



فصلنامه علوم محیطی، دوره شانزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷

۱۶۷-۱۸۶

ارزیابی آسایش حرارتی انسان در فضای باز شهری مطالعه موردی: استان قم

فائزه نوری*، عباس رنجبر و ابراهیم فتاحی

گروه آلودگی هوا، پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۱

نوری، ف.، ع. رنجبر و ا. فتاحی. ۱۳۹۷. ارزیابی آسایش حرارتی انسان در فضای باز شهری مطالعه موردی: استان قم. فصلنامه علوم محیطی. ۱۶(۴): ۱۸۶-۱۶۷.

سابقه و هدف: فضای باز، مهمترین عرصه شکل‌گیری تعامل‌های اجتماعی انسان‌ها بشمار می‌رود و ممکن است توسط یک طیف وسیعی از پارامترها تحت تأثیر قرار بگیرد. جلب رضایت افراد برای حضور در چنین فضاهایی عامل اصلی رشد اقتصادی، اجتماعی و سیاسی در این‌گونه شهرها می‌باشد. مطالعه و شناسایی محدودیت‌ها و بحران‌های اقلیمی و نیز آگاهی از پتانسیل‌های محیط زیستی نهفته در ویژگی‌های طبیعی و اقلیمی یک منطقه در فصل‌های مختلف سال بمنظور لحاظ شدن آن‌ها در برنامه‌ریزی‌های مختلف استانی از اهمیت درخور توجهی برخوردار است و می‌تواند نقش اساسی در برنامه‌ریزی‌های شهری و منطقه‌ای داشته باشد. در همین راستا، هدف پژوهش حاضر تعیین آسایش حرارتی انسان در فضای باز استان قم تعیین گردید.

مواد و روش‌ها: در پژوهش حاضر با استفاده از شاخص‌های متوسط نظرسنجی پیش‌بینی‌شده^۱ و دمای معادل فیزیولوژیک^۲، آسایش حرارتی انسان در فضای باز استان قم مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور داده‌های مربوط به پنج پارامتر دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، فشار بخار آب و میزان ابرناکی در سه ایستگاه قم، کهک و سلفچگان، برای یک دوره آماری مشترک ۱۲ ساله (۲۰۰۴-۲۰۱۷) از سازمان هواشناسی کشور استخراج شد و با انتقال داده‌های بالا در مقیاس‌های زمانی مختلف با استفاده از قابلیت نرم‌افزار RayMan شاخص‌های PET و PMV محاسبه و بررسی شد.

نتایج و بحث: بررسی‌ها نشان داد که دوره آسایش اقلیمی در این استان محدود به دو دوره مجزا بوده که با گذار از دوره‌ی گرم به سرد و سرد به گرم هم‌زمان است. این شرایط بطور میانگین ۷/۹۲ درصد از سال را به خود اختصاص داده است که دوره اول آن در ماه‌های مارس و آوریل (فروردین و اردیبهشت) و دوره دوم در ماه اکتبر (آبان) توزیع شده است و بی‌همتاترین فصل‌ها برای انجام فعالیت‌های محیطی در استان قم می‌باشند. به دلیل وجود تنوع جغرافیایی و به تبعیت از پراکنش توپوگرافی، تضاد شرایط حرارتی در نتایج این پژوهش به روشنی مشاهده شد، به‌گونه‌ای که منطقه‌های مرتفع و کوهستانی با ۵۰/۲۷ درصد از ایام سال در قلمرو تنش‌های سرمای‌ی قرار گرفته‌اند و تنش‌های گرمایی در نواحی پست و کم ارتفاع با ۵۱/۶۳ درصد وجه غالب شرایط اقلیمی منطقه می‌باشند و درصد بیشتری از ایام سال را در بر گرفته‌اند. در بررسی ماهانه مشخص شد که مهمترین مؤلفه بازدارنده آسایش حرارتی در مرکز و شرق استان، تنش‌های گرمایی متوسط تا بسیار شدید در ماه‌های می، ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر (خرداد، تیر، مرداد، شهریور و مهر) است، در صورتی‌که عمده‌ترین محدودیت شهرهایی که در

* Corresponding Author. E-mail Address: faezeh.noori@gmail.com

ارتفاعات قرار دارند، تنش‌های سرمایی شدید در ماه‌های نوامبر، دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس (آذر، دی، بهمن، اسفند و فروردین) می‌باشد. تفسیر نتایج نشان داد که تاثیرهای ارتفاع و پراکنش توپوگرافی سبب پیدایش تنوع اقلیمی در این منطقه شده است بطوری که امکان رخداد تمام شرایط زیست‌اقلیمی با تنوع نسبتاً زیادی در گستره استان قم وجود دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که خروجی شاخص‌های زیست‌اقلیمی PET و PMV، توانایی آشکارسازی دوره‌های آسایشی و نبود آسایش استان قم را دارند و با واقعیت منطقه به‌خوبی سازگار هستند و با وجود تفاوت‌های جزئی، می‌توانند نمودهای به‌نسبت همگونی از اقلیم آسایشی آنجا را نشان دهند و اطلاعات بهتری را برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در اختیار ما بگذارند. بطور کلی، با توجه به روش‌ها و شاخص‌های مختلف و نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه و تحلیل داده‌ها، برای تحقق هدف‌ها باید از تلفیق شاخص‌های مختلف استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آسایش انسان-PMV-PET-RayMan

مقدمه

گزارش‌های متعددی بطور دقیق مورد بحث و بررسی قرار گرفته است (Stathopoulos et Van et al., 2002; Forsthoft and al., 2004; Givoni et al., 2003; Neffgen, 1999)؛ و در نهایت منجر به بیان شاخص‌های زیادی برای سنجش شرایط آسایش و راحتی انسان در قالب روابط عددی و شکل‌ها شده‌اند. بیشتر این شاخص‌ها بصورت پراکنده یا برای مقصدهای خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از این شاخص‌ها بر اساس اندازه‌گیری‌های مستقیم به‌دست‌آمده‌اند (Wind chill Index, Cooling power Index, Wet bulb temperature Index). برخی دیگر بر اساس واکنش بدن انسان به عامل‌های مختلف محیطی پایه‌ریزی می‌گردد (Predicted Mean Vote, Effective temperature Index) (Blazejczyk and Epstein, 2012; Parsons 2014; NIOSH 1986; Epstein, 2006 and Moran). آسایش حرارتی در محیط‌های بیرونی، برخلاف بحث آسایش حرارتی در فضاهای درونی، بحث به-نسبت جدیدی محسوب می‌شود و به دلیل تغییر شرایط آب و هوایی، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه آسایش حرارتی فضای باز شهری انجام شده ولی پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه در مقایسه با محیط‌های داخلی، بسیار ناچیز بوده است. اولین بررسی‌های انجام‌شده در مورد آسایش حرارتی در فضای باز مربوط به مطالعه (Nikolopoulou et al., 2001) بوده است که الگوهای رفتاری را مدنظر قرار داده است. در این مطالعه، شرایط

آسایش انسان در فضای باز شهری یک پارامتر اساسی برای ارزیابی کیفیت محیط‌های شهری و بیان دستورالعمل برای توسعه پایدار شهرها می‌باشد و ممکن است توسط یک طیف وسیعی از پارامترها، از جمله سرعت باد، دمای هوا، رطوبت نسبی، تابش خورشید، کیفیت هوا، فعالیت انسانی، سطح لباس، سن و غیره تحت تأثیر قرار بگیرد (Rodrigues et al., 2009; Stathopoulos, 2004). آسایش حرارتی حالتی است که فرد برای تغییر شرایط دمایی محیط هیچ اقدام رفتاری را انجام ندهد و همان‌طور که در استاندارد اشری (ASHRAE Standards 55) شرایط دمایی محیط برای سکونت انسان، تعریف شده است، آسایش حرارتی عبارت است از «شرایط ذهنی که رضایت‌مندی از محیط اطراف را بیان می‌کند و از طریق ارزیابی فردی سنجیده می‌شود» (AbdelGhany et al., 2013). در واقع بهترین شرایط اقلیمی برای زندگی آن است که فرد بدون کوشش و تلاش زیاد بتواند توازن منطقی بین گرمای حاصل‌شده در بدن و گرمای از دست‌داده برقرار کند، یعنی نه حرارتی از محیط پیرامون دریافت کند و نه حرارتی به محیط پس دهد (Houshore, 1381). آسایش حرارتی به دو زیرمجموعه‌ی آسایش حرارتی در فضای بسته (درونی) و فضای باز شهری (بیرونی) تقسیم می‌شود. از دهه ۱۹۵۰، آسایش حرارتی انسان در فضای داخلی (مجموعه‌های مسکونی، صنعتی، تجاری و ساختمان‌های سازمانی) و فضای باز طی

سانتی‌گراد و در تابستان ۳۱٫۳ درجه سانتی‌گراد و برای SET، به ترتیب ۲۷٫۶ درجه سانتی‌گراد و ۳۱٫۳ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید. (Ghany *et al.* (2013) در تحقیقی آسایش حرارتی انسان را تحت شرایط آب‌وهوای خشک در فضای باز مرکز ریاض با استفاده از شاخص PET و UCI در سال ۲۰۱۲ مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که هر دو شاخص بیان شده برای دمای بسیار بالا در محیط خشک معتبر هستند. Akbariyan *et al.* (2016) در پژوهشی با استفاده از شاخص PET ویژگی‌های آب و هوایی ۶ روستای گردشگری در سه استان گلستان، گیلان و مازندران را به منظور گسترش صنعت گردشگری در سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۴ مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج PET نشان داد که در میان ۶ روستای مورد مطالعه، اواخر پاییز تا اواسط زمستان، بیشترین شرایط راحتی در شرایط آب و هوایی منطقه‌های مورد مطالعه را دارد. Ghani *et al.* (2017)، آسایش حرارتی در فضاهای باز محیط‌های گرم و خشک را برای تابستان ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ قطر با استفاده از پنج شاخص PMV، CP، WBGT، DI، Humidex مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد به جز شاخص WBGT که درصد آسایش حرارتی را بیشتر از حد پیش‌بینی کرده است، بقیه شاخص‌های بررسی شده درصد آسایش حرارتی را کمتر از میزان واقعی برآورد کرده‌اند. (Esmaeli *et al.* (2012) آسایش شهرهای مشهد، اصفهان، رشت و کیش را با استفاده از روش PET در سال‌های ۱۳۴۰ تا ۱۳۸۵ مورد بررسی قرار دادند. نتایج بین شهرهای مورد مطالعه نشان داد که بهترین مقصد برای گذراندن سفرهای نوروزی جزیره کیش است. (Najafi (2012) در مطالعه‌ای آسایش حرارتی بازار وکیل شیراز را با استفاده از شاخص‌های PET و PMV مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که آسایش حرارتی در زمستان از نظر درجه تنش فیزیولوژیک، بدون تنش سرما و حساسیت حرارتی از

