازی شد. در این مطالعه بوسیله ۵ شاخص بیوکلیمایی، نقشه فراوانی رخداد استرس حرارتی برای دوره‌های مطالعاتی تهیه گردید. اگرچه همبستگی بین نتایج این شاخص‌ها از سطح معناداری برخوردار می‌باشد، اما آنچه مشخص بود، اینکه هر یک از این شاخص‌ها الگوهای فضایی متفاوتی از فراوانی رخداد استرس حرارتی نمایش می‌دهند. بنابراین در این پژوهش بر مبنای روش فازی در محیط GIS، نتایج ۵ شاخص بیوکلیمایی ترکیب و نقشه خطر ریسک استرس حرارتی تهیه شد. بهر حال نتایج این تحقیق با توجه به سناریوی RCP۴٫۵ برای دهه ی آینده، گویای کاهش مساحت مناطق خطر پذیر استرس حرارتی با آستانه طبقات ریسک زیاد و ریسک خیلی زیاد به مقدار ۲۴/۵ درصد در قیاس با دوره پایه می‌باشد. همچنین الگوی فضایی نشان می‌دهد که برای هر دو دوره مطالعاتی، کمینه خطرپذیری این بلای جوی مربوط به نواحی مرکزی ایران بوده و از طرف دیگر سواحل جنوبی و شمالی ایران را می‌توان بعنوان مهمترین نواحی با ریسک بالای خطر، بعنوان نقاط حادثه خیز معرفی نمود.

**واژه‌های کلیدی:** گرمایش جهانی، مدل‌سازی اقلیمی، مخاطرات جوی، استرس حرارتی، مدیریت ریسک

### مقدمه

استرس‌های حرارتی و امواج گرمایی یکی از پدیده‌های طبیعی و ذاتی اقلیم در مناطق مختلف جهان می‌باشند، که فراوانی ظهور آن‌ها در نتیجه نوسانات آب و هوایی کره زمین در سال‌های اخیر، همانند سایر پدیده‌های حدی اقلیم افزایش دارد. این رخداد اقلیمی اثرات منفی بر روی کشاورزی، آتش سوزی جنگل‌ها و مراتع، منابع آبی، مصارف انرژی و

سلامت انسان دارد (دوستان، ۱۳۹۲). دما یکی از مهم ترین عناصر آب و هواشناسی است و افزایش دما در قالب استرس‌های حرارتی و امواج گرما، زندگی انسان از جمله معماری آسایش، حمل‌ونقل، کشاورزی و صنعت را تحت تأثیر قرار می‌دهد (مجرد و همکاران، ۱۳۹۲). پدیده‌های حدی اقلیمی از قبیل، بارش شدید (سیل‌ها)، بادهای تند (طوفان)، دماهای بالا (امواج گرمایی و استرس‌های حرارتی) و غیره به سبب ندرت در وقوع و عدم سازگاری جوامع بشری و اکوسیستم با آن‌ها، خسارات زیادی را موجب می‌شوند. امواج گرمایی

\*نویسنده مسئول: meisam.faghani@yahoo.com

جلو جبهه گرم قرار داشته و نفوذ هوای گرم به منطقه سبب افزایش دما در این هنگام از سال شده است. در مطالعه‌ای دیگر، عباس‌نیا و همکاران (۲۰۱۶) در تجزیه و تحلیل مکانی-زمانی امواج گرما در ایران طی سه دهه گذشته به این نتیجه دست یافتند که متوسط شدت امواج گرما در تابستان بین ۳ تا ۴ درجه سانتی‌گراد بیش از بهار اضافه می‌شود. در فصول بهار و تابستان شدیدترین امواج گرما در سواحل جنوبی ایران رخ می‌دهد و بیشترین فراوانی امواج گرما در کوه‌های زاگرس و کوه‌های پراکنده شرقی ایران رخ می‌دهد. به طور متوسط، فرکانس امواج گرما در تابستان نسبت به بهار حدود ۴ موج حرارتی دیگر افزایش می‌یابد. علاوه بر این، میانگین فصلی بیشترین مدت زمان امواج گرما در حدود ۱۰ تا ۱۶ روز متوالی در جنوب شرقی ایران رخ داده است. بهر حال مطالعات متنوعی در این زمینه وجود دارند که با توجه به محدودیت فضای مقاله از ارائه آنها اجتناب گردیده است.

ضرورت انجام تحقیق حاضر بر این اساس و پایه می‌باشد که باید باور داشت که استرس‌های گرمایی با تغییرات اقلیمی، فراوان تر و گسترده تر شده و تداوم آنها نیز بیشتر می‌شود. بنابراین شناخت ویژگی‌های استرس‌های حرارتی، شدت، تداوم و گسترش آنها ضروری است. از آنجا که کشور ایران در منطقه گرم و خشکی قرار دارد، فرض بر این است که در آینده با توجه به افزایش گرمایش جهانی، رخداد استرس حرارتی در منطقه ی مورد مطالعه افزایش یابد. بنابراین این مطالعه بدنبال واکاوی اثر گرمایش جهانی بر تغییر الگوی رخداد استرس‌های حرارتی برای مناطق مختلف ایران و تولید نقشه خطر این بلای جوی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

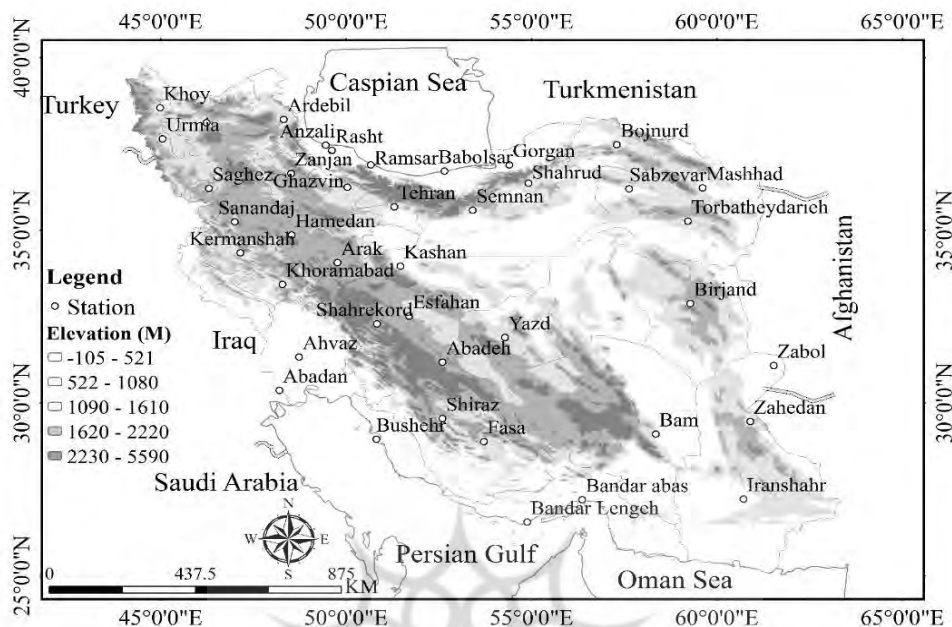
مقاله حاضر بدنبال مدل‌سازی خطر ریسک استرس حرارتی بر مبنای ترکیب شاخص‌های مختلف بیوکلیمایی در ایران می‌باشد. بنابراین در این مطالعه از متغیرها و شاخص‌های مختلف اقلیمی استفاده

از مظاهر اصلی تغییرات اقلیمی، به لحاظ فراوانی وقوع و صدمات جانی و مالی، بسیار حائز اهمیت می‌باشند. امروزه به دو دلیل پدیده استرس حرارتی مورد توجه پژوهشگران حوادث حدی قرار دارد. یکی به دلیل اثرات منفی بر انسان و دیگری، افزایش وقوع، طول مدت و شدت این پدیده است. فراوانی وقوع استرس‌های حرارتی و رخداد امواج گرمایی در سالهای اخیر، یکی از نمودهای نوسانات اقلیمی و فرینهای جوی است، که منجر به خسارت‌های فراوان مالی و افزایش مرگ‌ومیر می‌شوند. دماهای بسیار گرم و یا بسیار سرد به‌عنوان عامل خطر یا بحران برای انسان تعریف شده‌اند. همه ساله افراد بیشتری به جهت گسترش و وقوع استرس‌های حرارتی گرم و سرد هلاک می‌شوند (علیچانی، ۱۳۹۲). الگوی رخداد استرس‌های حرارتی و امواج گرمایی بر فعالیت‌های انسانی تاثیر گذار است. بنابراین مطالعات مختلفی در خصوص الگوی رخداد استرس حرارتی در ایران انجام شده، حال آنکه پیش یابی الگوی زمانی- مکانی رخداد این مخاطره جوی کمتر مورد توجه بوده است. بعنوان نمونه به برخی کارهای انجام شده در خصوص شناسایی الگوی زمانی- مکانی رخداد استرسها و امواج گرمایی می‌توان به کار کرم پور و همکاران (۱۳۹۶) اشاره نمود.

آنها در پژوهشی تحت عنوان شناسایی و تحلیل سینوپتیکی امواج گرمایی غرب ایران (ایلام، خوزستان، لرستان، کرمانشاه) به این نتیجه دست یافته‌اند که بیشترین میزان وقوع امواج در ماه فروردین بوده است. تحلیل سینوپتیکی رخداد امواج گرم در طی فصول نشان می‌دهد که در فصل گرم، زبانه‌های کم‌فشار گنگ تا نواحی مرکزی ایران کشیده شده و حتی زبانه‌ها آن تا شمال شرق ایران نفوذ کرده است. در زمان رخداد این امواج، در سطح زمین کم‌فشارهای حرارتی متعددی بر روی شاخ آفریقا، اروپا، عراق و عربستان بسته شده و زبانه‌های کم‌فشار تشکیل شده روی عربستان قسمت های جنوب، جنوب غرب و بخش‌هایی از غرب ایران را تحت تأثیر قرار داده است. بررسی شرایط همدیدی امواج گرمایی دوره سرد نشان می‌هد که منطقه تحقیق،

بیوکلیمایی شامل دمای خشک، دمای تر، سرعت باد (متر بر ثانیه)، رطوبت نسبی، تابش خورشید و فشار بخار می‌باشند.

گردیده که در مراحل بعد این شاخص‌ها با جزئیات مورد نظر معرفی شده‌اند. در این کار متغیرهای اقلیمی مورد استفاده به منظور محاسبه شاخص‌های



شکل ۱: پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطح کشور

روزانه می‌باشد. شایان ذکر است که برای ریزمقیاس گردانی داده‌های اقلیم جهانی، مدل RegCM4.6 مورد استفاده قرار گرفت. ساختار اصلی مدل RegCM مبتنی بر سه بخش پیش پردازش (تعیین قلمرو، آماده‌های سازی داده‌های شرایط مرزی و ...)، مدل اصلی (معرفی شرایط تعریف شده به مدل و اجرای آن) و پس پردازش (تهیه خروجی‌ها و تحلیل‌های بعد از آن) است. لازم به ذکر می‌باشد که برای اجرای مدل RegCM در این مطالعه، ۳ سری داده مورد نیاز است که شامل:

- داده‌های شرایط مرزی هواشناختی که در این مطالعه همان داده‌های مدل جهانی CanEMS<sup>۲</sup> می‌باشد.

