

## شبیه سازی اثر تغییر اقلیم بر تنش‌های گرمایی در ناحیه خزری

محمدسعید نجفی<sup>\*۱</sup>

استادیار پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۹/۰۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۹/۴/۰۳

### چکیده

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تنش گرمایی توسط شاخص‌های (pHSI) و فشار فیزیولوژیک (pPhS) در ناحیه خزری در دهه‌های آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) مبتنی بر نتایج مدل‌های گردش کلی و منطقه ای و تحت سناریوهای انتشار گزارش پنجم هیئت بین دول تغییر اقلیم می‌باشد. به منظور ارزیابی شاخص‌های فشار فیزیولوژیک دمایی در آینده از داده‌های مدل GFDL-ESM2M مبتنی بر روش ریزگردانی دینامیکی با استفاده از مدل RegCM و بر اساس سه سناریو نشانگر خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP) استفاده شده است. مقایسه آماری بین دمای شبیه سازی شده با مشاهداتی (۲۰۱۷-۱۹۹۷) در ایستگاه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که ضریب تعیین محاسبه شده در متوسط تمامی ایستگاه‌ها بزرگتر از ۰/۹۳ است و متوسط شاخص میانگین اریب خط (MBE) در تمامی ایستگاه‌ها کمتر از ۲ می‌باشد که نشان از عملکرد مناسب مدل در شبیه سازی متغیرهای مورد مطالعه می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در فصول پاییز و بهار وضعیت استرس گرمایی به شکل جزئی و ملایم تغییر پیدا کند. وضعیت شاخص در دوره پایه (۲۰۱۷-۱۹۹۷) برای این دو فصل فاقد تنش گرمایی بوده است. برای فصل تابستان در تمامی ایستگاه‌ها استرس گرمایی شدید وجود خواهد داشت. این شاخص برای فصل زمستان استرس گرمایی جزئی را برای دهه‌های آتی نشان می‌دهد. بطور کلی بیشترین تغییر در وضعیت تنش گرمایی مربوط به ایستگاه گرگان خواهد بود. شاخص فشار فیزیولوژیک نیز نشان می‌دهد که در دهه‌های آتی نیز در فصل زمستان در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه فشار ملایم گرمایی وجود خواهد داشت. در بهار شاخص فشار فیزیولوژیک خنثی (فشار جزئی) و پاییز فشار گرمایی جزئی خواهد بود و در فصل تابستان شاخص فشار فیزیولوژیک فشار گرمایی شدید را نشان می‌دهد. بطور کلی تغییرات اقلیمی منجر به تشدید تنش‌های حرارتی در دوره گرم سال در منطقه مورد مطالعه خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** شاخص تنش گرمایی، شاخص فشار فیزیولوژیک، تغییرات آب و هوایی، RegCM، ناحیه خزری.

### مقدمه

گرفتن انسان در معرض گرمای شدید است (دی فریتاس، ۱۹۸۵: ۱۵). مشاهدات متعددی و مدل‌سازی‌های مختلف تأیید می‌نمایند که اقلیم زمین نسبت به گذشته، گرمتر شده است. این امر به نوبه خود زمینه را جهت افزایش امواج گرمایی فراهم می‌نماید (IPCC، ۲۰۰۷) به طوری که در کشور در پنجاه سال اخیر میانگین دمای کشور با شیبی حدود ۱/۴ درجه بر دهه افزایش یافته است و در برخی ایستگاه‌های هواشناسی کشور، نرخ افزایشی دمای حداقل تا ۴ برابر بیش از نرخ افزایشی دمای حداکثر ثبت شده است (دفتر ملی هیات بین‌الدولی تغییر اقلیم، ۱۳۹۶). افزایش دما بر روی بخش‌های مختلف زندگی

تنش گرمایی<sup>۱</sup> عبارت است از وضعیتی که حرارت ورودی بدن انسان به همراه گرمای تولید شده در بدن بیش از گرمایی باشد که از بدن به محیط اطراف منتقل می‌شود (حاجی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۴۸). روابط بین محیط و آسایش انسان را می‌توان با استفاده از شاخص‌های زیست‌هواشناسی تحلیل کرد و این شاخص‌ها اثر عوامل و عناصر مختلف اقلیمی را بر شرایط فیزیولوژیکی بدن انسان را در قالب طبقه‌بندی عددی بیان می‌نمایند. از این منظر تنش گرمایی قرار

\*نویسنده مسئول: m.s.najafi1367@gmail.com

تا پایان قرن بیست و یکم از حد آستانه خود بیشتر نخواهد شد. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تنش گرمایی توسط شاخص‌های (pHSI) و فشار فیزیولوژیک (pPhS) در ناحیه خزری در دوره گذشته (۲۰۱۷-۱۹۹۷) و دهه‌های آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) می‌باشد تا تأثیر گرمایش جهانی بر تنش‌های گرمایی در این ناحیه از کشور مورد ارزیابی قرار گیرد.

### مواد و روش‌ها

**مدل دینامیکی سیالات ژئوفیزیکی (GFDL):** مدل GFDL یک مدل گردش جو عمومی ساخت طراحی کشور ایالات متحده برای جو، اقیانوس‌ها، زمین و یخ دریا است. هدف مدل این است که مسائل در حال ظهور در دگرگونی آب و هوایی، از جمله تعاملات هواویز-ابر، تعامل شیمیایی-آب و هوا و اتصال بین تروپوسفر و استراتوسفر، را در بر گیرند. این مدل همچنین به‌عنوان جزء سیستم‌های فیزیکی، سیستم مدل زمین و مدل پیش‌نگری‌های دهه‌های آینده نزدیک طراحی شده است.

به‌منظور ارزیابی شاخص‌های فشار فیزیولوژیک دمایی در آینده از داده‌های مدل GFDL-ESM2M مبتنی بر روش ریزگردانی دینامیکی بر اساس سه سناریو نشانگر خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP) که اطلاعات کامل آن در جدول (۱) استفاده شد.