آسایش فضاهای باز شهری در مکان‌های تفریحی کمبریج انگلستان مورد بررسی قرار گرفت. چارچوب پژوهش و روش تجزیه و تحلیل آن‌ها تا حد زیادی پژوهش‌های بعدی را تحت تأثیر قرارداد. پس از آن نیز بررسی‌های بسیاری توسط افراد مختلف در این زمینه انجام شد که در ادامه ضمن معرفی نمونه‌های از این نوع، به روش پژوهش و نتایج کار آن‌ها نیز اشاره خواهد شد. (Mcgregor *et al.* (2002) استفاده از شاخص PMV نبود آسایش گرمایی انسان را در شهر آتن در سال‌های ۱۹۹۵-۱۹۶۶ مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از تحقیق‌های آن‌ها نشان داد که زمان آغاز و پایان فصل نبود آسایش در تمام دوره بررسی شده یکسان نبوده و بسیار متفاوت است. همچنین در مقیاس روزانه، نبود آسایش انسان در اواخر ماه ژوئیه به بیشترین حد خود (۴ تا ۶ ساعت) می‌رسد. (Lindqvist *et al.* (2004) در پژوهشی با استفاده از مشاهده‌های غریزی حاصل از رفتار طبیعی افراد و اندازه‌گیری هم‌زمان با متغیرهای هواشناسی مثل سرعت باد، دما، رطوبت و غیره در یک مکان تفریحی در سوئد به مقایسه رفتار ذهنی و حس گرمای مصاحبه‌شوندگان و ارزیابی شاخص PMV پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که جنبه‌های روان‌شناختی بر ارزیابی ذهنی تأثیر می‌گذارد، همچنین مقایسه حس گرمای مصاحبه‌شوندگان و احساس گرما با ارزیابی شاخص PMV نشان داد که مدل‌های حالت پایدار مانند شاخص PMV ممکن است برای ارزیابی کوتاه‌مدت آسایش حرارتی در فضای باز مناسب نباشند. (Yahia *et al.* (2012) رفتار دو شاخص حرارتی PET و SET را در دو فصل تابستان و زمستان و در مکان‌های مختلف شهر دمشق مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که شرایط حرارتی محیط‌های مختلف در فضای باز به طور قابل توجهی متفاوت است. درجه حرارت خنثی در هر دو شاخص PET و SET در فضای باز فصل تابستان کمتر از زمستان به دست آمد. همچنین میزان آستانه‌های بالا و پایین شاخص PET در زمستان ۲۱٫۰ درجه

سرمایی در بیشتر روزهای سال بوده و دوره مطلوب اقلیمی تنها دوره‌ی کوتاهی از سال را پوشش داده است. با توجه به اینکه فضاهای باز مهمترین عرصه شکل‌گیری تعاملات اجتماعی بشمار می‌روند و جلب رضایت افراد برای حضور در چنین فضاهایی عامل اصلی رشد اقتصادی، اجتماعی و سیاسی در شهرها می‌باشد (Blazejczyk *et al.*, 2011) هدف این پژوهش نیز در راستای بررسی شرایط آسایش حرارتی در فضای باز استان قم در یک دوره آماری ۱۲ ساله (۲۰۰۴-۲۰۱۷) با استفاده از شاخص PET و PMV تعیین شده است. نتایج حاصل از پژوهش می‌تواند در تنظیم برنامه‌های زمانی حضور گردشگران و زائران توسط سازمان‌ها و نهادهای مرتبط مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در سال ۱۳۷۵ از استان تهران جدا و استان قم را تشکیل داده است و با وسعتی معادل ۱۱۲۴۰ کیلومتر مربع در مجاورت کویر مرکزی ایران در جهت غرب آن، حدفاصل ۵۰ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۸ دقیقه طول شرقی نسبت به نصف‌النهار گرینویچ و ۳۴ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۱ دقیقه عرض شمالی نسبت به خط استوا واقع شده است. این استان از سمت شمال به استان تهران (جلگه ورامین و شهرری)، از سمت غرب به شهرستان‌های آشتیان و تفرش از استان مرکزی و از طرف جنوب به استان اصفهان (شهرستان کاشان) و از سمت شرق به استان سمنان (شهرستان گرمسار) محدود می‌شود. متوسط ارتفاع این استان ۹۳۰ متر از سطح دریا می‌باشد که در پست‌ترین نقطه حاشیه کویر ۸۰۰ متر و در بلندترین نقطه کوهستانی به ۳۱۹۵ متر (کوه ولیجا) می‌رسد. با توجه به اختلاف زیاد ارتفاع (از ۸۰۰ تا ۳۳۳۰ متر) استان دارای آب‌وهوای متفاوت می‌باشد. شکل (۱) موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک به همراه ارتفاع توپوگرافی

درجه راحت برخوردار می‌باشد و کمتر از ۱۵ درصد کاربران بازار از این شرایط ناراضی هستند. Heydari and Manam (2014) رابطه میان شاخص‌های حرارتی و احساس آسایش حرارتی در فضای باز پنج بوستان ملت، ساعی، لاله، شهر و بعثت در شهر تهران را در هفته‌های پایانی مهرماه و آغازین آبان ماه ۱۳۸۹ از ساعت ۱۰ صبح تا ۱۷ مورد بررسی قراردادند. نتایج حاصل از این پژوهش منجر به بیان رابطه‌ای بر مبنای داده‌های محیطی شد که امکان پیش‌بینی محدوده آسایش حرارتی در فضاهای مختلف با داده‌های پایه را فراهم می‌کند. Khoshnfas *et al.* (2016) آسایش اقلیمی شمال غرب ایران را با استفاده از شاخص درجه سختی هوا برای یک دوره ۱۰ ساله (۲۰۰۶-۱۹۹۷) مورد بررسی قراردادند. نتیجه این بررسی نشان می‌دهد که ۱۳ درصد از کل منطقه در دوره سرد سال از شرایط سختی هوا به دور است و یا به عبارت دیگر از حالت اعتدال برخوردار است. در حالی که در ۸۷ درصد دیگر شرایط سختی در ماه‌های سرد حاکم است که درجه‌های کمی سخت تا خیلی سخت مشاهده می‌شود. Rozati and Ghanbaran (2015) آسایش حرارتی فضاهای باز شهر اصفهان را با استفاده از شاخص‌های آسایش باد مورد ارزیابی قراردادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که جریان باد تنها در ماه‌های دی می‌تواند آسایش افراد در فضاهای باز شهری را مختل نماید و در طراحی‌های فضاهای باز باید از شدت آن کاسته شود. ماه‌های خرداد، تیر و مرداد در صورت تقویت جریان باد در فضاهای باز تا سقف ۶ متر بر ثانیه، آسایش، ارتقا خواهد یافت. همچنین در دیگر فصل‌های سال، باد وضعیت مطلوبی داشته و سبب آسایش خواهد شد. Ataee *et al.* (2016) تأثیر تغییرپذیری‌های روزانه آب‌وهوا را بر گردشگری استان کردستان با استفاده از روش PET در یک دوره آماری بیست‌ساله (۱۹۸۹-۲۰۰۹) مورد بررسی قراردادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که از نظر اقلیمی عمده‌ترین محدودیت گردشگری وجود تنش

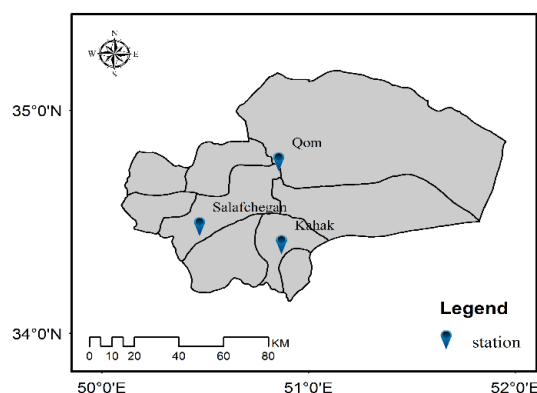
محاسبه هر کدام از آن‌ها نیز بیان می‌شود.

شاخص‌های حرارتی در فضای باز

از اواخر قرن بیستم، با توجه به چالش‌های تغییر اقلیم، پارامترهای اقلیمی و هواشناسی، کانون تمرکز مطالعات برنامه‌ریزی شهری شد که بسیاری از این بررسی‌ها در مورد ارزیابی ارتباط آسایش حرارتی انسان با پارامترهای استاندارد هواشناسی بوده است. (Bauche *et al.*, 2013). برای این منظور شاخص‌های مختلفی در دهه‌های گذشته بمنظور توصیف و تعیین پدیده‌های حرارتی و فیزیولوژیکی در بدن انسان ایجاد شد (Matzaraki, 2009). این شاخص‌ها بر مبنای تعادل انرژی بین بدن انسان و محیط پیرامونش به همراه در نظر گرفتن چندین عامل تجربی میزان تنش‌های حرارتی را مشخص می‌کنند.