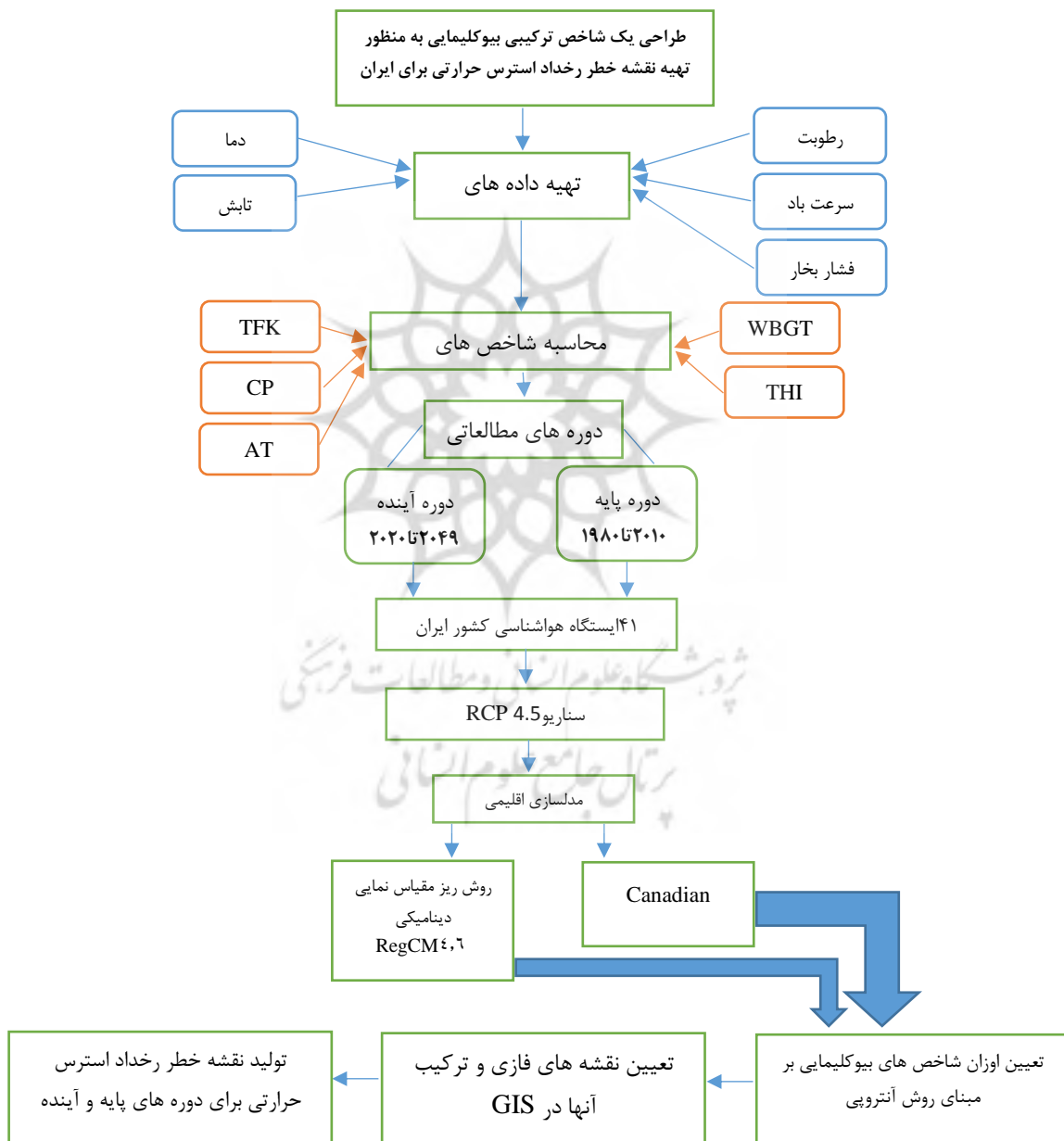
- داده‌های پوشش سطحی شامل داده‌های توپوگرافی، پوشش گیاهی، کاربری زمین، بافت خاک، عمق آب دریاها و دریاچه‌ها با قدرت تفکیک افقی ۳۰ ثانیه است که توسط سازمان زمین شناسی ایالات متحده (USGS) آماده‌سازی شده است، و از تارنمای

در پژوهش حاضر با توجه به دیدگاه پایش و پیش یابی تنش‌های حرارتی از دو دسته داده و دو دوره زمانی متفاوت استفاده شده است. بطوری که دسته اول از این سری‌های زمانی، شامل داده‌های پایه (مشاهداتی) برای ۴۱ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کشور بوده که این داده‌ها متعلق به سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ و در مقیاس روزانه بوده‌اند (شکل ۱). اما دومین دسته از داده‌ها، داده‌های پیش یابی شده برای دهه‌های آینده می‌باشد. لذا به منظور پیش یابی داده‌های آینده نیز از دو دسته مدل اقلیمی شامل مدل‌های اقلیم جهانی و مدل‌های ریزمقیاس گردان منطقه ای استفاده شده است. از دسته ی اول این مدل‌ها، مدل CanEMS<sup>۲</sup> از مجموعه مدل‌های اقلیمی CMIP<sup>۵</sup> با ابعاد سلولی ۲/۸×۲/۸ درجه مربوط به مرکز مطالعات و مدلسازی اقلیمی کانادا CCCma بوده، که به عنوان مدل اقلیم جهانی استفاده شده است. داده‌های برآورد شده برای قرن ۲۱ تحت سناریو RCP4.5 و مربوط به ۴۹ سال آینده و برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ بوده که تفکیک زمانی آنها بصورت

می شوند. اما در این مقاله، به منظور طراحی یک شاخص ترکیبی بیوکلیمایی، از روش فازی در محیط GIS استفاده خواهد شد. بطوری که با ترکیب نتایج این پنج شاخص در قالب یک شاخص جدید، نقشه پهنه بندی خطر استرس حرارتی برای دو دوره ی متفاوت حال و آینده برای ایران تهیه و نتایج تحلیل خواهند شد. مراحل انجام کار و روابط محاسباتی این شاخص‌ها بطور خلاصه در شکل (۲) ارائه شده است:

<http://www.ictp.ictp.trieste.it/~pubrgcm/regcm>

قابل دسترس خواهد بود.  
 • داده‌های دمای سطح آب دریا، که از مجموعه داده‌های مدل جهانی CanEMS<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. در نهایت بعد از پیش‌یابی مقادیر مولفه‌های اقلیمی مورد نظر برای دهه‌های آینده با توجه به مدل جهانی گردش عمومی جو، این داده‌ها در ابعاد ایستگاهی ریزمقیاس خواهند شد و بر مبنای آنها، هر یک از شاخص‌های بیوکلیمایی بصورت منفرد محاسبه



شکل ۲: مراحل روش کار

محدوده برای شخصی است که میزان سوخت و ساز بدن او بین ۶۵ تا ۱۳۰ وات بر متر مربع باشد.

جدول ۱: محدوده‌های احساس حرارتی در شاخص دمای کروی مرطوب

احساس حرارتی	دمای کروی مرطوب
بسیار داغ	بیشتر از ۲۸
داغ	۲۸ تا ۲۳,۵
گرم	۲۳,۵ تا ۲۲
آسایش	۲۲ تا ۱۸,۵
خنک	۱۸,۵ تا ۱۷
سرد	۱۷ تا ۱۳,۵
بسیار سرد	کمتر از ۱۳,۵

**شاخص دما- رطوبت تام (THI):** شاخص دما - رطوبت (THI) توسط تام در سال ۱۹۵۹ ارائه شده است. بعضی از محققان در مطالعات میکروکلیمایی که هدف از آنها بررسی تاثیرات مستقیم سطوح متفاوت بر آسایش حرارتی انسان است از این شاخص استفاده نمودند (Yilmaz et al., ۲۰۰۷). به نقل از (ذوالفقاری، ۱۳۸۹) همچنین در بررسی‌های میکروکلیمایی از جمله مطالعات تطبیقی که بین مناطق شهری و حومه یا مراکز تفریحی و گردش شهری با بخش‌های هم جوار صورت می‌گیرد. این شاخص میتواند نتایج قابل قبولی ارائه کند. شاخص THI را می‌توان از طریق فرمول پیشنهادی زیر محاسبه کرد:

$$\text{THI} = T_a - (0.55 - 0.0055 \text{ RH}) (T_a - 14.5) \quad (2)$$

در این معادله  $T_a$  دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس و RH رطوبت نسبی هوا بر حسب درصد می‌باشد. دامنه تغییرات این شاخص در جدول ۲ آمده است.

در این مقاله به منظور شناسایی، پایش و تحلیل فضایی-زمانی رخداد استرس‌های حرارتی شهرهای ایران از شاخص‌های بیوکلیمایی،  $\text{WBGT}^1$ ,  $\text{THI}^2$ ,  $\text{AT}^5$ ,  $\text{TEK}^4$ ,  $\text{CP}^3$  استفاده شده که در ادامه این شاخص‌ها معرفی شده‌اند. شایان ذکر بوده که به منظور تعیین آستانه رخداد استرس‌های حرارتی بر مبنای ۴ شاخص ( $\text{WBGT}$ ,  $\text{THI}$ ,  $\text{AT}$ ,  $\text{TEK}$ )، از آستانه صدک ۹۵ ام آنها استفاده شده، حال آنکه با توجه به الگوی متفاوت رخداد شاخص CP، آستانه صدک ۵ ام بعنوان معیار رخداد استرس حرارتی استفاده شده است.

### معرفی شاخص‌های زیست هواشناسی مورد استفاده

**شاخص دمای دماسنج مرطوب کروی Wet-Bulb**  
Global Temperature (WBGT): شاخص دمای کروی مرطوب یا WBGT را نخستین بار در ۱۹۵۷ یاگلو و مینارد پیشنهاد کردند. این دما ترکیبی از دمای هوا، دمای مرطوب و دمای کروی می‌باشد.

$$\text{WBGT} = 0.7 * T_w + 0.2 * T_g + 0.1 * T \quad (1)$$

در این معادله:

WBGT شاخص دمای کروی مرطوب، °C (درجه سلسیوس)

$T_w$  دمای مرطوب، °C (درجه سلسیوس)

$T_g$  دمای کروی، یا دمای محاسبه شده بر اساس دمای تر و خشک و باد و تشعشع °C (درجه سلسیوس)

T دمای خشک، °C (درجه سلسیوس)

اثری محدوده مشخصی را برای بیان احساس حرارتی از این شاخص تعیین نکرده است. مونتیرو و همکارانش محدوده بیان احساس حرارتی افراد را بر اساس دمای کروی مرطوب پیشنهاد کرده‌اند. این

۱. Wet-Bulb Global Temperatur
۲. Temperature- humidity index
۳. Cooling power index
۴. Equivalent Temperature
۵. Apparent Temperature

جدول ۲: طبقات THI ارائه شده برای توصیف احساس حرارتی افراد

توصیف	میزان THI
کمتر از ۴۰-	فوق یخ زدگی
۲۰- تا ۳۹٫۹-	یخ زدگی
۱۰- تا ۱۹٫۹-	بینهایت سرد
۱٫۸- تا ۹٫۹-	خیلی سرد
۱٫۷- تا ۱۲٫۹	سرد
۱۳ تا ۱۴٫۹	خنک
۱۵ تا ۱۹٫۹	آسایش
۲۰ تا ۲۹٫۴	گرم
۲۶ تا ۲۹٫۹	خیلی گرم
بیشتر از ۳۰	داغ

دمای هوا و فشار بخار آب ارزیابی می‌کند. جدول (۳) شرح درجه بندی ضریب آسایش حاصل از TEK روی انسانها را نشان می‌دهد. رابطه (۴) شاخص تعادل گرمایی به شرح ذیل می‌باشد:

$$TEK = T_a + 1,0e \quad (۴)$$

T<sub>a</sub> دمای هوا به درجه سلسیوس

e فشار بخار آب بر حسب هکتو پاسکال

جدول ۳: طبقات شاخص TEK

محدوده	شرایط
پایین‌تر از ۱۸ درجه سانتی‌گراد	سرد
۱۸ تا ۲۴	خنک
۲۴ تا ۳۲	کمی خنک
۳۲ تا ۴۴	آسایش
۴۴ تا ۵۶	شرجی، داغ
بالتر از ۵۶	خیلی گرم و مرطوب و شرجی

شاخص قدرت خنک‌کنندگی CP: شاخص CP سرعت باد را در نظر می‌گیرد. این شار گرما در واحد سطح بدن انسان را به سمت محیط و برعکس آن توصیف می‌کند. برای برآورد شاخص CP به w/m<sup>۲</sup> معادله زیر ارائه شده است:

رابطه (۵)

$$CP = (T - ۳۳) \times (۱,۱۶۳ \times (۱۰,۴۵ + ۱,۰ \times V^{۰,۷}))$$

که V میانگین سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه است و T میانگین دمای هوا (درجه سانتی‌گراد) است. قدرت خنک‌کننده به مقیاس احساس مربوط می‌شود که می‌توان آن را مطابق جدول (۴) نشان داد.