**ریزمقیاس گردانی:** به منظور ریزمقیاس گردانی داده‌های مدل گردش کلی مورد استفاده از مدل RegCM4<sup>۲</sup> استفاده شد. نسخه اولیه این مدل در حقیقت تکامل یافته مدل عددی MM4<sup>۳</sup> است. به نقل از مفیدی و همکاران (۱۳۹۲) سل اول مدل متوسط مقیاس اقلیم مرکز ملی تحقیقات جوی<sup>۴</sup> بر پایه مدل متوسط مقیاس MM4 در دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا در اواخر دهه ۱۹۸۰ ساخته شد (Dickinson et al., 1989; Giorgi, 1989, 1993).

بشر از قبیل سلامت، منابع هیدرولوژیکی، کشاورزی، صنعت و اقتصاد تأثیر گذار است که در این میان بحث تأثیر بر سلامت انسان دارای جایگاه ویژه‌ای است (کی جلاستروم، ۲۰۰۹: ۱۳۱).

مطالعات مختلفی در زمینه بررسی اثر گرمایش جهانی بر تنش‌های گرمایی در نواحی مختلف کشور انجام شده است. حیدری و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی وضعیت تنش‌های گرمایی در کشور در اقلیم‌های مختلف و در فصول گرم سال پرداختند. در این مطالعه از شاخص استرس گرمایی استاندارد و دمای تر گویشان<sup>۱</sup> استفاده شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در فصل تابستان اکثر نواحی اقلیمی کشور در بین ساعات ۱۲ تا ۱۵ وضعیت تنش گرمایی در گستره غیر مجاز قرار دارند و این شرایط با حرکت از سمت شمال به مرکز و جنوب کشور بیشتر هم می‌شود. تعداد ساعات تنش گرمایی در نواحی جنوبی و مرکزی بیش از شمال و شمال غربی کشور است. فلاح قاله‌ری و همکاران (۱۳۹۵) به ارزیابی تغییرات تنش گرمایی در نواحی مختلف اقلیمی کشور در ۵۰ سال گذشته پرداختند و نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که روند تغییرات وقوع روزهای همراه با تنش گرمایی در شهرهای مشهد، اصفهان و تبریز افزایشی بوده است. بیشترین فراوانی روزهای گرم مربوط به شهرهای بندرعباس و رشت بوده است و دهه ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ بیشترین روزهای وقوع تنش گرمایی را به خود اختصاص داده است. عسگری و همکاران (۱۳۹۶)، به بررسی اثر تغییر اقلیم بر شاخص گرمایی (THI) در گستره ایران پرداختند و نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در دوره گرم سال دهه‌های آتی مساحت پهنه‌های توأم با تنش گرمایی افزایش خواهد یافت و در فصول پاییز و زمستان با وجود افزایش در میانگین فصلی شاخص THI، شاخص

2. Regional Climate Model  
3. Mesoscale Model Version 4  
3. National Center for Atmospheric Research

1. WBGT Wet bulb globe temperature

جدول ۱: جدول سه سناریوی انتشار: نشانگر خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP) (ون ورن و همکاران، ۲۰۱۱)

سناریو	نیروی تابشی ( $m^2w$ )	$CO_2$ (ppm)
RCP 2.6	حداکثر ۳ وات بر متر مربع است و بعد از سال ۲۱۰۰ کاهش می یابد	490 ppm از سال ۲۱۰۰ و سپس کاهش می‌بد
RCP 4.5	۴/۵ وات بر متر مربع و بعد از سال ۲۱۰۰ ثابت می ماند	۶۵۰ ppm و بعد از سال ۲۱۰۰ ثابت می‌ماند
RCP 8.5	بیشتر از ۸/۵ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰	۱۳۷۰ ppm در سال ۲۱۰۰

جدول ۲: پیکربندی مورد استفاده برای ریزمقیاس گردانی داده‌های مدل گردش کلی به وسیله مدل RegCM

مدل	ReGCM4.7 (Georgi et al., 2016)
قدرت تفکیک افقی	20 km
ابعاد (X;Y)	88, 64
تعداد سطوح قائم	23
داده‌ها	Boundary conditions: GFDL-ESM2M
	SST: GFDL-ESM2M
	Emission scenarios: Reference(RF), RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
گام زمانی	10 min for surface parameter files, 150 s for the dynamical time step 6 h updating for initial and lateral boundary conditions
دوره شبیه‌سازی	1997-2017 and 2020-2040
دوره تطبیق	Two Years:1995 - 1997
طرح‌واره‌های فیزیکی	Lateral Boundary conditions scheme: Relaxation, exponential technique. Boundary layer scheme: Holtslag PBL (Holtslag, 1990) Cumulus convection scheme Over Land and Ocean: (Grell, 1994) Moisture scheme: Explicit moisture (SUBEX; Pal et al 2000)
مدل سطح زمین	CLM 4.5

pPhS Approximated physiological strain in man

مدل برای دو بازه زمانی ۲۰۱۷-۱۹۹۷ (دوره پایه) و ۲۰۴۰-۲۰۲۰ (دوره آینده) و بر اساس پیکر بندی ارائه شده در جدول (۲) اجرا شد. دوره پایه برای واسنجی توانمندی‌های مدل و دوره آینده برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر تنش‌هایی گرمایی در ناحیه خزری اجرا گردید. روش پس پردازش برونداد مدل نیز روش میانگین متحرک (MA) می‌باشد که برای نخستین بار توسط مک کالر و استال (۲۰۰۸) ارائه شد. در نهایت برای محاسبه تنش‌های گرمایی، از مقادیر پس پردازش شده استفاده شد.

مقادیر تقریبی (با خطای کوچکتر از ۱۰ درصد) شاخص فشار فیزیولوژیک (pPhS) با استفاده از معادلات ساده شده مطابق مدل MENEX\_2002 تبادل گرمایی انسان-محیط بلازجسزیک محاسبه می‌شود. در این معادله  $t$  دما می‌باشد.

$$pPhS = (2.12513 - 0.058018 t)^2 \quad (1) \text{ رابطه (۱)}$$

برای استفاده از مدل MM4 جهت اهداف اقلیمی بلندمدت، یک سری پارامترهای فیزیکی که بیشتر در ارتباط با تابش و فیزیک سطح زمین هستند اصلاح شدند که منجر به ایجاد اولین نسخه RegCM شد (Giorgi and Bates, 1989). نسخه اول شامل طرح‌واره‌ی برهمکنش هوا کره - زیست‌کره (BATS)<sup>۱</sup> برای نمایش پردازش سطح (Dickinson et al, 1986)، طرح‌واره تبادل تابشی از نسخه‌ی ۱ مدل هم پیوند اقلیمی (CCM1)<sup>۲</sup>، طرح‌واره لایه‌مرزی محلی متوسط مقیاس، طرح‌واره فرارفت ابر کومه‌ای نوع کو<sup>۳</sup> (Anthes, 1977) و طرح‌واره آشکارسازی رطوبت (Hsie et al., 1984) می‌باشد.