Fanger, 1972; Matzarakis *et al.*, 1999; Spagnolo and de Dear, 2003). تعدادی از این شاخص‌ها که بر اساس معادلات تجربی به دست آمده‌اند (همچون شاخص دمایی ظاهری، شاخص خنک‌کنندگی و ...) Parsons 2014; Blazejczyk and Epstein, 2012; Epstein and Moran 2006; NIOSH 1986) تعداد محدودی از پارامترهای هواشناسی را در نظر می‌گیرند (Rubistein *et al.*, 1980) در صورتی که افزودن بر شرایط هواشناسی، پارامترهای فیزیولوژیکی بدن انسان (میزان فعالیت، نوع پوشش، قد، جنسیت، سن و وزن) نیز در ایجاد درجه‌های مختلف تنش‌های حرارتی دخالت دارند (Höppe 1999; Matzarakis *et al.*, 1999). در نتیجه شاخص‌های مرتبط با فیزیولوژی انسان که از معادله بیلان انرژی بدن انسان مشتق گردیده‌اند، امروزه در بررسی‌های زیست اقلیم انسانی جایگاه ویژه‌ای دارند و استفاده از آن‌ها سبب غلبه بر کاستی شاخص‌های تجربی می‌شود (Matzarakis *et al.*, 1999; Fanger 1972). شاخص‌های معروفی در این زمینه

استان و جدول (۱) ویژگی‌های جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک در استان قم
Fig. 1- Location of selected synoptic stations in Qom province

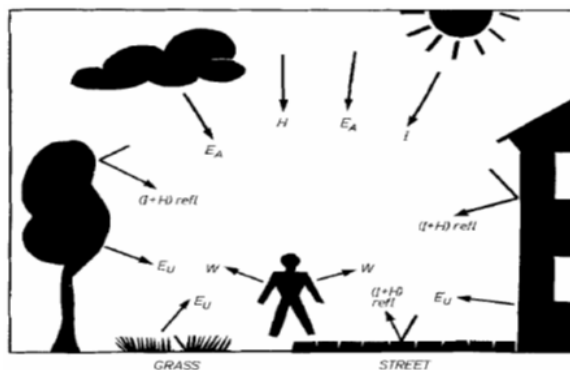
جدول ۱- ویژگی‌های جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه
Table 1. G Geographical characteristics of the studied stations

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا
station	Longitude	Latitude	Above sea level
قم	50.85	34.77	879.1
Qom			
کهک	50.86	34.40	1403
Kahak			
سلفچگان	50.46	34.48	1381
Salafchegan			

در این مطالعه شرایط آسایش حرارتی انسان در محدوده استان قم که سالانه پذیرای حدود ۲۰ میلیون زائر می‌باشد، مورد توجه قرار گرفته است. داده‌های هواشناسی مورد نیاز (دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، فشار بخار آب، میزان ابرناکی) برای یک دوره آماری مشترک ۱۲ ساله (۲۰۰۴-۲۰۱۷) از سازمان هواشناسی کشور برای سه ایستگاه قم، کهک و سلفچگان، دریافت شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سپس با استفاده از مدل RayMan شاخص‌های PET و PMV محاسبه و در نهایت شرایط آسایش و نبود آسایش حرارتی انسان در محدوده مورد مطالعه به تفکیک روزانه و ماهانه بررسی شد. در ادامه ضمن معرفی شاخص‌های مورد استفاده، شرایط و نحوه

شاخص PMV

Fanger در سال ۱۹۷۲، شاخص PMV را باهدف ارزیابی میزان آسایش حرارتی افراد در فضای بسته بیان کرد. پس از آن، (Jendritzky and Nubler, 1982) با اضافه نمودن تابش‌های محیطی (شکل ۲)، شاخص PMV را برای ارزیابی آسایش حرارتی در فضای باز گسترش دادند و الگوی «Klima Michel» را معرفی نمودند.



short-wave radiation (0.28-4um):
 I = direct solar radiation,
 H = diffuse solar radiation,
 (I+H)refl = reflected short-wave radiation.
 long-wave radiation (4-100um):
 Eu = atmospheric counter radiation,
 EA = long-wave emissions of the surroundings,
 W = radiation from the man's surface.

شکل ۲- تابش‌های محیطی در نظر گرفته شده در الگوی کلیما (Jendritzky and Nubler, 1981)
 Fig. 2- Environmental radiation considered in the Klima-Michel pattern (Jendritzky and Nubler, 1981)

تبخیری تعرق (w/m2) E_{sw} تلفات حرارت تبخیری تعرق (w/m2) E_c تبادل حرارت تبخیری در سطح پوست موقعی که در حالت حرارتی خنثی قرار دارد I_{cl} (w/m2) تابش لباس بطور متوسط برای تمام بدن (w/m2) M نرخ سوخت‌وساز بدن (w/m2) T_{cl} دمای سطح لباس (درجه سانتی‌گراد)، T_{sk} دمای متوسط پوست (درجه سانتی‌گراد)، W نیروی مکانیکی مؤثر (w/m2) E تبادل حرارت تبخیری در سطح پوست (w/m2) H تلفات حرارت خشک بصورت همرفت، هدایت و تابش (w/m2) T_a دمای هوا (درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. مقیاس PMV نوعی تقسیم‌بندی احساس حرارتی γ درجه‌ای است که دامنه آن از $-3/5$ (سرد) تا $+3/5$ (گرم) تغییر می‌کند. صفر در این مقیاس نشانگر احساس حرارتی خنثی است (جدول ۲).

شاخص PMV از طریق رابطه (۱) تا (۶) قابل محاسبه است:

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)[(M - W) - H - E_c - C_{rec} - E_{rec}] \quad (1)$$

$$E = 3.05 \times 10^{-3}(256t_{sk} - 3373 - P_a) + E_{sw} \quad (2)$$

$$E_c = 3.05 \times 10^{-3}[5733 - 6.99 \times (M - w) - P_a] + 0.42(M - W - 58.15) \quad (3)$$

$$C_{rec} = 0.0014M(34 - T_a) \quad (4)$$

$$E_{rec} = 1.72 \times 10^{-5}M(5867 - P_a) \quad (5)$$

$$H = K_{cl} = t_{sk} - t_{cl}/I_{cl} \quad (6)$$

در رابطه‌های فوق، C_{rec} تبادل حرارت همرفتی تعرق (w/m2) E_{rec} تبادل حرارت

جدول ۲- میزان آستانه شاخص‌های PMV و PET در درجه‌های مختلف حساسیت انسان (Matzarakis et al., 1990)

Table 2. The threshold values of PET and PMV indices for different grades of human sensitivity

PMV	PET(C°)	حساسیت حرارتی Thermal perception	درجه تنش فیزیولوژیک Grade of physiological stress
<-3.5	<4	خیلی سرد Very cold	تنش سرمای بسیار شدید Extreme cold stress
-3.5	4	سرد Cold	تنش سرمای شدید Strong cold stress
-2.5	8	خنک Cool	تنش سرمای متوسط Moderate cold stress
-1.5	13	کمی خنک Slightly cool	تنش سرمای اندک Slight cold stress
-0.5	18	راحت Comfortable	بدون تنش سرما No thermal stress
0.5	23	کمی گرم Slightly warm	تنش گرمای اندک Slight heat stress
1.5	29	گرم Warm	تنش گرمای متوسط Moderate heat stress
2.5	35	خیلی گرم Very warm	تنش گرمای شدید Strong heat stress
3.5	41	داغ Hot	تنش گرمای بسیار شدید Strong heat stress

شاخص PET

این شاخص تحت شرایط فضای مجازی داخلی تعریف شده است ولی برای شرایط واقعی فضای خارجی نیز کاربرد دارد (Honjo, 2009). شاخص دمای معادل فیزیولوژیک یکی از شاخص‌های توصیه شده توسط انجمن مهندسان آلمان در برنامه ریزی شهری و منطقه‌ای است و برای پیش‌بینی تغییرپذیری‌های حرارتی بخش‌های اقلیم شهری یا منطقه‌ای بکاربرده می‌شود (VDI, 1998). این شاخص در شرایط مختلف اقلیمی در فضای باز شهری در پژوهش‌هایی که بمنظور اعتبار سنجی آن صورت گرفته است، رابطه بیشتری را با احساس آسایش حرارتی نشان داده است. (Heydari and Tseliou et al., 2010). برای محاسبه شاخص PET از مدل MEMI استفاده می‌شود. این مدل، جزء مدل‌های موازنه حرارتی ترمو-فیزیولوژیک است که بعنوان اساسی‌ترین مدل برای به دست آوردن شاخص‌های PMV و PET مورد استفاده قرار می‌گیرد. جزئیات مدل بر مبنای معادله بیلان انرژی بدن انسان استوار است و معادله آن بدین شرح است (Hoppe, 1999).