جدول ۴: طبقه بندی مقادیر شاخص قدرت خنک‌کننده

طبقه بندی راحتی انسان	CP (w/m <sup>۲</sup> )
اندوثرمال - ناراحتی بسیار داغ	CP < ۰
آتونیک - ناراحتی داغ	۰ < CP ≤ ۱۷۴
هیپوتونیک - آسایش زیر گرم	۱۷۵ ≤ CP ≤ ۳۴۹
خنثی - راحتی	۳۵۰ ≤ CP ≤ ۶۹۹
تونیک - راحتی راحت	۷۰۰ ≤ CP ≤ ۱۰۴۹
ناراحتی سرد	CP ≥ ۱۰۵۰

شاخص دمای ظاهری AT: به منظور محاسبه محدوده‌های آسایش حرارتی کوشش‌های زیادی صورت گرفته است. یکی از اولین روش‌های مشهور، روش دمای ظاهری است که برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ میلادی توسط پوریو ارائه شد. سپس توسط استیدمن توسعه یافت (استیدمن، ۱۹۷۹(a); استیدمن، ۱۹۷۹(b); استیدمن، ۱۹۸۴؛ واتز و کاک استین، ۲۰۰۴). به منظور ارزیابی شرایط آسایش از شاخص دمای ظاهری (AT) استفاده می‌شود. در این شاخص دمای ظاهری از رابطه زیر حاصل می‌گردد (استیدمن، ۱۹۹۴). این شاخص بیشتر برای اثرات گرما و تنش گرمایی بر روی انسان کاربرد دارد.

$$AT = T + 0,32 * E - 0,7 * V \quad (۳)$$

که در این رابطه V سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه و E فشار بخار بر حسب هکتو پاسکال و T دمای خشک می‌باشد.

شاخص تعادل گرمایی TEK: این مدل معادل تاثیرات معمولی دما را روی موجود زنده در ارتباط با دمای هوا و فشار بخار آب ارزیابی می‌کند. شاخص TEK به عنوان دمایی که هوا باید داشته باشد و توجه به فشار ثابت هوا در صورتی که همه بخار آن فشرده شده باشد تعریف می‌شود. مدل تعادل گرمایی (دمایی) تاثیرات معمولی دما را روی موجود زنده در ارتباط با

گام سوم: در گام سوم آنتروپی ( $E_j$ ) هر شاخص محاسبه می‌شود و  $k$  به‌عنوان مقدار ثابت مقدار  $E_j$  را بین ۰ و ۱ نگه می‌دارد.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} * \ln p_{ij} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

که در آن  $p(x)$  توزیع احتمال متغیر تصادفی  $X$  است. افزایش در آنتروپی شانون باعث افزایش عدم اطمینان و کاهش اطلاعات در مورد دانش متغیر تصادفی می‌شود. جنبه جالب دیگر آنتروپی شانون ویژگی حداکثر آنتروپی آن برای توزیع یکنواخت است.

**گام چهارم:** در ادامه مقدار  $d_j$  (درجه انحراف) محاسبه می‌شود که بیان می‌کند شاخص مربوطه ( $d_j$ ) چه میزان اطلاعات مفید برای تصمیم‌گیری در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار می‌دهد. هر چه مقادیر اندازه‌گیری شده شاخصی به هم نزدیک باشند نشان دهنده آن است که گزینه‌های رقیب از نظر آن شاخص تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.

$$d_j = 1 - E_j \quad \text{رابطه (۸)}$$

**گام پنجم:** سپس مقدار وزن  $W_j$  محاسبه می‌گردد. در واقع وزن معیار برابر با هر  $d_j$  تقسیم بر مجموع  $d_j$  ها می‌باشد.

$$w_j = d_j / \sum_{i=1}^n d_j \quad \text{رابطه (۹)}$$

**معرفی روش منطق فازی:** در ادامه به منظور تهیه نقشه ریسک خطر رخداد استرس حرارتی از تئوری فازی استفاده گردیده است. در واقع این مدل برای نرمال سازی واحدهای معیارهای موثر در تهیه نقشه ریسک خطر استرس حرارتی به کار رفته است. هدف منطق فازی ارائه مفاهیمی است که انجام استدلال‌های تقریبی را امکان‌پذیر می‌سازد. بنابراین همانطور که اشاره شد، برای تعیین مقادیر عضویت فازی از فرایند نرمالیزه کردن استفاده شده است. چون مقادیر عضویت فازی در دامنه ۰ تا ۱ می‌باشند، از طریق نرمالیزه کردن ماکزیمم-مینیمم طبق رابطه (۱۰)

فرآیند تولید نقشه‌های ریسک استرس حرارتی تعیین وزن شاخص‌های بیوکلیمایی با استفاده از روش آنتروپی: در تحقیق حاضر، به منظور فازی‌سازی شاخص‌های مختلف بیوکلیمایی ابتدا لازم می‌باشد که ضریب اهمیت یا وزن هر یک از این شاخص‌ها در ماتریس تصمیم‌گیری مشخص شود. وزن هر شاخص بیوکلیمایی، اهمیت نسبی آن را نسبت به شاخص‌های دیگر بیان می‌کند. انتخاب آگاهانه و صحیح وزن‌ها کمک بزرگی در جهت رسیدن به هدف مورد نظر می‌باشد. بنابراین در تحقیق حاضر از روش آنتروپی به منظور تعیین اوزان شاخص‌های مختلف بیوکلیمایی استفاده شد. مفهوم آنتروپی شانون (شانون، ۱۹۴۸) نقش مهمی در نظریه اطلاعات دارد. این مفهوم در زمینه‌های مختلف علمی، از جمله فیزیک، علوم اجتماعی و غیره توسعه یافته است. در تئوری اطلاعات، آنتروپی اندازه‌گیری مقدار اطلاعات مورد نیاز برای توصیف متغیر تصادفی است. با توجه به اینکه هدف اصلی ما فازی‌سازی اوزان بدست آمده از مدل آنتروپی بود، بعد از تعیین اوزان هر شاخص بیوکلیمایی، به منظور تهیه لایه (نقشه) مورد نظر هر شاخص، این وزن‌ها در فراوانی رخداد استرس حرارتی شاخص مورد نظر ضرب شد. سپس در گام بعد بر اساس نتایج هر لایه ساخته شده، اقدام به فازی‌سازی این ۵ لایه در GIS شد. در ادامه مراحل مختلف محاسبات شاخص آنتروپی آورده شده است:

**گام اول:** ابتدا بصورت زیر ماتریس تصمیم‌تهیه می‌شود. ستون‌ها معیار و سطرها گزینه‌ها هستند. به عنوان مثال درایه  $x_{12}$  امتیاز گزینه اول نسبت به معیار دوم است.

$$\text{رابطه (۶)} \quad X_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix}$$

**گام دوم:**

در این گام ماتریس بالا، نرمال می‌شود. هر درایه نرمال شده  $p_{ij}$  نامیده می‌شود. نرمال شدن به این صورت می‌باشد که درایه هر ستون را بر مجموع ستون تقسیم می‌شود.

نسبت فراوانی به مقادیر عضویت فازی تبدیل می‌شود (Kourgialas et al., ۲۰۱۱; Ilanloo et al., ۲۰۱۱; Feizizadeh et al., ۲۰۱۴).

رابطه (۱۰)

$$\mu(c_{ij}) = \frac{FR_{ij} - \text{Min}(FR_{ij})}{\text{Max}(FR_{ij}) - \text{Min}(FR_{ij})} [\text{Max}(\mu(c_{ij})) - \text{Min}(\mu(c_{ij}))] + \text{Min}(\mu(c_{ij}))$$

که در آن مقدار عضویت فازی،  $FR_{ij}$  نسبت فراوانی،  $\text{Max} \mu(C_{ij})$  و  $\text{Min} \mu(C_{ij})$  حدود بالایی و پایینی نرمال سازی می‌باشند.

برای اجرای تکنیک فازی نیاز به عملگرهای اجتماع، اشتراک، ضرب جبری، جمع جبری و گاما است. در این مطالعه از عملگر گاما با ارزش ۰/۹ استفاده شده است. این عملگر حالت کلی روابط عملگرهای ضرب و جمع است و می‌توان با انتخاب صحیح مقدار گاما، پارامترهای کاهش یا افزایشی را همزمان تلفیق نمود و به مقادیری در خروجی‌ها دست یافت که حاصل سازگاری قابل انعطاف میان گرایش‌های افزایشی و کاهش دو عملگر ضرب و جمع فازی می‌باشند (Nikolova and Zlateva, ۲۰۱۸, ۲۰۱۹). به‌طور کلی اجرای مدل فازی در این تحقیق شامل سه مرحله است: مرحله اول فازی سازی لایه‌ها با تعیین و اعمال توابع عضویت بر لایه‌ها، مرحله دوم اعمال عملگر گاما بر لایه‌ها و مرحله سوم تهیه نقشه نهایی خطر ریسک استرس حرارتی حاصل اعمال عملگر گاما می‌باشد. تمامی این مراحل در نرم افزار ArcGIS انجام و نقشه‌های نهایی تهیه گردید.

#### یافته‌ها

**ارزیابی آستانه رخدادهای استرس حرارتی با توجه به شاخص‌های بیوکلیمایی مطالعاتی:** در این قسمت از تحقیق، برای هر دو دوره مطالعاتی، ابتدا صدک ۹۵ بعنوان آستانه رخدادهای استرس حرارتی برای ۴ شاخص (WBGT, THI, AT, TEK) و صدک ۵ درصد برای شاخص CP در ایستگاه‌های در دست مطالعه تعیین گردید. لذا نتایج این بخش از تحقیق نشان می‌دهد

که میانگین کلی آستانه رخدادهای استرس حرارتی تمامی ایستگاه‌ها برای دو شاخص WBGT و AT در دهه آینده به ترتیب با مقادیر ۲/۴۰ درجه و ۳/۲۶ درجه سانتیگراد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت، حال آنکه برای دو شاخص THI و TEK این میانگین کلی در آینده به مقدار ۲/۵۴ و ۲/۴۴ درجه سانتیگراد نسبت به دوره پایه کاهش نشان می‌دهد. اما برای شاخص CP، روش کار کمی متفاوت می‌باشد. برای این شاخص مقادیر کوچکتر CP مویده تنش‌های حرارتی (گرمایی) و مقادیر بزرگتر گویای استرس‌های سرمای است. اما خروجیها نشان دادند که میانگین CP در آینده نسبت به دوره پایه به مقدار  $w/m^2$  ۱۴۶ کمتر خواهد شد. این کاهش به معنای تشدید استرس‌های حرارتی و عبارتی افزایش آستانه رخدادهای استرس حرارتی خواهد بود.

برای شاخص‌های WBGT, THI و TEK بطور مشترک بندرعباس و برای سایر شاخص‌های مطالعاتی شهرهای گرگان، مشهد و رامسر بیشترین کاهش آستانه رخدادهای استرس حرارتی برای دهه آینده را تجربه خواهند نمود. اما نتایج نشان می‌دهد که برای دو شاخص THI و TEK بطور مشترک کرمانشاه به ترتیب با مقادیر ۴۰/۱۴ و ۷۰/۱۰ درجه سانتیگراد، و برای شاخص WBGT اهواز با ۶/۶ درجه و برای شاخص AT، شهر زابل با ۱۰/۶ درجه سانتیگراد بیشترین افزایش در آستانه رخدادهای استرس حرارتی را تجربه خواهند نمود. از طرف دیگر تغییرات شاخص CP نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات آستانه رخدادهای استرس حرارتی با کاهش به مقدار ۴۰۴ وات بر مترمربع نسبت به دوره پایه متعلق به فسا می‌باشد. از یافته مشخص شد که تنها ایستگاه با مقدار افزایشی CP در آینده، ایستگاه سقز با نرخ افزایشی  $w/m^2$  ۳۰/۵ محاسبه شده است (جدول ۵). نتایج این بخش از تحقیق نشان دادند که برای شاخص‌های WBGT, THI, TEK و AT به ترتیب ۸۶، ۴۲، ۳۷ و ۷۶ درصد از ایستگاه‌ها آستانه رخدادهای استرس حرارتی آنها برای آینده نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت.