1. Biosphere – Atmosphere Transfer Scheme
2. Community Climate Model version 1
3. Kuo

جدول ۳: مقیاس شدت فشار فیزیولوژیک (دهقان و همکاران، ۲۰۱۵)

تعریف	pPhS آستانه
فشار شدید گرمایی	below 0.0
فشار زیاد گرمایی	from 0.00 to 0.24
فشار ملایم گرمایی	from 0.25 to 0.74
خنثی (فشار جزئی)	from 0.75 to 1.50
فشار ملایم سرمایی	from 1.51 to 4.00
فشار زیاد سرمایی	from 4.01 to 8.00
فشار شدید سرمایی	above 8.00

pHSI Approximated heat stress index %

مقادیر تقریبی (با خطای کوچکتر از ۱۵ درصد) شاخص استرس گرمایی (pHSI) به درصد) با استفاده از معادلات ساده شده مطابق مدل MENEX\_2002

تبادل گرمایی انسان - محیط بلازجسزیک محاسبه می‌شود.

رابطه (۲)  $pHSI = 18.6058 - 24.7164 \ln(pPhS)$

جدول ۴: آستانه‌های پاسخ‌های فیزیولوژیک بر اساس شاخص استرس گرمایی pHSI (دهقان و همکاران، ۲۰۱۵)

واکنش‌های فیزیولوژیک	آستانه
استرس جزئی سرمایی	زیر صفر
شرایط خنثی دمایی	از صفر تا ۱۰
استرس گرمایی جزئی و ملایم	از ۱۰ تا ۳۰
استرس گرمایی شدید، خطر سلامتی برای افراد خونگرفته	از ۳۰ تا ۷۰
استرس گرمایی بسیار شدید، ذخیره آب و مواد معدنی ضروری است	از ۷۰ تا ۹۰
حداکثر استرس گرمایی که افراد جوان و خوگرفته می‌توانند تحمل کنند	از ۹۰ تا ۱۰۰
خطر گرمزدگی ارگانیسیم، زمان حضور در هوای آزاد باید کنترل شود.	بالای ۱۰۰

#### محدوده مورد مطالعه

در این مطالعه به بررسی شاخص‌های ذکر شده در ناحیه خزری و ایستگاه‌های بندرانزلی، رشت، رامسر، بابلسر و گرگان پرداخته می‌شود.

#### یافته‌ها

آماره‌های واسنجی داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل GFDL-ESM2M: آشکار سازی اثرات تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در برنامه‌های راهبردی بخصوص در بخش اقلیم گردشگری و سلامت در قرن حاضر محسوب می‌شود. در این راستا تغییرات دوره گذشته برای دوره آماری ۲۰۱۷-۱۹۹۷ بررسی شد. در ادامه داده‌های آینده ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ میلادی با استفاده از ۳ آماره صحت‌سنجی با استفاده از مدل GFDL-ESM2M - RegCM مورد ارزیابی قرار

گرفت. نتایج نشان داد که مدل GFDL-ESM2M - RegCM از توانایی بالایی به منظور ارزیابی دمایی برخوردار می‌باشد. نتایج ارائه شده بر اساس سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 ارائه شده‌اند که جدول (۱) به ترتیب نتایج ارزیابی داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل GFDL-ESM2M تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ را نسبت به دوره پایه (۱۹۹۷ تا ۲۰۱۷) را نشان می‌دهند.

همانطور که گفته شد از سه روش برای ارزیابی دقت مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده استفاده شده است که عبارتند از: ضریب تعیین:  $R^2$ ، میانگین اریب خط:  $MBE$  و خطای برآورد (ریشه دوم میانگین مربعات):  $RMSE$ . معیار ارزیابی  $MBE$  بیانگر میانگین انحراف است. این معیار علاوه بر دارا بودن

استفاده از ضریب تعیین محاسبه شد در تمامی ایستگاه‌ها بزرگتر از ۰/۹۳ است. به عبارت دیگر مدل RegCM - GFDL-ESM2M بیش از ۹۳ درصد واریانس دمای مشاهداتی را در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی، توصیف می‌کند. این مقدار در ایستگاه گرگان بیش از ۰/۹۸ است که بیانگر ارتباط خوب مدل RegCM- GFDL-ESM2M است.

میانگین اریبی خطا (Bias) در سه ایستگاه بندر انزلی، گرگان و رشت منفی و بابلسر و رامسر مثبت برآورد گردید. بر اساس نتایج در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه مقدار شاخص MBE کمتر از ۲ است حتی در برخی از ایستگاه‌ها همچون بندرانزلی، بابلسر و رامسر کمتر ۱ می‌باشد. ارزیابی سه شاخص مورد مطالعه نشان داده است مدل GFDL-ESM2M و RegCM- پیکربندی مورد استفاده از توانایی مناسبی برای برآورد دما در حوزه اقلیم خزری برخوردار است.

**ارزیابی شاخص شاخص استرس گرمایی (pHSI) در پهنه اقلیم خزری تحت تغییرات آب و هوایی:** شاخص استرس گرمایی (pHSI) در پنج ایستگاه و سه سناریو مورد مطالعه در جدول (۶) ارائه شد. بر اساس نتایج ارائه شده در دوره مشاهداتی در فصل زمستان، تمامی ایستگاه‌ها شاخص کمتر از منفی ۳ است؛ که مبین استرس جزئی سرمایی است. بیشینه استرس سرمایی با ۶/۲۴- در ایستگاه رشت اتفاق است و کمینه همین مقدار با ۳/۶۹- در بابلسر بدست آمده است علت این کاهش در ایستگاه بابلسر به دلیل ساحلی بودن ایستگاه و ارتفاع ۲۷- متری آن سطح دریا می‌باشد و نقش تعدیلی دریا در دمای هوا در ایستگاه قابل توجه است.