شاخص دمای معادل فیزیولوژیک (PET) یکی دیگر از شاخص‌های مرتبط با فیزیولوژی انسان است که از معادله بیلان انرژی بدن انسان مشتق شده است (Matzarakis, 2007). طبق تعریفی که Hoppe (1999) و Mayer and Hoppe (1987) در مورد این شاخص بیان کردند، برای نرخ سوخت‌وساز با کار سبک و میزان نارسایی لباس به ترتیب اعداد ۸۰ وات و ۰/۹ کلو (کلو واحد نارسایی لباس می‌باشد) بطور میانگین در نظر گرفته شده است. یکی از مزیت‌های مهم این شاخص نسبت به شاخص PMV درجه‌بندی بر اساس درجه سانتی‌گراد می‌باشد و در برنامه ریزی شهری بسیار ساده‌تر و جامع‌تر خواهد بود (Deb and Ramachandraiah, 2010). تنش گرما و سرما به ترتیب در میزان بالا و پایین این شاخص بوجود می‌آید. برای فعالیت‌های مختلف و پوشش‌های لباس متفاوت، میزان دمای معادل فیزیولوژی نیز تغییر خواهد کرد. در جدول (۲) در مقادیر، آستانه روش PET در درجه‌های مختلف حساسیت انسان آمده است. اگرچه

$$M + W + R + C + Ed + Ere + Esw + s = 0 \quad (7)$$

در رابطه فوق، M میزان سوخت‌وساز بدن، W خروجی کار فیزیکی، R تابش خالص بدن، C جریان حرارت همرفتی، Ed جریان حرارت نهان تبخیری آب از پوست، Ere مجموع جریان‌های حرارتی مؤثر در گرمایش و تبخیر و تعرق، Esw جریان هوای مؤثر در تبخیر و تعرق بدن می‌باشد. در این معادله همه واحدها برحسب وات است و بطور معمول مثبت و Ed ، W و Esw اغلب منفی است. اگر بدن انسان در حال کسب انرژی باشد معادله به تمامی مثبت و اگر در حال از دست دادن انرژی باشد عبارت‌های معادله منفی خواهد بود. معادله گفته شده به وسیله متغیرهای درجه حرارت هوا، رطوبت هوا، سرعت باد و متوسط دمای تابشی کنترل می‌گردد. (Matzarakis and Amelung, 2008) افزون بر پارامترهای هواشناسی، متغیرهای ترموفیزیولوژی شامل مقاومت گرمایی لباس (برحسب کلو) و میزان فعالیت انسان (وات) نیز لازم و ضروری است. دسترسی به متغیرهای درجه حرارت هوا، رطوبت هوا و سرعت باد به آسانی میسر است، ولی میانگین دمای تابشی^۳ که یکی از مهمترین متغیرهای ورودی در محاسبه بیلان انرژی بدن انسان است، در ایستگاه‌های هواشناسی ثبت نمی‌شود. (Jendritzky et al., 1990). بدین ترتیب برای به دست آوردن آن می‌بایست در محاسباتی، ویژگی‌های مربوط به سطح‌های تابشی، مدنظر قرار گیرد. نرم‌افزار RayMan که ابتدا توسط Matzarakis طراحی شد، یکی از مناسبترین نرم‌افزارها برای محاسبه شار تابش در محیط‌های ساده و پیچیده می‌باشد و به لحاظ استفاده از پارامترهای مختلف اقلیمی، فرم محاسباتی مناسب و پشتیبانی توسط نرم‌افزار مربوطه بیش از دیگر نرم‌افزارها مورد توجه محققان داخلی و خارجی بوده است. در این تحقیق نیز با توجه به قابلیت مدل گفته شده برای محاسبه شار تابشی و در نهایت محاسبه، شاخص‌های PET و PMV مورد استفاده

قرار گرفته است. نرم‌افزار RayMan برای محاسبه شاخص‌های بیان شده نیازمند داده‌هایی است که در چهار گروه قرار می‌گیرد:

- ۱- متغیرهای موقعیتی شامل طول و عرض و ارتفاع.
- ۲- متغیرهای هواشناسی شامل دمای هوای خشک برحسب سانتی‌گراد، فشار بخار آب برحسب هکتوپاسکال، رطوبت نسبی برحسب درصد، سرعت باد برحسب متر بر ثانیه و میزان ابرناکی برحسب اکتا.
- ۳- متغیرهای فردی شامل ویژگی‌های فیزیولوژیک مؤثر همچون قد، وزن، سن و جنسیت.
- ۴- متغیرهای مربوط به نوع پوشش و فعالیت (2006 Matzarakis)

نتایج و بحث

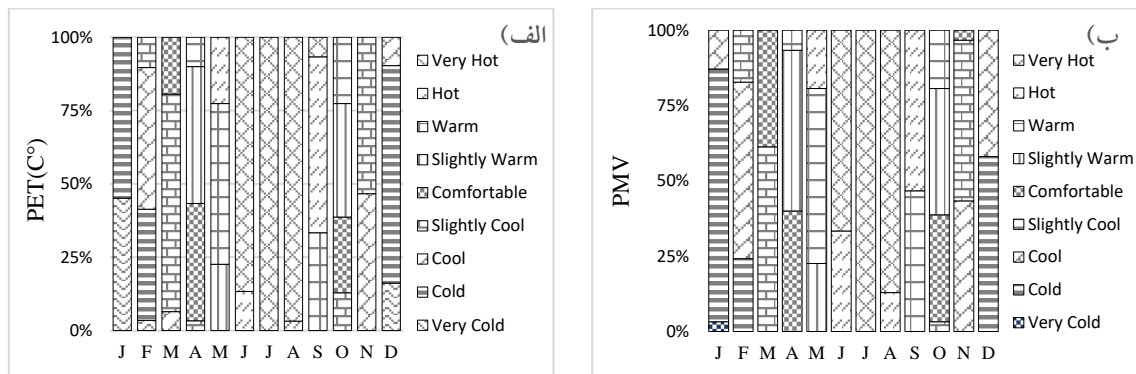
تحلیل فرکانس بلندمدت ماهانه شاخص PET و

PMV

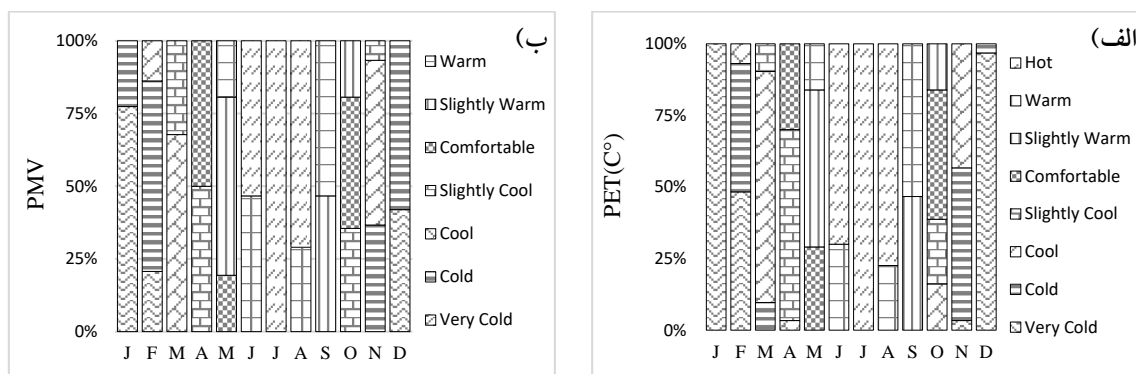
نتایج بخش اول این پژوهش، بر روی درصد فرکانس ماهانه شاخص PET و PMV در سه ایستگاه انتخاب شده از استان قم تمرکز دارد. فرکانس ماهانه شاخص PET برای هر ایستگاه بصورت جداگانه در شکل‌های (۳) تا (۵) در قسمت (الف) به تصویر کشیده شده است. نتایج به دست آمده از شاخص PET برای ایستگاه قم نشان داد که پراکنش زمانی آسایش حرارتی در سه ماه مارس، آوریل و اکتبر (فروودین، اردیبهشت و آبان) توزیع شده است. ماه‌های بیان شده تنها ماه‌هایی هستند که به ترتیب با ۱۹/۴، ۴۰ و ۲۵/۸ درصد در محدوده آسایش حرارتی قرار گرفته‌اند. در این ایستگاه بنابر شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود که تنش‌های گرمایی متوسط تا بسیار شدید، مهمترین مؤلفه‌های بازدارنده آسایش حرارتی در ماه‌های می، ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر (خرداد، تیر، مرداد، شهریور و مهر) می‌باشد. در ادامه لازم به بیان است ماه‌های ژوئیه، اوت و ژوئن (خرداد، تیر و مرداد)

سرمایی بسیار شدید در مقایسه با ایستگاه قم شده است. نکته قابل تأمل، وجود نداشتن تنش گرمایی بسیار شدید در دو ایستگاه گفته شده می‌باشد که می‌تواند منجر به این نتیجه‌گیری شود که تنش‌های سرمایی غلبه بیشتری بر تنش‌های گرمایی داشته‌اند. نتایج حاصل از خروجی شاخص PMV در هر سه ایستگاه در شکل‌های (۳-ب)، (۴-ب) و (۵-ب) قرار داده شده است. هرچند نتایج این شاخص از لحاظ پراکنش درجه‌های مختلف تنش‌های گرمایی و دوره آسایش حرارتی مشابه شاخص PET می‌باشد ولی شاخص گفته شده طول دوره آسایش اقلیمی و زمان مناسب برای حضور در فضای باز و انجام فعالیت‌های محیطی را طولانی‌تر از شاخص PET برآورده کرده است. بنابر نتایج این شاخص مانند شاخص PET، ایستگاه قم در ماه‌های مارس، آوریل و اکتبر (فروردین، اردیبهشت و خرداد) به ترتیب با ۳۸/۷، ۴۰ و ۳۵/۵ درصد از وضعیت آسایش اقلیمی مطلوب (بدون تنش) برخوردارند. همچنین در همین ایستگاه، تنش‌های گرمایی اندک تا بسیار شدید در ماه‌های می تا سپتامبر (خرداد تا مهر) قرار گرفته است که از میان ماه‌های بیان شده، سه ماه ژوئیه (۱۰۰ درصد)، اوت (۸۷/۱ درصد) و ژوئن (۶۶/۷ درصد) به ترتیب بالاترین آستانه‌های این شاخص را تجربه کرده‌اند. شاخص گفته شده، دوره آسایش اقلیمی دو ایستگاه کهک و سلفچگان را نیز مشابه شاخص قبلی در سه ماه آوریل، می و اکتبر (اردیبهشت، خرداد و آبان) متمرکز کرده است. همچنین با توجه به نتایج این شاخص، دو ایستگاه گفته شده شرایط تنش گرمایی بسیار شدید را نداشتند هرچند که نتایج دو شاخص نشان‌دهنده خروجی‌های کمابیش مشابه در هر سه ایستگاه می‌باشد ولی در تخمین درجه‌های مختلف تنش‌های سرمایی ماه‌های دسامبر و ژانویه (دی و بهمن) ضعیف‌تر تخمین زده شده است.