جدول ۵: اختلاف آستانه رخداد استرس حرارتی برای دوره آینده نسبت به دوره پایه شاخص‌های مطالعاتی

Stations	WBGT	THI	CP	TEK	AT	Stations	WBGT	THI	CP	TEK	AT
آبادان	۴,۸۰	۱,۵۰	-۲۸۷,۰۰	۱,۸۰	۸,۶۰	خرم‌آباد	-۰,۹۰	-۸,۰۰	-۵۲,۵۰	-۶,۸۰	-۰,۸۰
آباده	۶,۲۰	۸,۴۰	-۲۵۱,۳۰	۸,۰۰	۸,۱۰	خوی	۴,۴۰	۵,۸۰	-۶۵,۶۰	۲,۴۰	۳,۰۰
اهواز	۶,۶۰	۶,۴۰	-۳۳۷,۳۰	۶,۱۰	۱۰,۶۰	مشهد	-۱,۶۰	-۱۴,۹۰	-۳۸,۴۰	-۱۴,۰۰	-۱,۷۰
انزلی	۴,۵۰	-۶,۲۰	-۲۴۰,۵۰	-۹,۷۰	۹,۲۰	رامسر	۳,۲۰	-۱۶,۴۰	-۱۵۷,۵۰	-۱۶,۹۰	-۰,۷۰
اراک	۳,۱۰	۴,۲۰	-۱۰۰,۰۰	۲,۸۰	۲,۸۰	رشت	۲,۵۰	-۱۰,۲۰	-۱۲۶,۸۰	-۱۲,۱۰	۰,۵۰
اردبیل	۵,۰۰	۳,۱۰	-۱۳۳,۱۰	-۶,۵۰	۳,۵۰	سبزوار	-۱,۵۰	-۱۰,۸۰	-۱۰,۳۰	-۸,۸۰	-۰,۸۰
بابلسر	۱,۴۰	۳,۲۰	-۱۲۹,۱۰	-۰,۱۰	۲,۵۰	سقز	۱,۱۰	۰,۵۰	۳۰,۵۰	-۱,۰۰	-۰,۲۰
بیم	۱,۸۰	-۳,۷۰	-۱۸۲,۰۰	-۰,۵۰	۴,۶۰	سنندج	۵,۴۰	۱۳,۵۰	-۱۶۷,۱۰	۱۰,۲۰	۵,۷۰
بندرعباس	-۲,۰۰	-۲۹,۶۰	-۸۸,۰۰	-۲۰,۹۰	-۱,۸۰	سمنان	۳,۸۰	۱,۶۰	-۲۰۰,۶۰	۲,۱۰	۳,۴۰
بندرلنگه	۱,۱۰	-۰,۷۰	-۵۷,۱۰	-۱,۶۰	۲,۵۰	شهرکرد	۰,۶۰	-۳,۲۰	-۱۶,۷۰	-۳,۸۰	-۰,۷۰
بیرجند	۵,۶۰	۲,۰۰	-۳۷۹,۰۰	۴,۷۰	۹,۵۰	شاهرود	۲,۴۰	-۱,۴۰	-۹۱,۸۰	-۱,۴۰	۲,۱۰
بجنورد	۱,۷۰	-۱۲,۶۰	-۱۶۸,۰۰	-۱۲,۹۰	۲,۷۰	شیراز	۵,۱۰	-۰,۱۰	-۳۶۷,۵۰	۳,۲۰	۷,۷۰
بوشهر	۰,۸۰	-۵,۲۰	-۵۲,۶۰	-۴,۷۰	۰,۸۰	تبریز	۴,۱۰	۷,۲۰	-۱۶۶,۸۰	۴,۶۰	۶,۹۰
اصفهان	۰,۸۰	-۳,۸۰	-۵۷,۶۰	-۳,۰۰	۰,۵۰	تهران	-۰,۸۰	-۸,۱۰	-۳۸,۵۰	-۶,۱۰	-۰,۶۰
فسا	۶,۲۰	۱,۱۰	-۴۰۴,۴۰	۴,۷۰	۸,۷۰	تربت حیدریه	۰,۴۰	-۷,۶۰	-۱۳۳,۲۰	-۶,۶۰	۱,۶۰
قزوین	۱,۲۰	-۵,۲۰	-۵۴,۲۰	-۵,۳۰	-۰,۵۰	ارومیه	۴,۷۰	۸,۵۰	-۲۰۳,۰۰	۳,۸۰	۶,۱۰
گرگان	-۰,۵۰	-۱۷,۱۰	-۶۷,۸۰	-۱۳,۲۰	-۲,۶۰	یزد	۰,۴۰	-۴,۹۰	-۷۰,۷۰	-۲,۹۰	۱,۱۰
همدان	۰,۷۰	-۱,۰۰	-۴۷,۴۰	-۱,۷۰	۱,۹۰	زابل	۲,۳۰	-۶,۸۰	-۲۳۸,۰۰	-۱,۸۰	۱,۶۰
ایرانشهر	۰,۱۰	-۷,۵۰	-۱۲۹,۷۰	-۴,۵۰	۱,۴۰	زاهدان	۳,۴۰	۰,۴۰	-۲۸۸,۳۰	۲,۱۰	۷,۱۰
کاشان	۱,۶۰	-۵,۷۰	-۱۶۵,۲۰	-۲,۷۰	۰,۸۰	زنجان	۳,۱۰	۴,۷۰	-۹۸,۹۰	۲,۲۰	۳,۴۰
کرمانشاه	۵,۶۰	۱۴,۴۰	-۱۷۳,۴۰	۱۰,۷۰	۶,۶۰						

همانگونه که پیشتر بیان گردید، الگوی رفتاری این شاخص برعکس سایر شاخص‌ها می‌باشد. بطوری که افزایش (کاهش) مقادیر CP به معنای تشدید استرس سرمای (گرمایی) برای این شاخص است. بنابراین محاسبه مقادیر  $r$  منفی بین این شاخص با سایر شاخص‌ها بخاطر تفاوت در طبقه آستانه رخدادها می‌باشد. با این تفاسیر دیده می‌شود که بیشترین همبستگی CP برای هر دوره پایه و آینده به ترتیب با مقادیر  $r = -0,82$  و  $r = 0,89$  مربوط به AT بوده است. بنابراین ملاحظه می‌شود که در میان شاخص‌های مطالعاتی، فقط AT می‌باشد که توانسته با بیش از یک شاخص بالاترین همبستگی داشته باشد. بگونه‌ای که خروجی‌های دو شاخص WBGT و CP بیشترین همبستگی را با شاخص AT داشته‌اند.

نتایج مربوط به جدول (۶)، متعلق به ماتریس همبستگی بین شاخص‌های مختلف در خصوص آستانه‌های رخداد استرس حرارتی ایستگاههای مطالعاتی می‌باشد. در کل نتایج این جدول برای تمامی شاخص‌ها نشان می‌دهد که بین نتایج همه آنها یک رابطه معناداری قابل قبولی (سطح ۹۵ درصد) وجود دارد. اما برای شاخص WBGT بیشترین همبستگی برای دوره پایه و آینده مربوط به AT است که مقدار آن به ترتیب شامل  $0,94$  و  $0,97$  است. برای AT نیز بیشترین همبستگی با WBGT بوده که مقادیر  $r$  نیز مشابه قبل است. برای THI نیز بیشترین همبستگی برای هر دو دوره مطالعاتی با  $r = 0,99$  مربوط به شاخص TEK است. مشابه همین نتیجه نیز برای شاخص TEK ملاحظه می‌گردد. برای CP، نتایج همبستگی آن با سایر شاخص‌ها منفی می‌باشد.

جدول ۶: ماتریس همبستگی بین آستانه رخداد استرس حرارتی بین شاخص‌های مختلف بیوکلیمایی برای دوره پایه و آینده

دوره پایه	WBGT	THI	CP	TEK	AT
WBGT	۱,۰۰	۰,۸۷	-۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۹۴
THI	۰,۸۷	۱,۰۰	-۰,۴۸	۰,۹۹	۰,۸۳
CP	-۰,۸۵	-۰,۶۸	۱,۰۰	-۰,۶۰	-۰,۹۱
TEK	۰,۸۰	۰,۹۹	-۰,۳۸	۱,۰۰	۰,۷۷
AT	۰,۹۴	۰,۸۳	-۰,۸۲	۰,۷۷	۱,۰۰
دوره آینده	WBGT	THI	CP	TEK	AT
WBGT	۱,۰۰	۰,۸۲	-۰,۷۷	۰,۸۶	۰,۹۷
THI	۰,۸۲	۱,۰۰	-۰,۳۳	۰,۹۹	۰,۷۲
CP	-۰,۷۹	-۰,۷۱	۱,۰۰	-۰,۷۲	-۰,۸۱
TEK	۰,۸۶	۰,۹۹	-۰,۴۰	۱,۰۰	۰,۷۷
AT	۰,۹۷	۰,۷۲	-۰,۸۹	۰,۷۷	۱,۰۰

دوره پایه مقادیر بزرگتری را نشان می‌دهد. همچنین تغییرات الگوی فضایی آینده نشان می‌دهد که کمینه فراوانی رخدادها بصورت نواری از مرکز به سواحل جنوبی ایران منتهی شده که نسبت به دوره پایه از لحاظ الگوی فضایی تفاوت‌هایی برای آن دیده می‌شود. از طرف دیگر میانگین کلی ایستگاهها نشان می‌دهد که برای دوره پایه میانگین رخداد استرس‌های حرارتی برای کل کشور ۶۹ روز بوده ولی برای آینده به ۶۶ روز تقلیل خواهد یافت. برای این شاخص در آینده، در ۶۶ درصد از ایستگاهها فراوانی رخداد استرس حرارتی نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. بطوری که بیشترین کاهش رخداد استرس حرارتی برای بندرعباس و اهواز با ۲۶ و ۱۸ روز رخ داده است. حال آنکه بیشترین افزایش نرخ رخداد استرس حرارتی با ۱۶ و ۲۷ روز متعلق به بوشهر و زاهدان خواهد بود.

برای شاخص THI الگوی کلی تغییرات فضایی-زمانی رخداد استرس‌های حرارتی تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای با WBGT دارد. برای این شاخص بیشینه رخدادها با طبقات فراوانی ۷۸-۸۲ روز بصورت هسته‌هایی پراکنده در مرکز و نواحی جنوبی ایران پراکنده شده‌اند. همچنین هسته‌های کمینه رخداد با فراوانی ۵۸ تا ۶۳ روز نیز بصورت هسته‌های نامنظم در سرتاسر ایران توزیع شده‌اند. برای THI، کمینه و بیشینه رخداد استرس‌های حرارتی در آینده از یک الگوی فضایی منظم تری نسبت به دوره پایه تبعیت

### الگوی زمانی- فضایی رخداد استرس حرارتی بر

مبنای شاخص‌های بیوکلیمایی: در این مرحله فراوانی رویداد استرس حرارتی هر ایستگاه با توجه به آستانه‌های رخداد استرس حرارتی برای هر ایستگاه محاسبه و سپس نقشه فراوانی آن برای دوره پایه و آینده ترسیم شده است. همانطور که در شکل (۳) دیده می‌شود، برای WBGT بیشینه رخداد فراوانی استرس حرارتی متعلق به نوار شرقی کشور با طبقه فراوانی ۷۱ تا ۷۸ روز می‌باشد. اگرچه ۲ هسته با بیشینه فراوانی دیگر هم در نوار غربی ایران نیز دیده می‌شود. در این شکل دیده می‌شود که کمینه فراوانی استرس حرارتی با طبقه فراوانی ۵۷ تا ۶۱ روز بصورت نواری از شمال با گذر از نواحی مرکزی ایران به جنوب منتهی می‌شود. نتایج این شاخص نشان می‌دهد، در جنوب شرق کشور نیز یک هسته با کمینه رخداد استرس حرارتی در استان سیستان و بلوچستان وجود دارد. اما با توجه به شکل (۴) دیده می‌شود که الگوی رخدادها برای WBGT در آینده تفاوت‌هایی با دوره پایه دارد. در آینده بیشینه رخداد استرس‌های حرارتی با ۷۸-۸۶ روز در جنوب شرقی ایران متمرکز شده است. این منطقه اگرچه در دوره پایه بعنوان یکی از مناطق کمینه رخداد استرس حرارتی بوده است، ولی در آینده ماهیت آن به یک منطقه با بیشینه رخدادها تغییر پیدا کرده است. از طرف دیگر، خروجیها نشان می‌دهند که آستانه طبقات برای بیشینه رخدادها نسبت به

کوههای زاگرس دیده می‌شود حال آنکه تمرکز اصلی بیشینه فراوانی رخداد استرس‌های حرارتی با ۷۷ تا ۸۱ روز در جنوب شرق بوده اگرچه هسته‌های پراکنده ای در شمال و شمال شرق ایران نیز دیده می‌شود (شکل ۴). برای این شاخص در آینده، ۳۴ درصد از ایستگاه‌ها تجربه ی کمتری نسبت به رخداد استرس‌های حرارتی در قیاس با دوره پایه خواهند داشت. همچنین یافته‌ها برای CP نشان می‌دهد که بیشترین نرخ کاهش استرس حرارتی بطور مشترک برای دو ایستگاه کرمانشاه و تبریز با ۱۷ روز می باشد. خروجی‌ها نشان دادند که نرخ افزایشی تعداد روزها با استرس حرارتی از حداقل ۱ روز برای تربیت حیدریه تا حداکثر ۳۶ روز برای رامسر مدلسازی شده است. برای CP نیز میانگین فراوانی کل ایستگاهها نشان می دهد که این میانگین برای دوره آینده با نرخ ۴ روز افزایش خواهد یافت. بطوری که میانگین کلی در دوره پایه ۶۳ روز بوده و برای آینده ۶۷ روز محاسبه شده است.