در شرایط آینده بر اساس سناریو خوشبینانه RCP2.6 مقدار شاخص به ۶/۳۳- بر اساس سناریو RCP4.5 به ۵/۶۴- و در نهایت بر اساس سناریو RCP8.5 به ۲/۲۵- خواهد رسید بر خلاف دو سناریو پیشین در این سناریو (RCP8.5) شاخص استرس گرمایی (pHSI) در دوره مدلسازی شده آینده کمتر از دوره مشاهداتی است.

علامت مثبت (بیش برآوردی مدل) و یا منفی (کم برآوردی مدل) مقدار انحراف از مقادیر مشاهداتی را نیز نشان می‌دهد که برآورد مدل خوب بوده و در آن هیچ گونه انحرافی وجود ندارد. معمولاً هر قدر مقدار این دو معیار و همچنین ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) کمتر باشد صحت روش بیشتر است. از نظر تئوری هر گاه این دو معیار برابر صفر شوند نمایانگر این است که مقدار شبیه سازی شده یک کمیت دقیقاً برابر مقدار واقعی آن است. شاخص ریشه متوسط مربع خطا کارایی بسیار بالایی در صحت سنجی دارد و در اکثر پژوهش‌ها نیز این شاخص استفاده می‌شود، چنانچه مقادیر این شاخص کمتر از ۱۰ باشد شبیه سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ متوسط و بیشتر از ۳۰ ضعیف خواهد بود (لشکری و همکاران، ۱۳۹۴).

همانطور که در جدول (۵) آمده است در تمامی ایستگاه‌ها و سه سناریو مورد مطالعه مقادیر شبیه سازی دما از کارایی بسیار بالایی برخوردار می‌باشند، بطوریکه در تمامی ایستگاه‌ها و سناریوها مقدار RMSE برای دو پارامتر نامبرده کمتر از ۲ می‌باشد و در برخی از ایستگاه‌ها همچون رشت این مقدار ۱/۹۳ می‌باشد که نشان‌دهنده دقت بالایی در مدل سازی می‌باشد. البته ذکر این نکته ضروری است که در ایستگاه‌های ساحلی همچون بندرانزلی و بابلسر که مقدار RMSE بالایی را نشان داده است. این مقدار به معنی این نمی‌باشد که در بندر انزلی و بابلسر مدلسازی انجام شده دارای ضعف می‌باشد بلکه باید به ماهیت آب و هوایی و تغییرپذیری بالای این پارامتر اشاره کرد. همچنین باید در نظر داشت از آنجا که مقدار RMSE تابعی از دامنه مقدار دما در هر ایستگاه است، مقدار زیاد RMSE در ایستگاه‌های ساحلی منطقه مورد مطالعه به سبب دمای بیشتر نسبت به سایر ایستگاه‌هاست تا ارتباط ضعیف بین دما واقعی و مدلسازی شده.

مقایسه آماری بین داده‌های شبیه سازی شده با مدل RegCM- GFDL-ESM2M و داده‌های مشاهداتی دما در ایستگاه‌های مورد بررسی که با

جدول ۵: مقادیر ضریب تعیین ( $R^2$ )، شاخص ریشه متوسط مربع خطا (RMSE) و میانگین اریبی خطا (MBE) داده‌های

مشاهداتی و مدل‌سازی شده متغیر دما مبتنی بر مدل RegCM - GFDL-ESM2M

نام ایستگاه	فصل	سناریو RCP 2.6	سناریو RCP 4.5	سناریو RCP 8.5
بندر انزلی	$R^2$	۰/۹۵۷	۰/۹۵۶	۰/۹۶۳
	RMSE	۲/۰۱۶	۲/۰۱۶	۱/۸۹۸
	MBE	-۰/۴۳۳	-۰/۴۳۳	-۰/۷۹۳
بابلسر	$R^2$	۰/۹۳۹	۰/۹۴۱	۰/۹۴۳
	RMSE	۲/۰۹۵	۱/۹۸۲	۱/۸۲۵
	MBE	۰/۷۴۸	۰/۷۷۷	۰/۳۴۷
گرگان	$R^2$	۰/۹۸۲	۰/۹۸۷	۲/۹۸۵
	RMSE	۱/۹۴۲	۱/۷۵۸	۱/۶۵۴
	MBE	-۱/۴۶۰	-۱/۳۶۲	-۱/۴۳۲
رامسر	$R^2$	۰/۹۵۱	۰/۹۷۵	۰/۹۸۲
	RMSE	۱/۹۹۵	۱/۸۷۹	۱/۷۹۸
	MBE	۰/۱۱۲	۰/۱۲۵	۰/۱۱۸
رشت	$R^2$	۰/۹۵۷	۰/۹۶۱	۰/۹۶۳
	RMSE	۱/۹۳۰	۱/۹۲۴	۲/۰۹۶
	MBE	-۰/۵۲۰	-۰/۹۱۴	-۱/۲۸۶

pHSI می‌باشد. در بین ایستگاه‌های مطالعاتی در ایستگاه گرگان در شرایط تغییر اقلیم مدل‌سازی شده شاخص در هر سه سناریو مورد مطالعه بیش‌تر ۳۰ خواهد شد که نشان‌دهنده شرایط استرس گرمایی شدید، خطر سلامتی برای افراد خونگرفته خواهد بود. در ایستگاه رشت، رامسر و بندر انزلی نیز مقدار شاخص pHSI افزایشی خواهد بود. تنها در ایستگاه بابلسر مقدار شاخص استرس گرمایی کاهش‌ی خواهد بود. در فصل تابستان در تمامی ایستگاه‌ها استرس گرمایی شدید، خطر سلامتی برای افراد خونگرفته بدست آمده است. کمینه استرس گرمایی با ۳۷/۱۲ در ایستگاه رشت و بیشینه استرس گرمایی در در ایستگاه گرگان با ۴۸/۱۲ بدست آمده است. به غیر از ایستگاه بابلسر که مقدار pHSI در تحت سناریوهای تغییر اقلیم کاهش می‌یابد در سایر ایستگاه مقدار شاخص افزایشی خواهد بود. در فصل تابستان بیشینه تغییرات در آینده برای ایستگاه گرگان خواهد بود در مقابل در ایستگاه بابلسر مقدار شاخص pHSI کاهش‌ی خواهد بود.