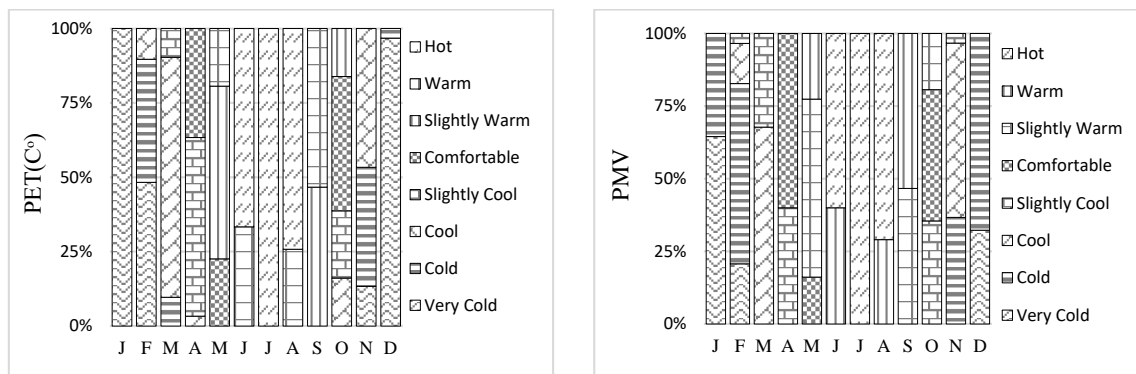
با میزان ۱۰۰، ۹۶/۶ و ۸۶/۷ به ترتیب بالاترین درصد توزیع فراوانی تنش گرمایی بسیار شدید را تجربه کرده‌اند. در ایستگاه قم، درصد فراوانی روزهای همراه با تنش سرمایی بسیار شدید به ۴۵/۲ درصد از ماه ژانویه و ۱۶/۲ درصد از ماه دسامبر (دی) محدود می‌شود. با توجه به اینکه درجه‌های مختلف تنش‌های گرمایی در مقایسه با تنش‌های سرمایی از درصد فراوانی بیشتری برخوردار هستند، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیرگذارترین عامل بازدارنده، طبقات خیلی گرم و داغ در ایستگاه قم می‌باشد. در ایستگاه سلفچگان (شکل ۴-الف) بر اساس میزان شاخص PET شرایط مطلوب اقلیمی در ۳۰ درصد از ماه آوریل (اردیبهشت)، ۲۹ درصد از ماه می (خرداد) و ۴۵/۲ درصد از ماه اکتبر (آبان) توزیع شده است. درجه‌های مختلفی از تنش‌های سرمایی در پنج ماه از سال (آذر، دی، بهمن، اسفند و فروردین) توزیع شده است. همچنین ماه‌های می، ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر (خرداد تا مهر) تنش‌های گرمایی اندک تا بسیار شدید را تجربه کرده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده ماه‌های ژانویه، فوریه و دسامبر (بهمن، اسفند و فروردین) به ترتیب با ۴۸/۳ و ۹۶/۸ درصد کمترین و ماه‌های ژوئیه، ژوئن و اوت (تیر، مرداد و شهریور) به ترتیب با ۷۰، ۱۰۰ و ۷۷/۴ درصد بیشترین آستانه‌های حرارتی شاخص PET را به خود اختصاص داده‌اند. بررسی نتایج ایستگاه کهک با اندکی تفاوت، مشابه با ایستگاه سلفچگان می‌باشد. دوره آسایش حرارتی در ایستگاه کهک نیز به ترتیب با ۳۶/۷، ۲۲/۶ و ۴۵/۲ درصد متعلق به ماه‌های آوریل، می و اکتبر (اردیبهشت، خرداد و آبان) می‌باشد. در این ایستگاه نیز هیچ‌گونه تنش حرارتی بسیار شدید مشاهده نمی‌شود. پس از ارزیابی دو ایستگاه کهک و سلفچگان در استان قم، مشخص شد که عامل ارتفاع زیاد در این دو ایستگاه سبب تشدید فراوانی تنش‌های



شکل ۳- فرکانس ماهانه شاخص الف) PET و ب) PMV بر حسب درصد در ایستگاه قم
Fig. 3- Monthly frequency of a) PET and b) PMV (%) at Qom station



شکل ۴- فرکانس ماهانه شاخص الف) PET و ب) PMV بر حسب درصد در ایستگاه سلفچگان
Fig. 4- Monthly frequency of a) PET and b) PMV (%) at Salafchegan station



شکل ۵- فرکانس ماهانه شاخص الف) PET و ب) PMV بر حسب درصد در ایستگاه کهک
Fig. 5- Monthly frequency of a) PET and b) PMV (%) at Kahak station

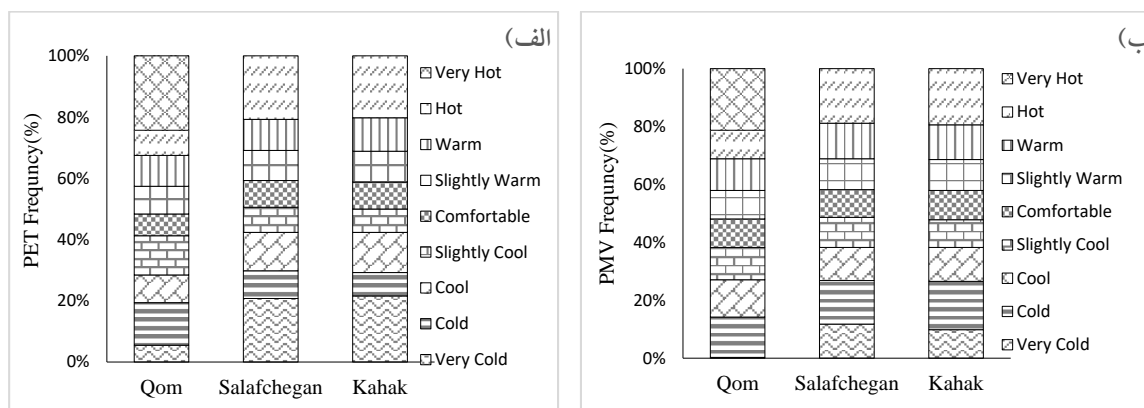
نشان می‌دهد بنابر نتایج حاصل شده از شاخص PET، ایستگاه قم، سلفچگان و کهک با ۷/۱، ۸/۷۴ و ۸/۷۴ درصد از روزهای سال، شرایط آسایش و بدون تنش را تجربه کرده‌اند. درصد فراوانی تنش‌های سرد تا خیلی سرد از ۳۸/۲۵ درصد در ایستگاه قم تا

تحلیل فرکانس محدوده‌های مختلف شاخص PET و PMV در هر ایستگاه

شکل (۶) توزیع فراوانی محدوده‌های مختلف شاخص PET و PMV را بر اساس داده‌های روزانه و صرف نظر از فرکانس ماهانه در کل دوره مورد مطالعه

تنها در ۹/۸۴ درصد از اوقات سال شرایط بدون تنش را تجربه کرده است. مطابق خروجی شاخص PMV در دو ایستگاه کهک و سلفچگان نیز دوره آسایش اقلیمی محدود و کوتاه بوده و تنها ۹/۵۶ و ۱۰/۱۱ درصد از روزهای سال را به خود اختصاص داده است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تنش‌هایی گرمایی و سرمایی سبب ایجاد محدودیت گردشگری در استان می‌شود.

۴۷/۸۱ درصد در ایستگاه کهک متغیر بوده است. نتایج این بخش نشان داد که ۳۸/۲۵، ۴۸/۶۳ و ۴۷/۸۱ درصد از ایام سال ایستگاه‌های قم، سلفچگان و کهک در محدوده تنش‌های سرد تا خیلی سرد قرار داشته است. نتایج حاصل از شاخص PMV در منطقه مورد مطالعه نشان داد که ایستگاه قم در ۹۰/۱۶ درصد از روزهای سال شرایط اقلیمی نامطلوب (خارج از محدوده آسایش حرارتی) و



شکل ۶- فرکانس محدوده‌های مختلف شاخص الف) PET و ب) PMV به تفکیک ایستگاه‌های قم، سلفچگان و کهک در دوره آماری (۲۰۰۴-۲۰۱۷)

Fig. 6- Frequency of different ranges of indices a) PET and b) PMV in stations of Qom, Salafchegan and Kahak (2004-2017)

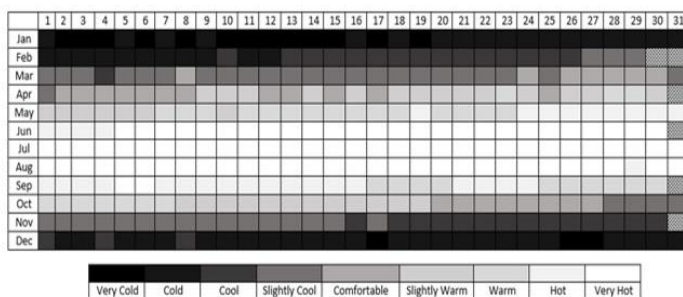
دارد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت مشکل اساسی در منطقه مورد مطالعه تنش گرمایی بسیار شدید (به مدت ۸۹ روز)، تنش گرمایی شدید (به مدت ۳۲ روز)، تنش گرمایی متوسط (به مدت ۳۵ روز) و تنش گرمایی اندک (به مدت ۳۳ روز) است. همچنین محدودیت‌های سرمایی با درجه‌های مختلف در ایستگاه قم از اول ژانویه (روز اول) تا ۱۷ مارس (روز ۷۷ ام) و همچنین از دهم اکتبر (روز ۲۸۴ ام) تا پایان دسامبر (روز ۳۶۶ ام) ادامه دارد. با یک نگاه اجمالی به نتایج حاصل از سری زمانی شاخص PET در ایستگاه‌های کهک و سلفچگان، مشاهده می‌شود که در ایستگاه‌های مرتفع استان، شرایط مشابه بوده و به مراتب از وضعیت مطلوبتری نسبت به منطقه‌های کم ارتفاع برخوردار هستند. مطابق شکل (۸) و بر اساس آستانه‌های تعریف شده برای شاخص PET، از اول ژانویه تا