بررسی‌ها از تغییرات الگوی زمانی- فضایی شاخص TEK از لحاظ ساختار کلی مشابهت‌هایی با برخی شاخص‌ها دارد. زیرا برای دوره پایه، محدوده جنوب شرق کشور با طبقه فراوانی ۷۱ تا ۸۲ روز بیشترین تجربه از استرس حرارتی را نشان می دهد که همین رخدادهای استرس حرارتی برخوردار خواهد بود، اگرچه در جنوب غرب ایران نیز رخداد استرس‌های حرارتی در مقایسه با سایر نواحی دیگر کشور از نرخ بالایی برخوردار است (شکل ۳). در مقایسه نتایج کمینه رخدادهای دوره پایه و آینده دیده می‌شود که در دوره پایه، کمینه رخدادهای با ۵۱ تا ۵۷ روز بصورت هسته ای در شمال سواحل جنوبی ایران متمرکز شده اما برای آینده این کمینه با نرخ ۵۶ تا ۶۱ روز، هسته مرکزی ایران را تحت پوشش قرار داده است. نتایج مربوط به شاخص TEK نشان می‌دهد که همانند شاخص CP برای ۳۴ درصد از ایستگاهها، در دوره آینده فراوانی استرس حرارتی کاهش می‌باشد (شکل ۴). اما همانند شاخص THI، بم با ۱۴ روز و

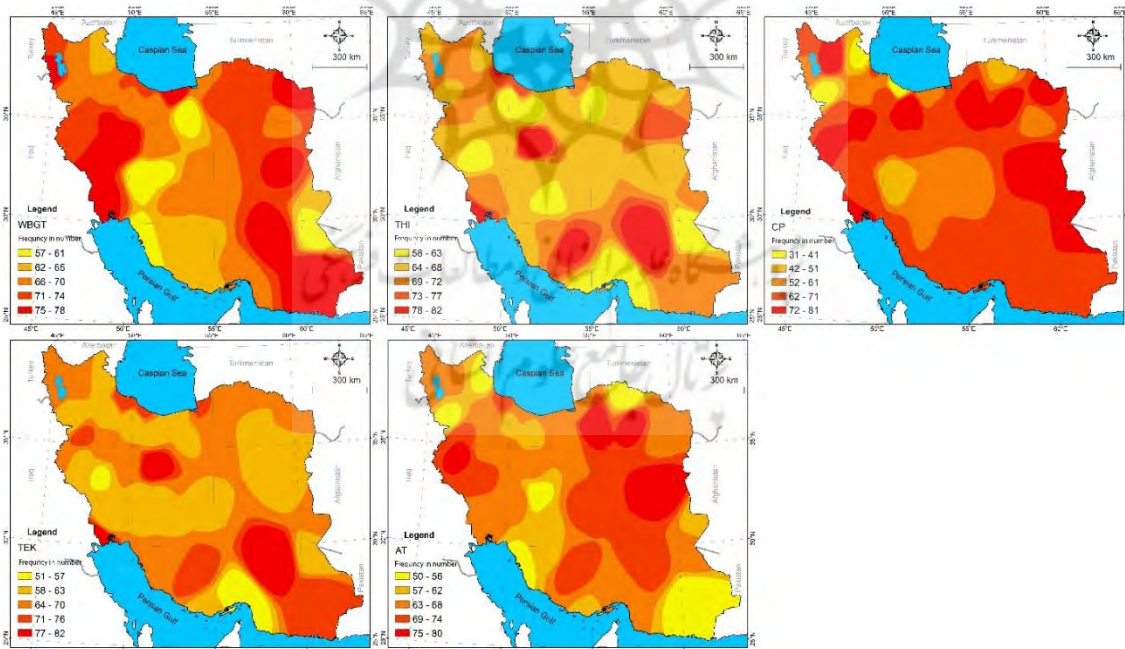
می‌کند. زیرا نیمه شمالی ایران با طبقات فراوانی ۶۰ تا ۶۵ روز کمینه و سواحل جنوبی ایران با ۸۱ تا ۸۵ روز بیشینه فراوانی‌ها را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۳). با توجه به آستانه طبقات فراوانی‌ها دیده می‌شود که در آینده، برای بیشینه رخدادهای نسبت به دوره پایه مقادیر بزرگتری مدلسازی شده است. در مجموع برای این شاخص در آینده، در ۴۶ درصد از ایستگاه‌ها فراوانی رخداد استرس حرارتی نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. برای THI بیشترین کاهش استرس حرارتی در دوره آینده با مقادیر ۱۶ و ۱۵ روز به ترتیب مربوط به کاشان و بم بوده و در نتیجه‌ای تقریباً متفاوت نسبت به WBGT، نشان می‌دهد که یکی از بیشینه مقادیر افزایشی با ۲۰ روز متعلق به بندرعباس بوده، همچنین زاهدان نیز با ۲۷ روز بیشترین نرخ افزایشی رخداد استرس حرارتی را در آینده تجربه خواهد نمود. لازم به ذکر است که برای این شاخص نیز میانگین فراوانی استرس حرارتی برای ایران در دوره پایه ۶۸ روز بوده که در آینده به ۷۰ روز افزایش خواهد یافت (شکل ۴).

نتایج تغییرات زمانی- فضایی فراوانی رخداد استرس حرارتی برای شاخص CP نشان می‌دهد که در دوره پایه کمینه رخدادهای بصورت هسته‌هایی با فراوانی ۳۱ تا ۴۱ روز در شمال غرب کشور متمرکز شده و اگرچه بیشینه مقادیر، غالب مساحت کشور را شامل شده اند ولی تمرکز اصلی آنها با ۷۲ تا ۸۱ روز مربوط به نوار مرزی شرق ایران است. همچنین هسته‌های کمینه رخداد نیز در شمال غرب، شمال شرق و همچنین در نواحی مرکزی ایران پراکنده شده اند. بطوری که کمینه رخدادهای استرس حرارتی برای این نواحی در طبقه ۳۱ تا ۶۵ روز قرار دارند (شکل ۳). برای آینده، الگوی فضایی رخدادهای نسبت به دوره پایه تفاوت‌های قابل ملاحظه ای نشان می دهد. یکی تغییر در طبقه فراوانیها می باشد. زیرا کمینه طبقه فراوانیها برای آینده شامل ۵۶ تا ۶۱ روز بوده که در مقایسه با دوره پایه نرخ افزایشی قابل توجهی را نشان می دهد. توزیع فضایی کمینه مناطق رخداد استرس حرارتی با توجه به CP بر روی ارتفاعات شمال غرب و رشته

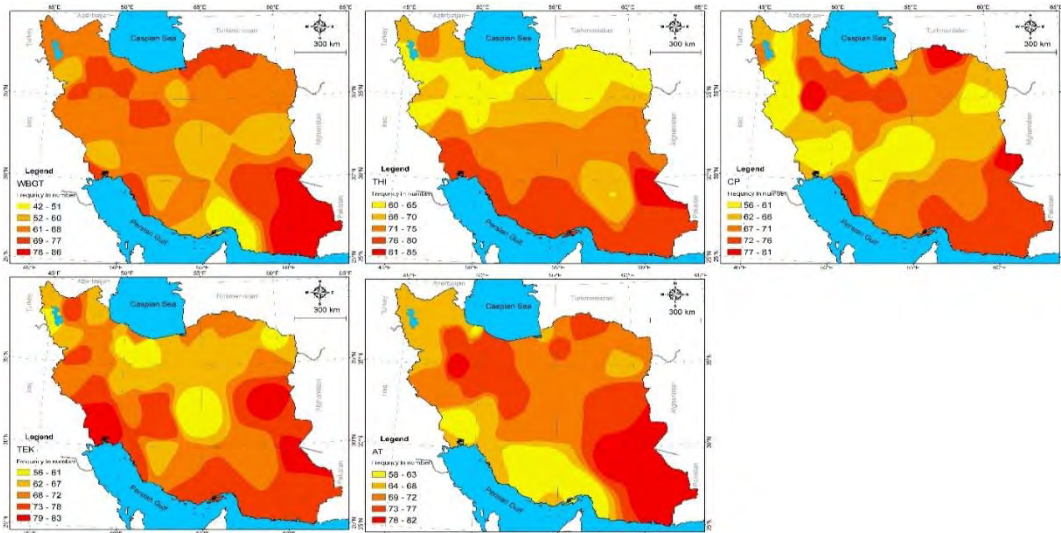
کامینه فراوانیها با طبقات رخداد ۵۸ تا ۶۳ روز از جنوب شرق به شمال سواحل جنوبی ایران گسترش یافته است. از طرف دیگر تمرکز اصلی فراوانیها برای دوره پایه با ۷۵ تا ۸۰ روز مربوط به نیمه شرقی کشور بوده که در آینده همین الگو با تغییر اندکی و با نرخ فراوانی ۷۸ تا ۸۲ روز برای نیمه شرقی دیده می‌شود (شکل ۴). همچنین یافته‌ها نشان می‌دهد که میانگین رخداد استرس‌های حرارتی برای کل ایران در دوره پایه ۶۴ روز بوده که در آینده به ۷۰ روز افزایش خواهد یافت. بر مبنای سایر خروجی‌های این بخش مشخص شد که برای ۲۹ درصد از ایستگاه‌های مورد پایش، فراوانی رخداد استرس حرارتی در آینده کاهشی می‌باشد. برای این شاخص بیشترین تغییرات کاهشی به ترتیب با ۱۳ و ۱۲ روز متعلق به رشت و فسا بوده و همچنین خروجیها نشان دادند که برای ایستگاههای ایرانشهر با ۲۸ روز و زابل با ۲۴ روز بیشترین نرخ افزایشی در مقایسه با سایر ایستگاه‌ها محاسبه شده است.

کاشان با ۱۳ روز، بیشترین کاهش فراوانی استرس‌های حرارتی را در آینده تجربه می‌کنند. حال آنکه در اهواز و بندرعباس به ترتیب با ۲۳ و ۲۶ روز، بیشترین نرخ افزایشی استرس‌ها برای دوره آتی مدلسازی گردیده است. لازم به توضیح بوده که برای این شاخص، میانگین کلی ایستگاه‌ها در آینده ۶۹ روز بوده که در قیاس با گذشته ۴ روز افزایش داشته است.

برای AT نتایج الگوی زمانی- فضایی از کمینه رخدادها برای دوره پایه تفاوت معناداری با شاخص TEK نمایش می‌دهد. زیرا یکی از مراکز اصلی کمینه رخدادها با طبقه فراوانی ۵۰ تا ۵۶ روز مربوط به نواحی جنوب شرق ایران است، علی‌رغم اینکه این منطقه با توجه به خروجی‌های شاخص TEK به‌عنوان یکی از نواحی با بیشترین مقادیر رخداد استرس حرارتی شناخته می‌شود. اما برخی هسته‌های کمینه رخداد دیگر نیز در شمال شرق، شمال غرب و حتی مرکز ایران دیده می‌شود (شکل ۳). حال آنکه بر مبنای شبیه‌سازیها برای آینده مشخص گردید که



شکل ۳: فراوانی رخداد استرس حرارتی دوره پایه برای هر ۵ شاخص بیوکلیمایی



شکل ۴: فراوانی رخداد استرس حرارتی دوره آینده برای هر ۵ شاخص بیوکلیمایی

فراوانی رخداد برای آینده با ۶۰ روز برای سقز و بیشینه آن با ۸۱ روز برای زاهدان محاسبه شده است. همچنین نتایج این قسمت نشان دادند که از میان ایستگاه‌های مطالعاتی، ۴۸ درصد از ایستگاه‌های مطالعاتی فراوانی رخداد استرس حرارتی در آینده نسبت به دوره پایه در آنها کاهش خواهد یافت. بیشترین کاهش فراوانی‌ها بطور مشترک برای رشت و مشهد شامل ۵ روز بوده و بیشترین نرخ افزایشی با ۱۳ و ۱۹ روز به ترتیب مربوط به اصفهان و زاهدان می‌باشد (شکل ۵).