شرایط خنثی دمایی بر اساس شاخص pHSI در تمامی ایستگاه‌ها در دوره مشاهداتی و مدل‌سازی شده آینده در فصل پاییز مشاهده شد. ایستگاه‌های رشت و گرگان شرایط خنثی دمایی بترتیب ۳/۴۰ و ۴/۶۹ برآورد گردید. در شرایط مدل‌سازی شده آینده این مقدار برای هر سه سناریو در ایستگاه‌های مطالعاتی افزایشی خواهد بود که انتظار می‌رود در ادامه قرن این شرایط برای فصل پاییز به استرس گرمایی جزئی و ملایم تغییر پیدا کند. در مقابل در ایستگاه بندر انزلی و بابلسر در دو سناریو خوش بینانه (RCP4.5) و حد واسط (RCP4.5) مقدار شاخص pHSI در آینده نسبت به دوره مشاهداتی کمتر خواهد شد و در سناریو بدبینانه (RCP8.5) مقدار شاخص در هر دو ایستگاه بندرانزلی و بابلسر و که تغییر از شرایط مشابهی (ساحلی بودن) برخوردار هستند افزایش خواهد یافت. در فصل بهار مقدار شاخص استرس گرمایی (pHSI) بین ۱۶/۹۷ تا ۲۱/۳۲ در نوسان است که بر این اساس بیشینه شاخص در ایستگاه بابلسر و کمینه آن در رامسر مشاهده شد. این شرایط دمایی نشان‌دهنده استرس گرمایی جزئی و ملایم در شاخص

جدول ۶: شاخص استرس گرمایی (pHSI) در اقلیم خزری مبتنی بر داده‌های مشاهداتی (۲۰۱۷-۱۹۹۷) و مدل‌سازی شده

RegCM-GFDL-ESM2M تحت مدل (۲۰۲۰-۲۰۴۰)

نام ایستگاه	فصل	دوره مشاهداتی	سناریو RCP 2.6	سناریو RCP 4.5	سناریو RCP 8.5
بندر انزلی	زمستان	-۵/۵۳۲	-۶/۵۳۱	-۶/۰۱۲	-۵/۸۸۶
	بهار	۱۷/۹۲۵	۲۲/۴۳۵	۲۲/۸۶۶	۲۳/۵۰۲
	تابستان	۴۰/۹۹۸	۴۵/۵۴۵	۴۴/۶۰۰	۴۷/۰۷۷
	پاییز	۵/۷۵۳	۴/۴۵۲	۴/۳۱۲	۵/۶۲۵
بابلسر	زمستان	-۳/۶۹۸	-۶/۳۳۸	-۵/۶۴۲	-۲/۲۵۶
	بهار	۲۱/۳۲۱	۲۰/۲۱۲	۱۹/۳۰۶	۲۰/۴۶۵
	تابستان	۴۴/۶۲۹	۴۱/۰۲۲	۴۰/۱۳۸	۴۲/۳۹۲
	پاییز	۶/۵۳۳	۵/۵۵۸	۵/۵۴۳	۶/۸۷۰
گرگان	زمستان	-۵/۰۵۵	-۴/۱۶۹	-۴/۱۰۲	-۳/۸۹۸
	بهار	۲۳/۳۰۹	۳۱/۰۸۲	۳۱/۳۶۵	۳۱/۴۵۸
	تابستان	۴۸/۱۲۳	۵۷/۲۵۷	۵۷/۴۵۸	۵۷/۸۶۹
	پاییز	۴/۶۹۳	۷/۷۶۴	۷/۴۵۸	۷/۸۳۶
رامسر	زمستان	-۵/۲۶۹	-۸/۰۴۵	-۸/۴۵۸	-۸/۹۴۷
	بهار	۱۶/۹۷۲	۱۸/۸۶۶	۱۸/۸۷۵	۱۸/۲۱۱
	تابستان	۴۰/۳۶۹	۴۲/۸۷۷	۴۳/۶۵۸	۴۴/۷۴۵
	پاییز	۵/۹۲۶	۵/۶۲۳	۵/۴۲۵	۵/۲۳۵
رشت	زمستان	-۶/۲۴۰	-۷/۰۹۸	-۵/۵۸۱	-۵/۲۲۶
	بهار	۱۸/۱۰۹	۲۲/۱۰۱	۲۲/۲۹۵	۲۳/۰۲۰
	تابستان	۳۷/۱۲۴	۴۱/۴۸۸	۴۳/۲۳۱	۴۵/۶۲۲
	پاییز	۳/۴۰۲	۳/۶۸۸	۴/۲۵۲	۵/۴۶۵

ارزیابی شاخص فشار فیزیولوژیک (pPhS) در پهنه اقلیم خزری تحت تغییرات آب و هوایی: شاخص فشار فیزیولوژیک (pPhS) در اقلیم خزری بر اساس داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده در جدول (۷) ارائه شد. در فصل زمستان در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه فشار ملایم سرمایی مشاهده گردید. بیشینه فشار ملایم سرمایی در ایستگاه رشت مشاهده شد. بر خلاف شاخص pHSI در شاخص pPhS از یک روند افزایشی و کاهشی همگام در این شاخص در آینده مشاهده نمی‌شود. بطوریکه در فصل زمستان در بندر انزلی در سناریوهای خوشبینانه تا بدبینانه شاخص فشار فیزیولوژیک روند افزایشی خواهد داشت. در ایستگاه بابلسر نیز در آینده شاخص pPhS نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد داشت. بطوریکه