تحلیل میانگین بلندمدت روزانه شاخص PET و PMV

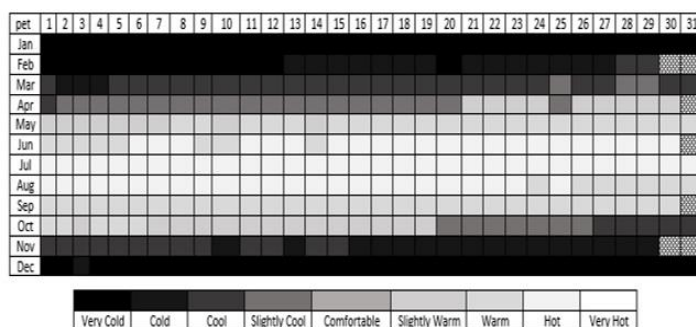
با توجه به اینکه، استناد به نتایج میانگین درازمدت ماهانه در بخش قبل، نمی‌تواند تصویری صحیح از شرایط زیست‌اقلیمی منطقه را مختلف به نمایش گذارد، در نتیجه استفاده از داده‌های میانگین ماهانه در محاسبه شاخص‌ها مقبولیتی توسط پژوهشگران نداشته و این امر موجب کاربرد داده‌های روزانه در محاسبه این دسته از شاخص‌ها شده است. (Perch-Nielsen et al, 2010; Roshan et al, 2015). شکل (۷) تغییرپذیری‌های روزانه شاخص PET را در ۳۶۵ روز سال برای ایستگاه قم نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در ایستگاه قم، فقط ۲۹ روز از سال در دو دوره مجزا، از تاریخ ۲۴ مارس تا ۱۷ آوریل (به استثنای چند روز) و ۲۰ تا ۲۷ اکتبر در شرایط آسایش اقلیمی قرار

بدون تنش، کمابیش از ۲۰ اکتبر به بعد شرایط تنش سرما با درجه‌های مختلف در این ایستگاه دیده می‌شود و تا پایان دسامبر به طول می‌انجامد. در ایستگاه سلفچگان (شکل ۹) نیز مشابه با ایستگاه کهک، از اول ژانویه تا بیست آوریل تنش سرمایی با درجه‌های مختلف از بسیار شدید تا تنش سرمای اندک اتفاق افتاده است. از تاریخ ۲۱ آوریل، منطقه از شرایط آسایش حرارتی برخوردار می‌شود که این وضعیت تا پایان روز دهم می‌برقرار خواهد بود. دوره دوم آسایش اقلیمی این ایستگاه از ۷ اکتبر آغاز و تا ۱۹ اکتبر به مدت ۱۳ روز ادامه دارد. بین این دوره، به تدریج شرایط تنش گرمایی اندک (به مدت ۱۶ روز)، تنش گرمایی متوسط (به مدت ۱۰ روز)، تنش گرمایی زیاد (به مدت ۷۷ روز) حکم فرماست. محدودیت‌های سرمایی این منطقه که پس از پایان دوره دوم اتفاق می‌افتد از ۲۰ اکتبر تا پایان سال تداوم خواهد داشت.

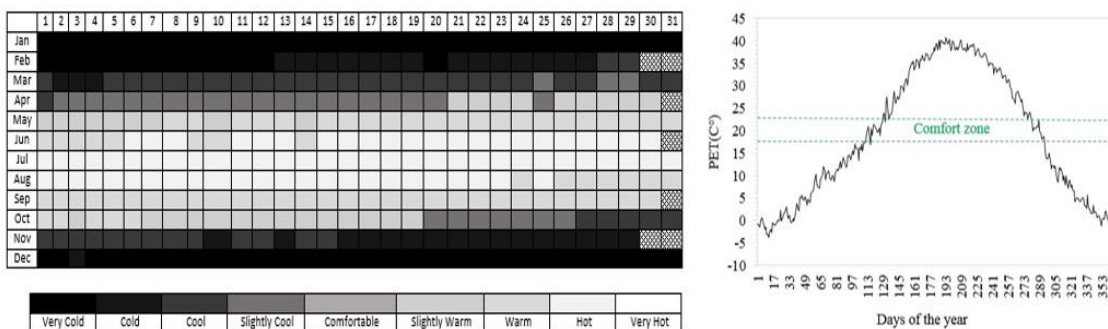
بیست آوریل در ایستگاه کهک تنش سرمایی با درجه‌های مختلف از بسیار شدید تا تنش سرمای اندک حکم فرماست و در تاریخ ۲۱ آوریل بطور کامل حذف می‌شود. وضعیت حرارتی بدون تنش در ایستگاه کهک در دو دوره مجزا از هم برقرار است، دوره اول از ۱۸ آوریل تا ۱۵ می (از روز ۱۰۹ تا روز ۱۳۶) و دوره دوم از ۷ تا ۱۹ اکتبر (از روز ۲۸۱ تا ۲۹۳). بعد از پایان دوره اول، آسایش حرارتی جای خود را به شرایط گرمتر می‌دهد، یعنی به تدریج شرایط تنش گرما ایجاد می‌شود. این شرایط ابتدا با شرایط تنش گرمایی اندک که تا حدود ۲۵ می (روز ۱۴۶ ام) ادامه می‌یابد، آغاز می‌شود و سپس با تنش گرمایی متوسط مواجه می‌شود که تا ۶ ژوئن تداوم پیدا می‌کند. بعد از این تاریخ تا ۲۴ اوت تنش گرمایی زیاد حاکم خواهد بود و بعد از آن به تدریج شرایط گرما کاهش یافته و دوباره شرایط تنش گرمایی اندک تا ۶ اکتبر وجود دارد. سپس با طی کردن یک دوره ۱۳ روزه با شرایط



شکل ۷- شاخص روزانه PET (چپ) و سری زمانی همین شاخص در طول سال (راست) برای ایستگاه قم.
 Fig. 7- Daily PET index (left) and the time series of this index during the year (right) for Qom station



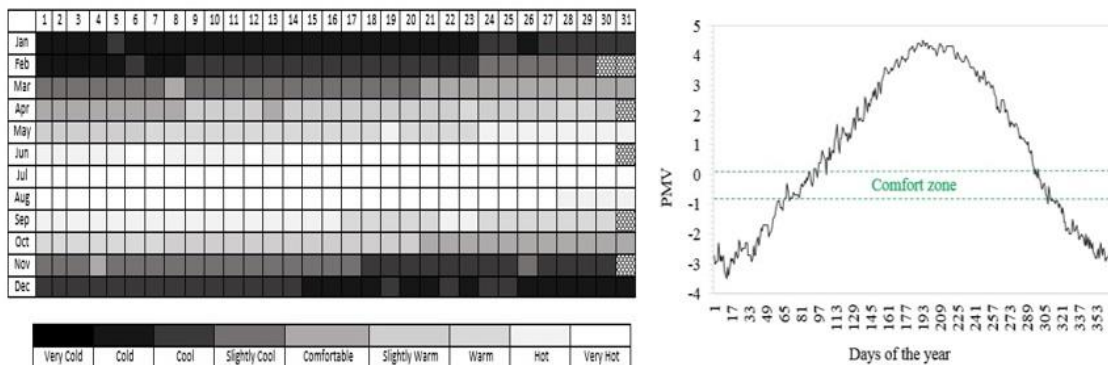
شکل ۸- شاخص روزانه PET (چپ) و سری زمانی همین شاخص در طول سال (راست) برای ایستگاه کهک
 Fig. 8- Daily PET index (left) and the time series of this index during the year (right) for Kahak station



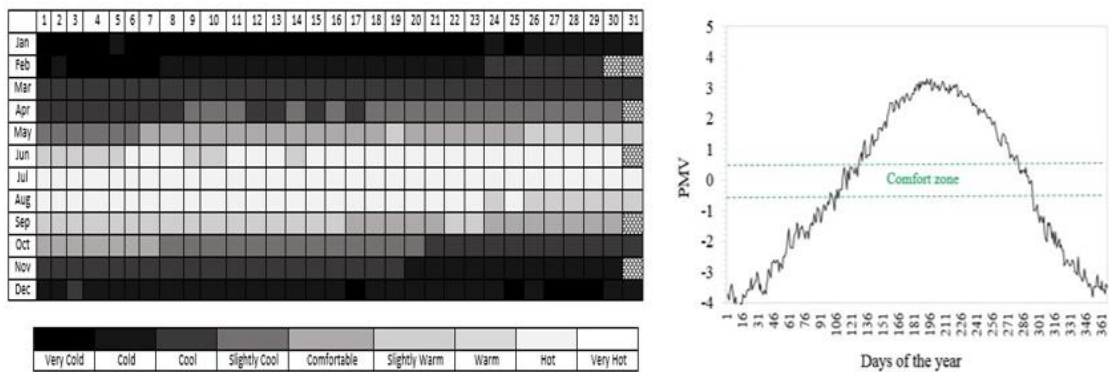
شکل ۹- شاخص روزانه PET (چپ) و سری زمانی همین شاخص در طول سال (راست) برای ایستگاه سلفچگان
Fig. 9- Daily PET index (left) and the time series of this index during the year (right) for Salafchegan station

محدود شرایط آسایش حرارتی در منطقه حاکم می‌شود و پس‌از آن از ابتدای ماه نوامبر کاهش تدریجی دما تا اواخر ماه مارس ادامه می‌یابد. از مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای دو ایستگاه کهک و سلفچگان (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) مشاهده می‌شود که در ایستگاه‌های مرتفع استان، شرایط مشابه بوده و در مقایسه با ایستگاه قم دوره آسایش حرارتی طولانی‌تر شده است و در دو دوره ۲۷ (۹ آوریل تا ۶ می) و ۱۲ روزه (۸ اکتبر تا ۲۰ اکتبر) بطور کمابیش مشترک در هر دو ایستگاه توزیع شده است. تنش‌های گرمایی در این دو ایستگاه بطور پیوسته و مشترک از ۷ می آغاز و تا ۷ اکتبر ادامه می‌یابد. همچنین وجود تنش گرمایی زیاد به مدت ۷۷ روز شرایط را برای حضور در فضای باز نامناسب خواهد کرد. از اواخر اکتبر با آغاز فصل سرما نیز هوا به تدریج سرد شده و دما در ماه دسامبر و ژانویه به کمترین میزان خود می‌رسد.