در این مرحله به منظور فهم کلی از فراوانی رخداد استرس‌های حرارتی در سطح ۴۱ ایستگاه اصلی کشور، یک میانگین کلی از خروجی تمام ۵ شاخص محاسبه گردید که این فرایند برای هر دو دوره مطالعاتی و برای هر ایستگاه انجام شد. همانطور که نتایج این تحقیق نشان دادند میانگین کلی فراوانی رخداد استرس حرارتی برای کل کشور در دوره پایه ۶۶ روز بوده که در آینده مقدار آن به ۶۸ روز افزایش خواهد یافت. برای دوره پایه نوسان بین حداقل و حداکثر استرس حرارتی به ترتیب بین ۵۷ و ۷۶ روز برای اردبیل و آبادان می‌باشد، حال آنکه حداقل



شکل ۵: مقایسه فراوانی رخداد استرس حرارتی با توجه به میانگین کلی تمامی شاخص‌های مطالعاتی برای دوره پایه و آینده

دوره پایه و آینده در جایگاه بعدی قرار دارد. همچنین این اوزان برای دوره پایه و آینده در مورد شاخص AT مشترکا شامل ۰/۱۵ بوده و برای WBGT مقادیر ۰/۱۷ و ۰/۲۶ را شامل شده و در نهایت بیشترین وزنها با مقادیر ۰/۴۳ و ۰/۳۸ مربوط به CP است. بنابراین برای شاخص‌های THI، TEK و CP میانگین اوزان در آینده نسبت به دوره پایه کاهش می‌دهد. همچنین WBGT و AT افزایش نشان می‌دهد. همچنین بیشترین تغییرات آینده در مورد WBGT دیده می‌شود. به گونه‌ای که نسبت به دوره پایه با نرخ ۰/۰۹ افزایش داشته است. در ادامه جزئیات مربوط به هر ایستگاه برای دو دوره مطالعاتی از جدول (۷) قابل مشاهده می‌باشد.

طراحی ترکیب شاخص‌های بیوکلیمایی در تولید نقشه ریسک استرس حرارتی: در این مرحله به منظور ترکیب نتایج شاخص‌های بیوکلیمایی بر مبنای روش فازی، در گام اول نیاز است تا وزن هر شاخص محاسبه شود که این فرایند با توجه به روش آنتروپی انجام گردید. در جدول (۷)، نتایج اوزان هر شاخص برای دوره پایه و آینده آورده شده است. با توجه به نتایج جدول (۷)، مشخص گردید که بر مبنای میانگین کلی اوزان برای تمامی ایستگاهها، یک الگوی مشابه برای هر دو دوره پایه و آینده دیده می‌شود. بصورتی که برای هر دو دوره، میانگین کمینه وزن بترتیب برای دوره پایه و آینده با مقادیر ۰/۱۲ و ۰/۰۹ متعلق به شاخص THI بوده است. سپس شاخص TEK با مقادیر وزنه‌های ۰/۱۳ و ۰/۱۱ به ترتیب برای

جدول ۷: مقایسه وزن شاخص‌های بیوکلیمایی بر مبنای روش آنتروپی

Stations	دوره پایه					دهه آینده				
	WBGT	THI	CP	TEK	AT	WBGT	THI	CP	TEK	AT
آبادان	۰,۰۰	۰,۱۴	۰,۴۷	۰,۲۱	۰,۲۰	۰,۲۰	۰,۱۵	۰,۳۰	۰,۱۶	۰,۱۸
آباده	۰,۰۰	۰,۰۷	۰,۶۵	۰,۰۹	۰,۲۰	۰,۹۷	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۱
اهواز	۰,۲۶	۰,۱۱	۰,۳۴	۰,۱۲	۰,۲۰	۰,۲۱	۰,۱۳	۰,۳۱	۰,۱۶	۰,۱۹
انزلی	۰,۰۰	۰,۲۲	۰,۴۵	۰,۲۰	۰,۱۰	۰,۲۳	۰,۱۲	۰,۳۳	۰,۱۳	۰,۱۸
اراک	۰,۱۷	۰,۰۸	۰,۵۶	۰,۰۷	۰,۱۰	۰,۲۱	۰,۰۹	۰,۴۵	۰,۱۰	۰,۱۵
اردبیل	۰,۲۰	۰,۱۵	۰,۴۰	۰,۱۲	۰,۱۰	۰,۲۵	۰,۱۳	۰,۳۱	۰,۱۲	۰,۱۹
بابلسر	۰,۰۰	۰,۲۱	۰,۴۰	۰,۲۰	۰,۲۰	۰,۱۹	۰,۱۳	۰,۲۷	۰,۱۹	۰,۲۲
بم	۰,۲۱	۰,۰۵	۰,۴۴	۰,۱۵	۰,۱۰	۰,۹۷	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱
بندرعباس	۰,۲۴	۰,۲۳	۰,۲۶	۰,۱۷	۰,۱۰	۰,۲۲	۰,۱۹	۰,۲۴	۰,۱۸	۰,۱۷
بندرلنگه	۰,۲۱	۰,۲۲	۰,۲۶	۰,۱۷	۰,۱۰	۰,۱۸	۰,۲۱	۰,۲۸	۰,۱۷	۰,۱۷
بیرجند	۰,۲۲	۰,۰۹	۰,۴۴	۰,۰۹	۰,۲۰	۰,۲۰	۰,۰۷	۰,۴۲	۰,۱۴	۰,۱۶
بجنورد	۰,۱۸	۰,۱۰	۰,۴۹	۰,۰۹	۰,۱۰	۰,۲۱	۰,۰۹	۰,۴۴	۰,۰۹	۰,۱۷
بوشهر	۰,۲۰	۰,۱۸	۰,۳۰	۰,۱۷	۰,۱۰	۰,۱۹	۰,۲۲	۰,۲۸	۰,۱۸	۰,۱۴
اصفهان	۰,۰۰	۰,۰۹	۰,۶۵	۰,۰۹	۰,۲۰	۰,۰۲	۰,۰۹	۰,۶۲	۰,۰۷	۰,۲۰
فسا	۰,۲۳	۰,۱۱	۰,۳۵	۰,۱۴	۰,۲۰	۰,۲۰	۰,۰۸	۰,۴۲	۰,۱۴	۰,۱۶
فزوین	۰,۲۱	۰,۱۱	۰,۳۹	۰,۱۲	۰,۲۰	۰,۲۱	۰,۰۹	۰,۴۶	۰,۰۹	۰,۱۶
گرگان	۰,۱۹	۰,۱۳	۰,۴۳	۰,۱۲	۰,۱۰	۰,۱۹	۰,۰۹	۰,۴۵	۰,۱۰	۰,۱۶
همدان	۰,۱۸	۰,۱۲	۰,۴۸	۰,۰۹	۰,۱۰	۰,۲۰	۰,۰۸	۰,۵۰	۰,۰۸	۰,۱۴
ایرانشهر	۰,۲۰	۰,۰۷	۰,۴۲	۰,۱۷	۰,۱۰	۰,۲۰	۰,۱۵	۰,۳۴	۰,۱۷	۰,۱۴
کاشان	۰,۰۰	۰,۱۲	۰,۵۲	۰,۱۳	۰,۲۰	۰,۲۰	۰,۰۶	۰,۴۷	۰,۰۹	۰,۱۸
کرمانشاه	۰,۲۱	۰,۰۹	۰,۴۸	۰,۰۷	۰,۲۰	۰,۲۲	۰,۱۱	۰,۳۷	۰,۱۲	۰,۱۸



ادامه جدول ۷-

Stations	دوره پایه					دوره آینده				
	WBGT	THI	CP	TEK	AT	WBGT	THI	CP	TEK	AT
خرم آباد	۰,۲۳	۰,۱۰	۰,۴۲	۰,۰۹	۰,۱۶	۰,۲۱	۰,۰۶	۰,۴۰	۰,۱۲	۰,۲۰
خوی	۰,۱۷	۰,۱۰	۰,۵۱	۰,۰۹	۰,۱۳	۰,۲۰	۰,۱۰	۰,۴۷	۰,۰۹	۰,۱۳
مشهد	۰,۲۰	۰,۱۳	۰,۴۴	۰,۰۹	۰,۱۴	۰,۲۰	۰,۰۸	۰,۴۸	۰,۱۰	۰,۱۵
رامسر	۰,۲۱	۰,۱۵	۰,۳۱	۰,۱۷	۰,۱۶	۰,۲۹	۰,۱۳	۰,۲۳	۰,۱۳	۰,۲۲
رشت	۰,۳۴	۰,۲۳	۰,۰۱	۰,۲۱	۰,۲۱	۰,۲۲	۰,۱۲	۰,۳۵	۰,۱۳	۰,۱۸
سبزوار	۰,۲۲	۰,۱۰	۰,۴۷	۰,۰۹	۰,۱۲	۰,۲۰	۰,۰۶	۰,۴۹	۰,۰۹	۰,۱۷
سقز	۰,۲۰	۰,۱۱	۰,۴۷	۰,۰۹	۰,۱۳	۰,۲۱	۰,۱۰	۰,۴۵	۰,۱۰	۰,۱۴
سنندج	۰,۰۰	۰,۱۴	۰,۴۷	۰,۲۱	۰,۱۸	۰,۲۱	۰,۱۰	۰,۴۴	۰,۱۱	۰,۱۴
سمنان	۰,۱۹	۰,۰۸	۰,۵۷	۰,۰۸	۰,۰۸	۰,۲۱	۰,۰۶	۰,۴۶	۰,۰۹	۰,۱۹
شهرکرد	۰,۰۰	۰,۱۲	۰,۶۱	۰,۱۰	۰,۱۷	۰,۹۸	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱
شاهرود	۰,۲۳	۰,۱۲	۰,۳۵	۰,۱۴	۰,۱۶	۰,۲۱	۰,۰۹	۰,۴۴	۰,۰۹	۰,۱۷
شیراز	۰,۲۴	۰,۱۰	۰,۳۷	۰,۱۲	۰,۱۶	۰,۲۰	۰,۰۷	۰,۴۴	۰,۱۴	۰,۱۶
تبریز	۰,۲۵	۰,۱۳	۰,۳۲	۰,۱۳	۰,۱۷	۰,۲۳	۰,۱۱	۰,۳۷	۰,۱۱	۰,۱۷
تهران	۰,۲۳	۰,۱۰	۰,۳۷	۰,۱۱	۰,۱۹	۰,۲۰	۰,۰۵	۰,۵۰	۰,۰۸	۰,۱۶
تربت حیدریه	۰,۲۱	۰,۱۲	۰,۴۵	۰,۱۰	۰,۱۲	۰,۲۰	۰,۰۶	۰,۵۰	۰,۱۰	۰,۱۴
ارومیه	۰,۲۲	۰,۱۴	۰,۳۶	۰,۱۲	۰,۱۶	۰,۲۱	۰,۱۱	۰,۴۲	۰,۱۱	۰,۱۵
یزد	۰,۲۱	۰,۰۶	۰,۴۵	۰,۱۰	۰,۱۸	۰,۲۰	۰,۰۴	۰,۴۶	۰,۱۱	۰,۱۸
زابل	۰,۲۳	۰,۰۹	۰,۵۰	۰,۱۵	۰,۰۳	۰,۱۹	۰,۰۹	۰,۴۴	۰,۱۳	۰,۱۴
زاهدان	۰,۱۹	۰,۰۵	۰,۴۵	۰,۱۳	۰,۱۸	۰,۱۸	۰,۰۶	۰,۵۲	۰,۱۱	۰,۱۳
زنجان	۰,۲۱	۰,۱۳	۰,۳۸	۰,۱۱	۰,۱۶	۰,۲۲	۰,۱۱	۰,۴۱	۰,۱۰	۰,۱۶