تحت سناریو RCP2.6 مقدار شاخص افزایش ۰/۲۷ خواهد داشت اما در دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 شاخص نسبت به دوره مشاهداتی افزایش ۰/۱۹ و ۰/۱۵ خواهد داشت. با انتقال فصل از دوره سرد سال به گرم سال شاخص فشار فیزیولوژیک خنثی (فشار جزئی) خواهد شد. بیشینه شاخص فشار فیزیولوژیک بهاره بترتیب در ایستگاه‌های رامسر، بندر انزلی و بابلسر بدست آمده است در هر سه ایستگاه مورد مطالعه شاخص بالای یک شده است. بر اساس سناریوهای مورد مطالعه مدل GFDL-ESM2M در ایستگاه‌های مورد مطالعه شاخص کمتر از یک خواهد شد. فشار ملایم گرمایی در فصل تابستان در تمامی ایستگاه طی دوره ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۷ میلادی مشاهده شد. به غیر ایستگاه بابلسر شدت این فشار گرمایی

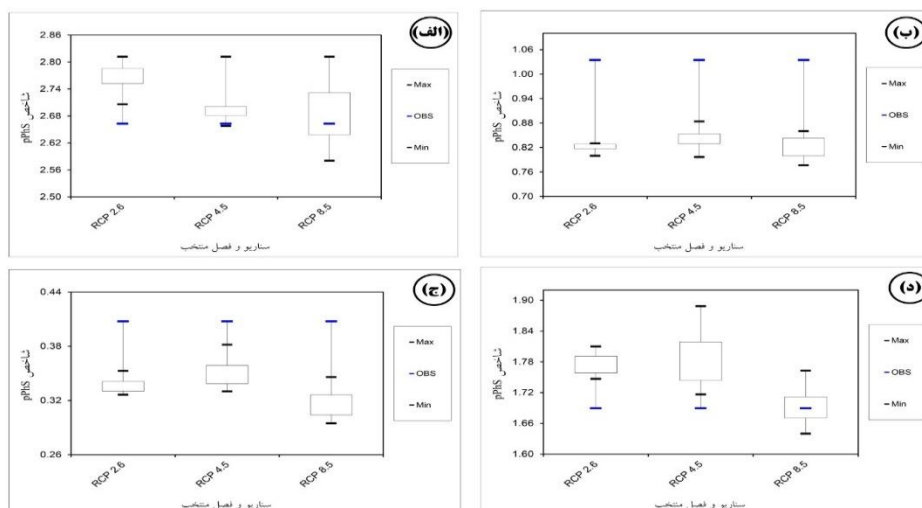
در فصل پاییز با کاهش دما شاخص فشار فیزیولوژیک (pPhS) در اقلیم خزری افزایشی خواهد بود بطوری‌که مقدار شاخص بین ۱/۶۳ تا ۱/۸۵ در نوسان است و نشان دهنده فشار ملایم‌سرمایی در منطقه مورد مطالعه است. در ایستگاه‌های بندر انزلی، رامسر و رشت مقدار شاخص فشار فیزیولوژیک (pPhS) در آینده افزایشی خواهد بود. در مقابل در ایستگاه گرگان مقدار شاخص در آینده کاهش خواهد بود. در ایستگاه بابلسر تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 افزایشی خواهد بود.

جهت مقایسه داده‌ها و تفکیک داده‌ها به‌طور کامل از نمودارهای جعبه‌ای<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. این نمودار با استفاده از یک مستطیل (باکس) دارای دو خط در دو طرف مستطیل می‌توان پارامترهای آماری میانه، چارک اول و سوم، کم‌ترین و بیش‌ترین اندازه مشاهده‌شده برای پارامتر مورد بررسی را رسم کند. با استفاده از این نمودار می‌توان مرکزیت، پراکندگی و چولگی داده‌ها را نیز تفسیر نمود. پس از گرفتن خروجی مدل ریزمقیاس مورد استفاده از داده‌های دما و محاسبه شاخص دمایی (مطابق با سه سناریو منتخب) نتایج باهم مقایسه شدند. شکل (۱) مقادیر شاخص فشار فیزیولوژیک (pPhS) شبیه‌سازی‌شده را برای ایستگاه بندر انزلی نمایش می‌دهد. همگام با نتایج ارائه شده در جدول (۷) در شکل (۱) که برای نمونه ایستگاه بندر انزلی آورده شده است در فصول بهار و تابستان مقدار شاخص pPhS کاملاً کاهش یافته است در مقابل در دو فصل زمستان و پاییز در دو سناریو RCP2.6 و RCP4.5 مقدار شاخص در آینده افزایش خواهد داشت. بر اساس نتایج ارائه شده برای سناریو RCP8.5 نیز این مقدار افزایشی خواهد بود اما به اندازه دو سناریو خوش‌بینانه و حد واسط نخواهد بود.

افزایش خواهد یافت. بیشینه تغییر شاخص فشار فیزیولوژیک در آینده مربوط به ایستگاه گرگان خواهد بود. بطوریکه مقدار شاخص تحت سناریو RCP2.6 به ۰/۲۰۹، در سناریو RCP4.5 به ۰/۱۸۹ و بر اساس سناریو بدبینانه RCP8.5 به ۰/۱۵۶ می‌رسد. بر این اساس شاخص pPhS در ایستگاه گرگان از فشار ملایم گرمایی در دوره مشاهداتی به فشار زیاد گرمایی در آینده تغییر خواهد کرد.