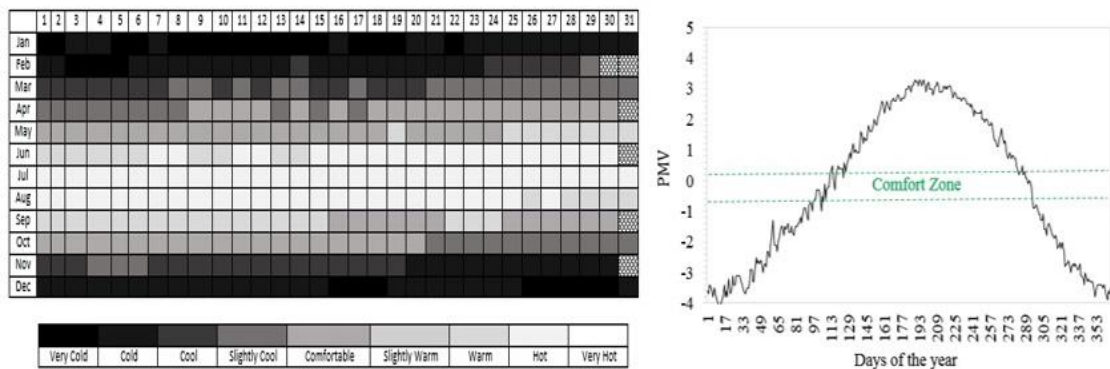
شکل (۱۰) تا (۱۲) تغییرپذیری‌های روزانه شاخص PMV تخمین زده‌شده برای ۳۶۵ روز سال را به تفکیک سه ایستگاه قم، سلفچگان و کهک نشان می‌دهد. خروجی‌های مقادیر روزانه شاخص PMV مشابه شاخص PET بوده و نشان می‌دهد که بنابر شکل (۱۰) شرایط بدون تنش در دو دوره کوتاه‌مدت از تاریخ ۲۱ می تا ۴ آوریل و ۲۱ تا ۳۰ اکتبر در ایستگاه قم حاکم بوده است. پس از پایان دوره اول شرایط اقلیمی مطلوب، به تدریج شاهد طیف گسترده‌ای از تنش‌های گرمایی هستیم. این دوره ۲۳۰ روزه از تاریخ ۹ آوریل (روز ۱۰۰ ام) آغاز و با درجات مختلفی تا ۲۰ اکتبر (روز ۳۳۰ ام) در ایستگاه قم ادامه پیدا می‌کند و از تاریخ ۶ ژوئن به مدت سه ماه، بالاترین تنش گرمایی رخ می‌دهد. بر اساس آستانه‌های تعیین‌شده برای این شاخص (جدول ۲) پس از پایان این دوره بلندمدت به مدت



شکل ۱۰- نتایج شاخص PMV به‌صورت روزانه (چپ) و سری زمانی همین شاخص در طول سال (راست) برای ایستگاه قم
Fig. 10- Daily PMV index (left) and the time series of this index during the year (right) for Qom station



شکل ۱۱- نتایج شاخص PMV به صورت روزانه (چپ) و سری زمانی همین شاخص در طول سال (راست) برای ایستگاه سلفچگان
 Fig. 11- Daily PMV index (left) and the time series of this index during the year (right) for Salafchegan station



شکل ۱۲- نتایج شاخص PMV به صورت روزانه (چپ) و سری زمانی همین شاخص در طول سال (راست) برای ایستگاه کهک
 Fig. 12- Daily PMV index (left) and the time series of this index during the year (right) for Kahak station

نتیجه گیری

اقلیمی در این منطقه شده است بطوری که امکان رخداد تمام شرایط زیست اقلیمی با تنوع کمابیش زیادی در گستره استان قم وجود دارد. مشابه نتایج حاضر برای شهر قم توسط Mohamadi and Saedi (2009) به دست آمد به گونه ای که آن ها در کار خود با استفاده از شاخص های دمای مؤثر، بیکر، ترجونگ، فشار عصبی نشان دادند که منطقه مورد مطالعه، از شرایط بسیار داغ تا بسیار خنک برخوردار است. با توجه به نتایج به دست آمده، دوره های آسایش و نبود آسایش (تنش های سرمای و گرمایی) شناسایی شده به تبعیت از آرایش توپوگرافی در قسمت های مختلف استان متفاوت می باشد به گونه ای که منطقه های مرتفع و کوهستانی با ۵۰/۲۷ درصد از ایام سال در قلمرو تنش های سرمای قرار گرفته اند. کمینه

در پژوهش حاضر، برای اولین بار آسایش حرارتی انسان در فضای باز استان قم که بعنوان یکی از بزرگترین مراکز مذهبی کشور شناخته شده است، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مقاله برگرفته از یافته های ارزیابی خروجی دو شاخص متداول PET و PMV در مقیاس های مختلف زمانی می باشد. یافته های حاصل از این پژوهش نشان داد خروجی شاخص های PET و PMV با اختلاف جزئی در توزیع زمانی، مشابه هم می باشند. مشابه این نتیجه برای نواحی آذربایجان شرقی توسط Zolfaghari (2018) و همچنین توسط Baghadeh *et al.* (2015) برای شهر اصفهان به دست آمد. تفسیر نتایج نشان داد که تاثیرهای ارتفاع و پراکنش توپوگرافی سبب پیدایش تنوع

به دست آمده از تجزیه و تحلیل داده‌ها می‌توان اذعان داشت که استفاده از یک شاخص به‌تنهایی مؤثر نیست و برای تحقق هدف‌ها باید از تلفیق شاخص‌های مختلف استفاده کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص‌های زیست‌اقلیمی مورد استفاده، توانایی آشکارسازی دوره‌های آسایشی و نبود آسایش استان قم را دارند و با واقعیت منطقه به‌خوبی سازگار هستند و با وجود تفاوت‌های جزئی، می‌توانند نمودهای کمابیش همگونی از اقلیم آسایشی این شهر نشان دهند و اطلاعات بهتری را برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در اختیار بگذارند. نتایج مشابهی در مورد توانمندی شاخص‌های PET و PMV توسط دیگر محققان گزارش شده است که از جمله می‌توان به نتایج مطالعه Heydari and manaf (2014) Esmaeli et al. (2012) Hedayati et al. (2012) اشاره کرد که نشان دهنده اعتبار یافته‌های این پژوهش می‌باشد.

سپاسگزاری

این مقاله از نتایج پروژه ارزیابی آسایش اقلیمی و بدی آب‌وهوای استان قم» که در تاریخ ۹۶/۰۱/۱۶ به شماره طرح ۲۹۶۷۳۵۳ در پژوهشکده هواشناسی به اتمام رسیده است، استخراج شده است.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Predicted Mean Vote
- 2 Physiologically Equivalent Temperature
- 3 Mean radiation temperature

Abdel-Ghany, A.M., Al-Helal, I. M. and Shady, M. R. 2013. Human Thermal Comfort and Heat Stress in an outdoor Urban Arid Environment, A Case Study. Advances in Meteorology Journal. Vol 2013, 1-7.

Akbarian, R., Roshan, S.R. and Negahban, S.,

میانگین درازمدت ماهانه شاخص PET برای این منطقه‌ها، در ماه‌های اکتبر، نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه (آبان، آذر، دی، بهمن، اسفند) توزیع شده است. تنش‌های گرمایی با ۵۱/۶۳ درصد غالب‌ترین شرایط حاکم در نواحی پست و کم ارتفاع که در قسمت‌های مرکزی، شرقی و شمال شرقی استان واقع شده‌اند، می‌باشد. بیشینه آستانه‌های شاخص بررسی شده، در این منطقه‌ها متعلق به ماه‌های می، ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر (خرداد، تیر، مرداد، شهریور و مهر) می‌باشد که مطابق با منحنی تغییرپذیری‌های روزانه در ماه ژوئیه (تیر) به نقطه اوج خود می‌رسد. با توجه به اینکه شهر قم در فصل تابستان بیشترین حجم گردشگران را به خود اختصاص داده است ولی فصل مناسبی برای سفر به این منطقه نخواهد بود. بنابر محاسبه‌های صورت گرفته در مقیاس روزانه مطلوب‌ترین شرایط آسایش حرارتی در دو دوره مجزا و در گستره کوچکی، حدفاصل عبور از فصل گرم به فصل سرد و به عکس در استان رخ می‌دهد. در منطقه‌های پست و کم ارتفاع که شامل نواحی مرکزی، شرقی و شمال شرقی می‌شود مطلوب‌ترین شرایط از اواخر مارس (فروردین) تا اوسط آوریل (اردیبهشت) و دوره دوم از ۲۰ تا ۲۷ اکتبر (آبان) برقرار است. بنابر مقایسه تطبیقی صورت گرفته شرایط آسایش حرارتی برای منطقه‌های کوهستانی کمی با تأخیر نسبت به منطقه‌های کم ارتفاع آغاز می‌شود و از ۱۸ آوریل (اردیبهشت) تا اواسط می (خرداد) و دوره دوم از ۷ تا ۱۹ اکتبر (آبان) تداوم دارد. با توجه به روش‌ها و شاخص‌های مختلف و نتایج

منابع

2016. Assessment of tourism climate opportunities and threats for villages located in the Northern Coasts of Iran. International Journal of Environmental Research. 10,601-612.