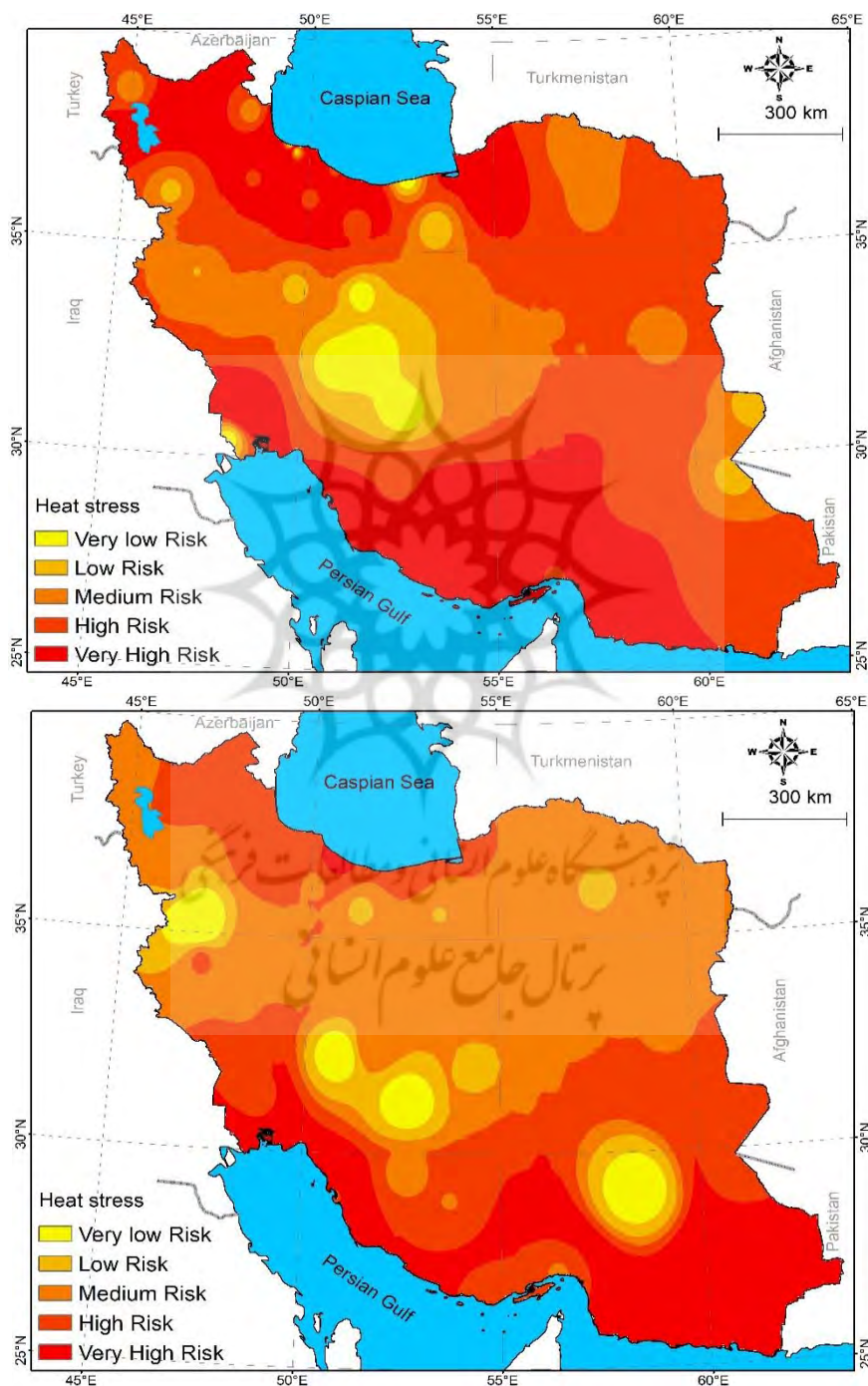
کم و ریسک متوسط با مقادیر ۰/۹، ۱ و ۲۲/۶ درصد نسبت به دوره پایه افزایشی و همچنین مساحت طبقه ریسک زیاد و ریسک خیلی زیاد با نرخ ۱۳/۵ و ۱۱/۱ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می باشد. بنابراین برای دهه های آینده مجموعاً بر مساحت نواحی با ریسک خطر پذیری ریسک خیلی کم تا ریسک متوسط با نرخ ۲۴/۵ درصد افزوده و از طرف دیگر از مساحت نواحی کشور با خطرپذیری با آستانه ریسک زیاد و ریسک خیلی زیاد به مقدار ۲۴/۵ درصد کاسته خواهد شد (شکل ۶).

در مقایسه بین دو دوره پایه و آینده ملاحظه می شود که مناطق با محدوده طبقه ریسک خیلی کم شامل نواحی مرکزی ایران می باشد که مشترکاً برای هر دو دوره این شرایط دیده می شود. اما در آینده هسته های دیگری با محدوده طبقه ریسک خیلی کم نیز در ارتفاعات مرزهای غربی و پهنه ای در جنوب شرق ایران دیده می شود. برای هر دو دوره، نتایج نشان می دهند که بالاترین ریسک رخداد استرس حرارتی

در ادامه نتیجه ترکیب شاخص های بیوکلیمایی با استفاده از روش فازی انجام و نقشه ریسک رخداد استرس حرارتی برای دو دوره پایه و آینده تهیه شد. در این مرحله به منظور تهیه نقشه های ریسک رخداد استرس حرارتی ۵ طبقه خطر معرفی گردیدند. بطوری که در دوره پایه طبقه ریسک خیلی کم با ۳ درصد از مساحت ایران، طبقه ریسک کم و ریسک متوسط با ۵/۶ و ۲۱/۶ درصد از مساحت کشور و در نهایت برای دو طبقه خطر ریسک زیاد و ریسک خیلی زیاد مساحتی معادل ۴۰/۵ و ۲۹/۳ درصد از کل کشور را شامل شده اند (شکل ۵). اما برای دهه آینده طبقه خطر ریسک خیلی کم، ۳/۹۱ درصد، طبقه ریسک کم با ۶/۵۹ درصد و طبقه خطر ریسک متوسط با ۴۴/۲۵ درصد از کل مساحت ایران را دربر گرفته اند. همچنین دو طبقه خطر ریسک زیاد و ریسک خیلی زیاد نیز به ترتیب ۲۷ و ۱۸/۱۷ درصد از مساحت ایران را شامل شده است. لذا ملاحظه می شود که در آینده مساحت طبقات خطر ریسک کم، ریسک خیلی

جنوبی می باشد. این تفکیک از لحاظ توزیع فضایی برای دوره پایه کاملاً مشابه دوره آینده نیست. زیرا تمرکز اصلی نواحی با ریسک پذیری پایین رخداد استرس حرارتی غالباً در نواحی مرکزی ایران گسترش یافته است (شکل ۶).

متعلق به قسمتهایی از شمال غرب و سواحل شمالی و جنوبی کشور است. از تفاوت‌های قابل ملاحظه بین این دو دوره می توان به این نکته اشاره کرد که در آینده کشور را می توان به دو پهنه اصلی از لحاظ رخداد استرس‌های حرارتی تقسیم کرد. بگونه ای که نیمه شمالی دارای خطرپذیری کمتری نسبت به نیمه



شکل ۶: مدلسازی فازی ریسک استرس حرارتی بر مبنای ترکیب ۵ شاخص بیوکلیمایی برای پایه و آینده



### بحث و نتیجه گیری

کشور ایران با توجه به موقعیت جغرافیایی خود که بر روی کمربند خشک و نیمه خشک کره زمین قرار گرفته است، انتظار می رود که الگوهای خشنی از لحاظ رخداد بلایای جوی با توجه به تغییرات آب و هوایی دهه های آینده تجربه نماید (Rahimi et al., ۲۰۱۳; Karandish and Mousavi, ۲۰۱۸). در تحقیق حاضر از ۵ شاخص بیوکلیمایی برای تعیین نقشه ریسک خطر استرس حرارتی برای دوره پایه و آینده ایران استفاده گردید. همانطور که نتایج این تحقیق نشان دادند، اگر چه بر مبنای ماتریس همبستگی مشخص شد که نتایج تمامی شاخص ها از ارتباط معناداری با یکدیگر برخوردار می باشند، اما برای هر یک از شاخص ها، الگوی توزیع فضایی-زمانی فراوانی رخداد استرس های حرارتی دارای تفاوت هایی با سایر شاخص ها می باشد. مشخصا این تفاوتها برگرفته از مبانی تئورتیکی و متغیرهای مورد استفاده برای هر شاخص بیوکلیمایی است. از طرف دیگر، تفاوت در نتایج این شاخص ها می تواند متأثر از مناسب یا عدم مناسب بودن در استفاده از این شاخص ها برای نواحی مختلف ایران باشد. زیرا مبنای طراحی و توسعه هر یک از این شاخص ها برگرفته از یک محدوده جغرافیایی با اقلیم ویژه و ساکنانی می باشد که از لحاظ شرایط هواشناسی زیستی تفاوت هایی با سایر نواحی کره زمین دارند.

به عنوان نمونه در این راستا می توان به کار روشن و همکاران (۲۰۱۸) در خصوص ارزیابی نتایج دو شاخص PET و PT برای ایران اشاره کرد. در این مطالعه مشخص شد که آستانه های شاخص PET از حساسیت بیشتری در پایش شرایط سرد و گرم در قیاس با شاخص PT برخوردار می باشد. از طرف دیگر حساسیت شاخص PET در پایش تنش ها و استرس های سرمایایی خیلی بیشتر از شاخص PT بوده، بگونه ای که بر مبنای شاخص PET فراوانی بیشتری از رخداد دوره ها با تنش سرمایایی در قیاس با شاخص PT برای دوره مطالعاتی آنها استخراج گردید.

در مطالعه حاضر، به منظور ترکیب شاخص های مختلف در تهیه نقشه ریسک استرس حرارتی از روش فازی استفاده شد. اما پیش از این نیاز بود تا وزن هر یک از شاخص های بیوکلیمایی مشخص شود. با توجه به این پژوهش، نه تنها از اوزان یکسانی برای شاخص های بیوکلیمایی استفاده نگردید، بلکه برای هر ایستگاه و دوره مطالعاتی پایه و آینده، مقادیر اوزان هر شاخص بصورت جداگانه محاسبه شدند. به عبارتی الگوی رخداد هر شاخص بیوکلیمایی با توجه به شرایط اقلیم محلی هر ایستگاه متفاوت می باشد که این الگوی رخداد متفاوت می تواند در اهمیت نسبی و وزن آن شاخص تاثیرگذار باشد. می توان اذعان نمود که در این کار، ترکیب شاخص های مختلف بیوکلیمایی در تولید نقشه ریسک حرارتی، برگرفته از تئوری های مختلفی می باشد که بعنوان پشتوانه طراحی این شاخص ها بوده اند. بنابراین ما با ترکیب نتایج این شاخص ها توانسته ایم بطور از یک تنوع تئوریکی در ارائه نتیجه نهایی بهره مند شویم. زیرا همانطور که در نقشه نهایی ریسک حرارتی ملاحظه می گردد، نتایج این نقشه با هر یک از نقشه های شاخص ها که بطور جداگانه تهیه گردیده اند، تفاوت هایی نشان می دهد. بعنوان مثال برای دوره پایه، بیشینه مناطق با رخداد استرس های حرارتی با توجه به شاخص WBGT شامل هسته ای در غرب و نوار مرزی شرق ایران بوده که این الگو مشابهتی با شاخص AT دارد، اما برای شاخص TEK جنوب شرق کشور بعنوان مرکز بیشینه خطر ملاحظه می گردد و یا اینکه برای THI هسته های خطر (بیشینه فراوانی) بصورت نقاطی پراکنده در مرکز ایران پراکنده شده اند. یا برای CP بیشینه فراوانی رخداد استرس حرارتی بصورت کمربندی عریض نواحی مرکزی ایران که کمینه فراوانی رخداد را شامل شده اند احاطه کرده است. بهر حال مهمترین عامل در توزیع فضایی این مخاطره ی جوی در ایران که در قالب نقشه نهایی خطر ارائه شده است، می تواند متأثر از وزنی باشد که برای هر شاخص محاسبه و اختصاص داده شده است. بصورتی که برای هر دو دوره، میانگین کمینه وزن

نواحی کشور با خطر پذیری بالا از این مخاطره جوی در آینده کاسته خواهد شد و بر سهم نواحی با خطرپذیری خیلی کم تا متوسط به مقدار ۲۴,۵ درصد افزوده خواهد شد. بهر حال این نتایجی می باشد که برگرفته از خروجیهای مدل CanEMS<sup>۲</sup> و سناریوی RCP<sup>۴,۵</sup> می باشد. هر چند که انتظار می رود که حتی با همین مدل CanEMS<sup>۲</sup> و صرفاً بر مبنای سناریویهای مختلف بدینانه و خوش بینانه، تغییرات قابل ملاحظه ای حاصل شود. اگر در این راستا به کار روشن و همکاران (۲۰۱۹) که به ارزیابی اثر تغییر اقلیم با استفاده از مدل CanESM<sup>۲</sup> و سناریوهای مختلف RCP<sup>۲,۶</sup>, RCP<sup>۴,۵</sup>, و RCP<sup>۸,۵</sup> برای ایران انجام گرفت، توجه شود، مشخص می گردد که نتایج متنوعی بر مبنای سناریوهای انتخابی آنها حاصل شده است. به طوری که بر مبنای سناریوی RCP<sup>۲,۶</sup>, کمینه اثر گرمایش جهانی و با توجه به سناریوی RCP<sup>۸,۵</sup> بیشینه تغییرات افزایشی دما برای شهرهای مورد مطالعه استحصال شده است.