در بیشتر دوره گرم سال درجات متفاوتی از تنش‌های گرمایی را تجربه می‌کند. در فصل بهار محیط حرارتی راحت در فضای آزاد در اقلیم خزری فقط از طریق تنظیم شرایط بدنی و پوشش امکان‌پذیر است. مشکل اصلی از نظر آسایش حرارتی در اقلیم خزری حاکمیت تنش سرمایی است؛ این شرایط درازمدت تنش سرمایی (در دو فصل زمستان و پاییز) از جاذبه‌های حضور گردشگر می‌کاهد. البته باید توجه داشت با توجه به اقلیم گرم و مرطوب منطقه خزری شرایط آسایش در ماه‌های گرم سال در فصل تابستان نیز با تنش‌های گرمایی بسیار شدید همراه دارد. درواقع می‌توان اذعان داشت که در هر دو روش مورد مطالعه فصل بهار با در نظر گرفتن اختلاف زمانی بهترین فصول از لحاظ آسایش اقلیمی دانست که انسان در این فصل احساس آسایش می‌کند. اقلیم خزری در فصل پاییز تحت تأثیر سامانه‌های اقلیمی که از سمت شمال شرق وارد کشور می‌شوند قرار دارد و شرایط نامطلوبی را در این فصل به وجود می‌آورد و انسان در طی این فصل احساس عدم آسایش می‌کند. در فصل تابستان منطقه تحت استیلای شرایط گرمایی و رطوبتی بالایی است که باعث استقرار هوای بسیار گرم و خشک و پایدار به همراه شرایط رطوبتی و شرجی بالایی قرار دارد و این شرایط باعث آسمان صاف، تابش شدید آفتاب و افزایش شدید رطوبت نسبی می‌گردد که در پی آن شرایط اقلیمی به سمت شرایط نامطلوب سوق پیدا می‌کند.





شکل ۱: نمودار جعبه ای شاخص فشار فیزیولوژیک (pPhS) ایستگاه بندر انزلی؛ الف) فصل زمستان، ب) فصل بهار، ج) فصل تابستان و د) فصل پاییز مبتنی بر برونداد مدل RegCM GFDL-ESM2M

جدول ۷: شاخص فشار فیزیولوژیک (pPhS) در اقلیم خزری مبتنی بر داده های مشاهداتی (۲۰۱۷-۱۹۹۷) و مدلسازی شده

RegCM GFDL-ESM2M تحت مدل (۲۰۲۰-۲۰۴۰)

نام ایستگاه	فصل	دوره مشاهداتی	سناریو RCP 2.6	سناریو RCP 4.5	سناریو RCP 8.5
بندر انزلی	زمستان	۲/۶۶۲	۲/۷۶۵	۲/۷۰۷	۲/۶۹۴
	بهار	۱/۰۳۴	۰/۸۲۲	۰/۸۴۱	۰/۸۲۰
	تابستان	۰/۴۰۷	۰/۳۳۶	۰/۳۴۹	۰/۳۱۶
	پاییز	۱/۶۸۹	۱/۷۷۳	۱/۷۸۳	۱/۶۹۰
رامسر	زمستان	۲/۴۷۰	۲/۷۴۳	۲/۶۶۷	۲/۶۲۶
	بهار	۰/۹۰۰	۰/۹۳۷	۰/۹۷۲	۰/۹۲۷
	تابستان	۰/۳۵۱	۰/۴۰۳	۰/۴۱۸	۰/۳۸۲
	پاییز	۱/۶۳۴	۱/۶۹۵	۱/۶۹۷	۱/۶۰۷
گرگان	زمستان	۲/۶۱۱	۲/۵۱۳	۲/۳۴۵	۲/۲۱۴
	بهار	۰/۸۳۲	۰/۶۰۳	۰/۶۷۸	۰/۶۳۲
	تابستان	۰/۳۰۵	۰/۲۰۹	۰/۱۸۹	۰/۱۵۶
	پاییز	۱/۷۶۴	۱/۵۵۰	۱/۴۵۶	۱/۳۸۹
رامسر	زمستان	۲/۶۳۲	۲/۹۳۹	۲/۷۴۸	۲/۹۸۵
	بهار	۱/۰۷۳	۰/۹۸۹	۰/۹۷۸	۰/۸۶۸
	تابستان	۰/۴۱۸	۰/۳۷۴	۰/۳۵۳	۰/۲۹۴
	پاییز	۱/۶۷۶	۱/۶۹۰	۱/۷۴۸	۱/۸۱۱
رشت	زمستان	۲/۷۴۱	۲/۸۲۹	۲/۶۶۰	۲/۶۲۳
	بهار	۱/۰۲۶	۰/۸۶۸	۰/۸۶۱	۰/۸۳۶
	تابستان	۰/۴۷۶	۰/۳۹۶	۰/۳۶۹	۰/۳۳۵
	پاییز	۱/۸۵۶	۱/۸۲۸	۱/۷۸۷	۱/۷۰۲

### نتیجه گیری

۲۰۲۰-۲۰۴۰ مبتنی بر نتایج مدل های گردش کلی و منطقه ای و تحت سناریوهای انتشار گزارش پنجم هیئت بین دول تغییر اقلیم پرداخته می شود. نتایج این مطالعه نشان می دهد که مدل GFDL-ESM2M

در این مطالعه به بررسی تنش گرمایی توسط شاخص های (pHSI) و فشار فیزیولوژیک (pPhS) در ناحیه خزری در دوره ۱۹۹۷-۲۰۱۷ و دهه های آتی

شاخص فشار فیزیولوژیک (pPhS) نشان می‌دهد که در فصل زمستان در دوره پایه در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه فشار ملایم سرمای وجود دارد و در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ این شاخص در تمامی سناریوها روند افزایشی خواهد داشت و به سمت تعدیل شدن فشار سرمای حرکت خواهد کرد. در فصل بهار شاخص فشار فیزیولوژیک خنثی (فشار جزئی) خواهد شد. در فصل تابستان فشار ملایم گرمایی در تمامی ایستگاه طی دوره ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۷ میلادی مشاهده شد و به غیر ایستگاه بابلسر شدت این فشار گرمایی در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ افزایش خواهد یافت. بیشینه تغییر شاخص فشار فیزیولوژیک در آینده مربوط به ایستگاه گرگان خواهد بود. در ایستگاه گرگان نیز مقادیر شاخص از فشار ملایم گرمایی در دوره مشاهداتی به به فشار زیاد گرمایی در آینده تغییر خواهد کرد. در فصل پاییز نیز این شاخص برای دوره پایه فشار ملایم سرمای را نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های بندر انزلی، رامسر و رشت مقدار شاخص فشار فیزیولوژیک (pPhS) در آینده افزایشی خواهد بود و در مقابل در ایستگاه گرگان مقدار شاخص در آینده کاهش خواهد بود. بطور کلی نتایج این مطالعه نشان داد که تغییرات اقلیمی منجر به تشدید تنش‌های حرارتی به ویژه در دوره گرم سال در منطقه مورد مطالعه خواهد شد.