Ataie, H., Hasheminasab, S., Zarean, M. and Heydari, R., 1393. Evaluate the effects of daily

- changes in the weather Tourism in Kurdistan Using PET, Scientific - Research Quarterly of Geographical Data.23,32-40.(In Persian with English abstract).
- Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H. and Tinz, B., 2012. Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*. 56, 515-535.
- Baaghdeh, M., Asgari, A., Shoja, F. and Jamalabadi, J., 1393. Investigation and comparison of the performance of Rayman model parameters in determining the appropriate tourism calendar. *Geography and Development Journal*. 36,123-135(In Persian with English abstract).
- Coccolo, S., Jerome, K., Scartezzini, J.H. and Pearlmutter, D., 2016. Outdoor human comfort and thermal stress:A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate Journal*. 18, 33-57.
- Deb, C. and Ramachandraiah, A., 2010. The significance of physiological equivalent temperature (PET) in outdoor thermal comfort studies. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2(7), 2825–2828.
- Esmaili, R., Gandomkar, A. and Habibi Nokhandan, M., 1390. Assessment of comfortable climate in several main Iranian tourism cities using physiologic equivalence temperature index. *Natural Geography Journal*. 75, 1-18. (In Persian with English abstract).
- Epstein, Y. and Moran, D.S. 2006. Thermal comfort and the heat stress indices, *Industrial Health Journal*. 44(3), 388–398.
- Forsthoft, A. and Neffgen, H., 1999. The assessment of heat radiation. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 23(5-6), 407–414.
- Fanger, P.O., 1972. *Thermal comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. SAGE Journal. 92, 164-164.
- Givoni, B., Noguch, M. and Saaroni, H., 2003. Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings Journal*. 35(1), 77–86.
- Ghani, S., Bialy, E.M., Bakochristou, F., Gamaledin, S.M.A., Rashwan. M.M. and Hughes, B., 2017. Thermal comfort investigation of an outdoor air-conditioned area in a hot and arid environment. *Science and Technology for the Built Environment Journal*. 23, 1113–1131.
- Höppe, H., 1999. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*. 43, 71-75.
- Honjo, T., 2009. Thermal comfort in outdoor environment. *Global Environmental Research*.13, 43-47.
- Heidari, S. and Manaf, A., 1392. Evaluation of outdoor comfort characteristics. *Geography and Regional Development Magazine. Geography and Regional Development Journal*. 20, 197-216. (In Persian with English abstract).
- Hedayatirad, F., Shabankari, M., Zarghamiyan, M.R. and Abraghei, S., 1395. Evaluation of the bioclimatic indices influencing human comfort. *Environmental science and technology Journal*. 3, 24-41(In Persian with English abstract).
- Jendritzky, G. and Nübler, W., 1981. Model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. *Meteorology and Atmospheric Physics Journal*. 29,(4), 313-326.
- Jendritzky, G., 1990. Selected questions of topical interest in human bioclimatology. *International Journal of Biometeorology*. 35(3), 139–150.

- Jan Paul, B., Grigorieva, E.A. and Matzarakis, A., 2013. Human-Biometeorological assessment of urban structures in extreme climate conditions: The example of Birobidzhan, Russian Far East. Hindawi Publishing Corporation Advances in Meteorology Journal. Vol 2013, 1-10.
- Khoshnafas, M. and Sedaghat, M., 1394. Climate comfort investigation by weather severity index (Case study Northwest of Iran). Applied Climatology Journal. 2, 94-104. (In Persian with English abstract).
- Lindqvist, T.S.M. and Lindqvist, S., 2004. Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Goteborg. International Journal of Biometeorology. 48(3), 149-156.
- Mcgregor, G., Markou, M., Bartzokas, A. and Katsoulis, B., 2002. An evaluation of the nature and timing of summer human thermal discomfort in Athens, Greece. Climate Research Journal. 20, 1, 83-94.
- Matzarakis, A. and Mayer, H., 1996. Another kind of environmental stress: Thermal Stress. News Letter. 18, 7-10.
- Matzarakis, A., Mayer, H. and Iziomon, M.G., 1999. Applications of a universal thermal index: Physiological equivalent temperature. International Journal of Biometeorology. 43, 78-84.
- Matzarakis, A., Rutz, F. and Mayer, H., 2006. Modeling the thermal bioclimate in urban areas with the RayMan model. In Proceedings 23th Conference Clever Design, 6th- 8th September, Geneva, Switzerland.
- Matzarakis, A., 2007. Climate thermal comfort and tourism. In Proceedings 1th International Workshop on Climate Change and Tourism. 9th - 11th April, Djerba, Tunisia.
- Matzarakis, A. and Amelung, B., 2008. Physiological equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans. Seasonal Forecasts, Climatic Change and Human Health Journal. 30, 161-172.
- NIOSH, 1986. Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Hot Environment, National Institute for Occupational Safety and Health, Washington DC.
- Najafi, M.A. and Najafi, N., 1391. Climate comfort investigation by PMV and PPD methods. Haft Hesar Journal. 1, 61-70. (In Persian with English abstract).
- Nikolopoulou, M. Baker, N. and Steemers, K., 2001. Thermal comfort in outdoor urban spaces: Understanding the human parameter. Solar Energy Journal. 70, 227-235.
- Parsons, K., 2014. Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort and Performance. London, New York.
- Perch-Nielsen, S.L., Amelung, B. and Knutti, R., 2010. Time is of the essence: adaptation of tourism demand to climate change in Europe. Climate Change Journal. 103, 363-381.
- Rozati, S.H. and Ghanbaran A., 1393. Comfort evaluation in urban open spaces based on wind comfort criteria, Case study: Isfahan. Environmental Sciences Journal. 4, 105-112 (In Persian with English abstract).
- Roshan, GH., Yousefi, R. and Fitchett, J.M., 2015. Long-term trends in tourism climate index scores for 40 stations across Iran: the role of climate change and influence on tourism sustainability. International Journal Biometeorol. 60, 33-52.

Rodrigues, A.M., Piedade, C.D. and Braga, A.M., 2009. Termica de Edificios; Orion, Amadora.

Rubistein, M., Ganor, E. and Ohring, G., 1980. Areal distribution of the discomfort index in Israel. Journal. 24, 315-322.

Stathopoulos, T., Wu, H. and Zacharias, Z., 2004. Outdoor human comfort in an urban climate. Building and Environment Journal. 39, 297-305.

Spagnolo, J. and de Dear, R., 2003. A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. Building and Environment Journal. 38, 721-738.

Tseliou, A., Ioannis, X.T., Lykoudis, S. and Nikolopoulou, M., 2010. An evaluation of three biometeorological indices for human thermal comfort in urban outdoor areas under real climatic conditions. Building and Environment Journal. 45, 1346-1352.

Van, K.D.L., Boerstra, A.C., Raue, A.K. and Kurvers, S.R., 2002. Thermal indoor climate building performance characterized by human comfort response., Energy and Buildings Journal. 34(7), 737-744.

Yahia, M.W. and Johansson, E., 2013. Evaluating the behavior of different thermal indices by investigating various outdoor urban environments in the hot dry city of Damascus, Syria. International Journal of Biometeorology. 57, 615-30.

Zolfaghari, H., 1390. Setting the appropriate time calendar for Tabriz using PET and PMV indexes. Geographic Research Journal. 62, 129-141.





Environmental Sciences Vol.16 / No.4 / Winter 2019

167-186

Assessment of thermal comfort in urban open space (Case study: Qom province)

Faezeh Noori*, Abbas Ranjbar and Ebrahim Fattahi

Department of Air Pollution, Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran

Received: 2017.12.31

Accepted: 2019.01.01

Noori, F., Ranjbar, A. and Fattahi, E., 2019. Assessment of thermal comfort in urban open space (Case study: Qom province). *Environmental Sciences*. 16(4): 167-186.

Introduction: Open spaces are the most important area of human social exchange, which may be affected by a wide range of factors. Encouraging individuals for being outdoor is one of the main factors for economic, social and political development in the cities. Studying and determining the limitations and climate hazards along with noticing their hidden ecological potentials in different seasons of the year should be taken into account for different provincial planning. It can also play a key role in urban and zone planning. For this reason, the objective of this research was the determination of the thermal comfort of people in Qom Province's outdoor.

Material and methods: In this research, predicted mean score (PMV), equivalent physiological temperature (PET) and human thermal comfort in outdoors of Qom Province were analyzed. For this purpose, five parameters including temperature, relative humidity, wind speed, water vapor pressure and cloud coverage in three weather stations of Qom, Kahak, and Salafchegan were extracted in a 12-year period of time (2004-2017). The data were then transferred to RayMan software in different time scales and then PET and PMV were calculated and analyzed.

Results and discussion: Our analyses showed that climate comfort period in this province was limited to two separate periods, which is simultaneous with the transition of the warm period into a cold one or vice versa. This situation contains 7.92% of the year; the first period is during April and May, while the second period occurs in October. These months were the best times for environmental activities in Qom Province. Because of geographic variety and topographic distribution, the inconsistency of the thermal situation can be clearly observed in this research. Mountainous places were faced with cold tensions in 50.27% of the year and low altitude places were faced with warm tensions in 51.63% of the year. Monthly analysis showed that the limiting factors of thermal comfort in the central and eastern part of the province were medium and high thermal tensions in May, June, January, August, and September, while the only limitation of mountainous cities was

* Corresponding Author. *E-mail Address:* faezeh.noori@gmail.com

the cold tensions happening in November, December, January, February, and March. The results showed that the effects of altitude and topographic distribution caused climate variations in this zone, which makes every ecological climate situation possible to happen in Qom province.

Conclusion: Results of this research showed that the output of eco-climate factors of PET and PMV has the capability of clarifying comfort and discomfort periods in Qom Province. Besides minor differences, it can present homogeneous phenomenon of comfort climate in this city and provide better information for planning and management purposes. In general, according to different methods, factors, and data analysis, an integration of different factors should be considered to achieve our goals.

Keywords: PET, PMV, RayMan, Thermal comfort..