همانگونه که از یافته‌ها مشاهده شد، علی رغم کاهش مساحت مناطق با خطرپذیری بالای ریسک حرارتی برای دهه‌های آینده، اما تاثیر گرمایش جهانی بر روی الگوی اقلیمی ایران باعث افزایش میانگین فراوانی استرس حرارتی برای دهه‌های آینده خواهد شد. بطوری که از میانگین کلی ۵ شاخص بیوکلیمایی این نکته استخراج گردید که این میانگین برای دوره پایه ۶۶ روز و برای دهه‌های آینده به ۶۸ روز افزایش خواهد یافت. همچنین یافته‌ها نشان دادند که آستانه‌های کمینه و بیشینه رخداد استرس حرارتی برای دهه ی آینده یک نرخ افزایشی در قیاس با دوره پایه نشان می‌دهد. همانگونه که برای دوره پایه نوسان بین حداقل و حداکثر استرس حرارتی بترتیب بین ۵۷ و ۷۶ روز می‌باشد، حال آنکه این نرخ برای آینده شامل ۶۰ تا ۸۱ روز است. همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان دادند که برای ۵۲ درصد از ایستگاه‌های مطالعاتی، فراوانی رخداد استرس حرارتی در آینده برای آنها افزایش خواهد یافت. همانطوری که ملاحظه شد که بیشترین نرخ کاهش استرس حرارتی بطور

بترتیب برای دوره پایه و آینده با مقادیر ۰/۱۲ و ۰/۰۹ متعلق به شاخص THI بوده است. پس این وزن کمتر باعث شده که از نظر تشابه بین نقشه نهایی خطر با نقشه THI کمترین تشابه ملاحظه شود. سپس شاخص TEK با مقادیر وزن‌های ۰/۱۳ و ۰/۱۱ بترتیب برای دوره پایه و آینده در جایگاه بعدی قرار دارد. همچنین این اوزان برای دوره پایه و آینده در مورد شاخص AT مشترکاً شامل ۰,۱۵ بوده و برای WBGT مقادیر ۰/۱۷ و ۰/۲۶ را شامل شده و در نهایت بیشترین وزنها با مقادیر ۰/۴۳ برای دوره پایه و ۰/۳۸ برای آینده مربوط به CP است. لذا دیده می‌شود که نقشه نهایی ریسک استرس حرارتی، مخصوصاً برای دوره پایه الگوی تقریباً مشابه با شاخص CP دارد. هر چند که از شدت این تشابه بین نقشه خطر ریسک با نقشه CP، با توجه به کاهش وزن CP برای دوره آینده کمتر شده است. در مجموع نتایج مدلسازیها برای دوره پایه و مخصوصاً دهه‌های آینده نشان داد که منجمله مناطق با خطرپذیری بالای ریسک استرس حرارتی نواحی ساحلی جنوب ایران می باشد. بطوری که این فرض وجود دارد که با افزایش دمای هوا برای دهه‌های آینده، ظرفیت پذیرش رطوبت در این نواحی بالا رود. پس رطوبت بیشتری از بدنه آبی خلیج فارس و دریای عمان به اتمسفر تزریق خواهد شد. لذا ترکیب دو عامل افزایش دما و رطوبت نسبی شرایط استرس حرارتی را برای این نواحی تشدید خواهد کرد. بهر حال در یافته‌های برخی پژوهش‌های مشابه در ایران، این نواحی را بعنوان مناطق با ریسک بالای تاثیرپذیری از گرمایش جهانی و افزایش استرس‌های حرارتی معرفی نموده‌اند (Roshan, et al., ۲۰۱۶; Roshan, et al., ۲۰۱۸; Roshan and Nastos, ۲۰۱۸).

خروجی‌های این کار تحقیقاتی با توجه به تولید نهایی نقشه خطر ریسک استرس حرارتی نشان داد که برای دوره پایه، مناطق با طبقات ریسک زیاد و ریسک خیلی زیاد مجموعاً مساحتی تقریباً معادل ۷۰ درصد از کل کشور را شامل شده اند. اما برای دهه‌های آینده مجموع سهم این دو طبقه به میزان ۲۴,۵ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد داشت. بنابراین سهم

گردش عمومی جو، مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین پیشنهاد می‌شود که در مطالعات بعدی، اثر سایر سناریوهای بدبینانه و خوش بینانه در الگوی فضایی- زمانی رخداد استرس حرارتی مورد پایش و پیش یابی قرار گیرد تا بهتر بتوان راهکارهای مدیریتی مناسبی برای کاهش اثرات سوء این بلای جوی، در حوزه‌های مختلف انسانی- طبیعی برای نواحی مختلف ایران ارائه نمود.

### منابع

۱. دوستان، رضا. ۱۳۹۴. تحلیل فضایی- زمانی امواج گرمایی خراسان رضوی. جغرافیایی سرزمین، شماره ۴۷: ۳۲-۱۷.
۲. ذوالفقاری، حسن. ۱۳۸۹. آب و هواشناسی توریسم، انتشارات سمت.
۳. علیجانی، بهلول. ثروتی، محمدرضا. ویلنی، عمران علی زاده. ۱۳۹۲. طبقه بندی موج گرما در استان گیلان. جغرافیای طبیعی، شماره ۱۹: ۱۶-۱.
۴. کرم پور، مصطفی. رفیعی، جعفر. جعفری، ایوب. ۱۳۹۶. شناسایی و تحلیل سینوپتیکی امواج گرمایی غرب ایران (ایلام، خوزستان، لرستان، کرمانشاه)، مدیریت مخاطرات محیطی، شماره ۳: ۲۷۹-۲۶۳.
۵. مجرد، فیروز. معصوم پور، جعفر. رستمی، طیبه. ۱۳۹۴. تحلیل آماری- همدیدی امواج گرمایی بالای ۴۰ درجه سلسیوس در غرب ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۱۳: ۵۸-۴۱.
۶. Abbasnia, M., Tavousi, T. and Khosravi, M. ۲۰۱۶. Assessment of future changes in the maximum temperature at selected stations in Iran based on HADCM<sup>۳</sup> and CGCM<sup>۳</sup> models. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* ۵۲: ۳۷۱-۳۷۷.
۷. Feizizadeh, B., Roodposhti, M.S., Jankowski P. and Blaschke, T. ۲۰۱۴. A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. *Computers & Geosciences*, ۷۳: ۲۰۸-۲۲۱.
۸. Iilanloo, M. ۲۰۱۱. A comparative study of fuzzy logic approach for landslide susceptibility mapping using GIS: An experience of Karaj dam basin in Iran.

مشترک برای رشت و مشهد شامل ۵ روز بوده، حال آنکه بیشترین نرخ افزایشی با ۱۳ و ۱۹ روز به ترتیب مربوط به اصفهان و زاهدان محاسبه گردیده است. در نهایت نتایج این تحقیق نشان دادند که اثر تغییر اقلیم بر ایران، منجر به تغییر الگوی فضایی- زمانی رخداد استرس‌های حرارتی خواهد شد. همانطور که کاهش خطر در برخی مناطق با افزایش خطرپذیری برای نواحی دیگری همراه خواهد بود. اما در این مطالعه صرفاً یک سناریو میانه و فقط از خروجی‌های یک مدل

- Procedia Social and Behavioral Sciences, ۱۹: ۶۶۸-۶۷۶.
۹. Kourgialas, N.N., George P. and Karatzas, G.P. ۲۰۱۱. Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—a case study. *Hydrological Sciences Journal*, ۵۶(۲): ۲۱۲-۲۲۵.
۱۰. Karandish, F. and Mousavi, S.S. ۲۰۱۸. Climate change uncertainty and risk assessment in Iran during twenty-first century: evapotranspiration and green water deficit analysis, *Theor Appl Climatol* ۱۳۱: ۷۷۷.
۱۱. Nikolova, V. and Zlateva, P. ۲۰۱۸, Geoinformation approach for complex analysis of multiple natural Hazard, *The international archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-۳/W۴, ۲۰۱۸ *GeoInformation For Disaster Management (GiDM)*, ۱۸-۲۱ March ۲۰۱۸, Istanbul, Turkey
۱۲. Nikolova V. and Zlateva P. ۲۰۱۹. Complex Geoinformation Analysis of Multiple Natural Hazards Using Fuzzy Logic. In: Altan O., Chandra M., Sunar F., Tanzi T. (eds) *Intelligent Systems for Crisis Management. GiDM* ۲۰۱۸. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Springer, Cham.
۱۳. Roshan, GH., Ghanghermeh, A. and Grab, S.W. ۲۰۱۸. Testing a new application for TOPSIS: monitoring drought and wet periods in Iran *Theor Appl Climatol*, ۱۳۱: ۵۵۷.
۱۴. Roshan, Gh., Saleh Almomenin, H., Hirashima, S. and Attia, S. ۲۰۱۹. Estimate of outdoor thermal comfort

- zones for different climatic regions of Iran, *Urban Climate* ۲۷ (۲۰۱۹) ۸-۲۳
۱۵. Roshan, G.H. and Nastos, P.T. ۲۰۱۸. Assessment of extreme heat stress probabilities in Iran's urban settlements, using first order Markov chain model *Sustainable Cities and Society*, ۳۶: ۳۰۲-۳۱۰.
۱۶. Roshan, G.R., Yousefi, R., Kovács, A. and Matzarakis, A. ۲۰۱۸. A comprehensive analysis of physiologically equivalent temperature changes of Iranian selected stations for the last half century. *Theoretical and Applied Climatology*, ۱۳۱: ۱۹-۴۱.
۱۷. Roshan, G.H., Yousefi, R. and Fitchett, J. ۲۰۱۶. Long-term trends in tourism climate index scores for ۴۰ stations across Iran: the role of climate change and influence on tourism sustainability. *International Journal of Biometeorology*, ۶۰: ۳۳-۵۲.
۱۸. Rahimi, J., Ebrahimpour, M. and Khalili, A. ۲۰۱۳. Spatial changes of Extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran, *Theor Appl Climatol* ۱۱۲: ۴۰۹.
۱۹. Shannon, C.E. ۱۹۴۸. "A Mathematical Theory of Communication", *Bell System Technical Journal*, ۲۷(۳): ۳۷۹-۴۲۳.
۲۰. Steadman, R.G. ۱۹۸۴. A universal expression of apparent temperature. *J. Appl. Meteor.* ۲۳: ۱۶۷۴-۸۷.
۲۱. Steadman R.G. ۱۹۷۹. The assessment of sultriness. Part I: a temperaturehumidity index based on human physiology and clothing science. *J Appl Meteorol* ۱۸: ۸۶۱-۸۷۳.
۲۲. Steadman, R.G. ۱۹۹۴. Norms of apparent temperature in Australia. *Aust. Met. Mag.* ۴۳: ۱-۱۶.
۲۳. Watts. D. and KalKstein, S. ۲۰۰۴. The develop Ment of a warm-Weather relative stress index for invironmental application, *Journal of applied meteorology*, ۴۳: ۵۰۳-۵۱۳.