RegCM - از توانایی بالایی به منظور ارزیابی دمایی برخوردار می‌باشد به طوریکه این مدل بیش از ۹۳ درصد واریانس دمای مشاهداتی را در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی، توصیف می‌کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در دوره مشاهداتی (۲۰۱۷-۱۹۹۷) در دوره سرد در منطقه مورد مطالعه شاخص استرس گرمایی (pHSI) مبین استرس جزئی سرمای است که بیشینه آن مربوط به ایستگاه رشت و کمینه آن مربوط به ایستگاه بابلسر است. چنین شرایطی اما با مقادیر pHSI کمتر برای دوره آینده نیز در هر سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 مشاهده می‌شود. مقادیر این شاخص برای فصل پاییز خنثی و در دهه‌های آتی به استرس گرمایی جزئی و ملایم تغییر پیدا می‌کند. چنین شرایطی برای فصل بهار نیز مشاهده می‌شود که میزان تغییرات شاخص برای ایستگاه گرگان شدیدتر از فصل پاییز و همچنین سایر ایستگاه‌ها در منطقه مورد مطالعه است. در فصل تابستان در تمامی ایستگاه‌ها استرس گرمایی شدید محاسبه گردید که کمینه استرس گرمایی در ایستگاه رشت و بیشینه آن در ایستگاه گرگان بدست آمده است. در فصل تابستان بیشینه تغییرات در آینده برای ایستگاه گرگان خواهد بود در مقابل در ایستگاه بابلسر مقدار شاخص pHSI کاهش خواهد بود.

## منابع

۱. دفتر ملی هیات بین‌الدولی تغییر اقلیم، ۱۳۹۶. گزارش فنی آشکارسازی و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و چشم‌انداز آن در ایران طی قرن بیست و یکم، سازمان هواشناسی، پژوهشکده اقلیم‌شناسی.
۲. عسگری، سجاد. قهرمان، نوذر. بابائیان، ایمان. ۱۳۹۶. پیش‌نگری کمی اثرات محتمل تغییر اقلیم بر شاخص گرمایی (THI) تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCP) در ایران. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، شماره ۳۱، ۱-۱۸.
۳. فلاح‌قاهره، غلام‌عباس. اسماعیلی، رضا. شاکری، فهیمه. ۱۳۹۵. ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر تغییرات آسایش حرارتی بیرونی با استفاده از شاخص
- دمای معادل فیزیولوژیک (PET) (در شهر مشهد)، سلامت و محیط زیست، شماره ۲، ۲۴۶-۲۳۳.
۴. لشکری، اعظم. بنایان، محمد. کوچکی، علیرضا. علیزاده، امین. سای چوی یانگ. پارک سنون کی. ۱۳۹۴. بررسی امکان سنجی استفاده از پایگاه داده AgMERRA برای ساخت داده‌های ناقص و گمشده موجود در داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک (دشت مشهد). نشریه آب و خاک، شماره ۶، ۱۷۵۸-۱۷۴۹.
۵. مفیدی، عباس. کمالی، سمیه. زرین، آذر. ۱۳۹۲. ارزیابی توان مدل RegCM4 پیوند خورده با طرح واره غبار در آشکارسازی ساختار طوفان‌های گردوغباری تابستانه در دشت سیستان. جغرافیا، شماره ۳، ۶۹-۵۱.
6. Anthes R.A. 1977. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-

- (MM5), Tech. Rep. TN-398+STR, NCAR, Boulder, Colorado, pp. 121.
14. Hajizadeh R., Golbabaie F., Monazzam M.R., Dehghan S.F. and Navan E.E. 2014. Productivity loss from occupational exposure to heat stress: A case study in Brick Workshops/Qom-Iran. *Int J Occup Hyg*, 6(3):143-8.
  15. Heidari H., Golbabaie F., Shamsipour A., Forushani A.R. and Gaeini, A. 2015. Outdoor occupational environments and heat stress in IRAN. *J Environ Health Sci Engineer*, 13(1): 1.
  16. Holtzlag, A.A.M., De Bruijn E.I.F. and Pan, H.L. 1990. A high resolution air mass transformation model for shortrange weather forecasting, *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1561-1575.
  17. IPCC. 2007. Climate change synthesis report - summary for policymakers: Retrieved from Cambridge University Press.
  18. Kjellstrom T. 2009. Climate change, direct heat exposure, health and well-being in low and middle income countries. *Global Health Action*, 2:10.3402/gha.v2i0.1958
  19. Mccollor, D. and Stull, R. 2008. "Hydro meteorological accuracy enhancement via post processing of numerical weather forecasts in complex terrain", *Wea. Forecasting*, 23, pp. 131-144
  20. Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K. and Masui, T. 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109 (1-2), 5.
  7. De Freitas C. 1985. Assessment of human bioclimate based on thermal response. *International Journal of Biometeorology*, 29(2): 97-119.
  8. Dehghan, H., Mortzavi, S.B., Jafari M.J., Maracy M.R. 2015. Development and Validation of a Questionnaire for Preliminary Assessment of Heat Stress at Workplace. *J Res Health Sci*, 15(3):175-81.
  9. Dickinson, R.E., Errico, R.M., Giorgi, F., Bates, G.T. 1989. A regional climate model for the western United States, *Climatic Change*, 15: 383-422.
  10. Dickinson, R.E., Kennedy P.J., Henderson-Sellers A., and Wilson, M. 1986. Biosphere-atmosphere transfer scheme (bats) for the near community climate model, Tech. Rep. NCARE/TN-275+STR, National Center for Atmospheric Research.
  11. Giorgi, F. and Bates G.T. 1989. The climatological skill of a regional model over complex terrain, *Mon. Wea. Rev.* 117: 2325-2347.
  12. Giorgi, F., Marinucci M.R., and Bates G.T. 1993. Development of a second generation regional climate model (regcm2) i: Boundary layer and radiative transfer processes, *Mon. Wea. Rev.* 121: 2794-2813.
  13. Grell, G.A., Dudhia J., and Stauffer D.R. 1994. Description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model dimensional cloud model, *Mon. Wea. Rev.*, 105: 270-286.

