

تعیین تقویم آسایش حرارتی شهر سبزوار با استفاده از شاخص‌های دمای معادل فیزیولوژی (PET) و متوسط نظر پیش‌بینی شده (PMV)

محمود احمدی^{۱*} مهدی اسدی^۲ عباسعلی داداشی رودباری^۳

- ۱- استادیار اقلیم‌شناسی دانشگاه شهید بهشتی
- ۲- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی کشاورزی دانشگاه حکیم سبزواری
- ۳- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی شهری دانشگاه شهید بهشتی

چکیده

شرایط نامطلوب آسایش حرارتی (تنش‌های سرمایی و گرمایی) بر جسم و روان انسان تأثیر گذاشته و در نتیجه، فرد متحمل ناراحتی، از دست دادن کارایی و سرانجام مختل شدن سلامتی‌اش می‌گردد. این در حالی است که شرایط آسایش حرارتی مطلوب اثرات مثبتی را به جا می‌گذارند. در پژوهش پیش‌رو به ارزیابی تطبیقی شاخص‌های دمای معادل فیزیولوژیک (PET) و متوسط نظر پیش‌بینی شده (PMV) از فراسنج‌های اقلیمی میانگین درازمدت ۶۰ ساله (۲۰۱۵-۱۹۵۵ میلادی) ایستگاه همدید سبزوار شامل درجه حرارت، میانگین، درجه حرارت کمینه روزانه، میانگین درجه حرارت بیشینه روزانه، دمای هوای خشک برحسب درجه سانتی‌گراد، فشار بخار برحسب هکتوپاسکال، رطوبت نسبی در حساب درصد، سرعت باد برحسب متر بر ثانیه و میزان ابرناکی آسمان برحسب اکتا استفاده شده است. نتیجه این پژوهش نشان می‌دهد که دوره آسایش اقلیمی در شهر سبزوار بسیار محدود است. به طوری که دوره آسایش اقلیمی فقط به مدت ۳۵ تا ۴۰ روز با دو اوج پاییزه و بهاره به طول می‌انجامد؛ و این در حالی است که دوره تنش گرما در حدود ۵۰ روز از تیرماه تا حوالی ۲۰ مرداد ادامه می‌یابد. ولی عاملی که به‌عنوان مشکل اصلی از نظر آسایش حرارتی در شهر سبزوار شناخته شده است، حاکمیت دوره طولانی و تنش‌زای سرماست، به طوری که تنش سرمایی با درجات مختلف تقریباً ۱۹۰ روز از سال، از دهه سوم مهرماه آغاز و این شرایط تا دهه دوم فروردین ادامه می‌یابد.

واژگان کلیدی: شاخص دما-فیزیولوژی، مدل بیلان انرژی انسان، PET، Ray man-PMV، سبزوار.

* نویسنده رابط: ahmadi@sbu.ac.ir

مقدمه

در چند سال اخیر آسایش حرارتی در فضای باز شهری به دلیل این که می‌تواند در کیفیت زندگی شهروندان و گردشگران تأثیر به‌سزایی داشته باشد مورد توجه بسیار قرار گرفته است (سالتا و همکاران^۱، ۲۰۱۵). در پژوهش حاضر فضای باز شهری به مفهوم فضای ساخته‌شده در شهر است که محیط آن تغییر شکل یافته است. همچنین مقیاس مطالعه فضای باز شهری بین ۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتر است (موچیدا و لون^۲، ۲۰۰۸). فارغ از مقیاس فضای باز شهری آنچه ارزیابی آسایش حرارتی فضای باز را با محیط داخلی متفاوت ساخته است؛ نیاز حرارتی متفاوت افراد با توجه به منطقه مورد مطالعه آن‌ها است که در این خصوص بحث کیفیت حرارتی در یک فضای باز مورد توجه قرار خواهد گرفت (اسپانگلو و دی دیر^۳، ۲۰۰۳). کیفیت حرارتی نیز به‌طور قابل توجهی با محیط داخلی متفاوت است. در واقع در محیط داخلی شرایط حرارتی چندان مطرح نبوده؛ چراکه به لطف سیستم‌های تهویه شرایط حرارتی به راحتی قابل کنترل است؛ این در حالی است که در فضای باز با توجه به پدیده‌های طبیعی و تغییرات متغیرهای دمای هوا، سرعت باد، رطوبت هوا، دمای سطوح تابشی و تابش خورشیدی غیر قابل کنترل بوده و نیازمند یک ارزیابی دقیق از شرایط موجود و ارائه بهترین زمان برای آسایش حرارتی است (بودن و قراب^۴، ۲۰۰۵؛ آندرید و همکاران^۵، ۲۰۱۱). با این حال آسایش حرارتی تنها توسط شرایط زیست‌محیطی مورد نظر نبوده، هرچند عامل یاد شده تأثیر عمیقی بر امتناع یا پذیرش شرایط ریز اقلیمی دارد، اما تعویض لباس با توجه به فصل، تغییرات نرخ متابولیک، تغییر حالت بدن و سازگاری با شرایط بومی از پارامترهای قابل توجه آسایش حرارتی می‌باشند (ون هوف و هسن^۶، ۲۰۰۷). بررسی‌های آماری نشان داده است که فعالیت در فضای باز تفریحی همانند راه رفتن، دوچرخه‌سواری و... نقش به‌سزایی در بهداشت روانی و فیزیولوژیکی اشخاص دارد (حکیم و همکاران^۷، ۱۹۹۸). در همین حال، صرف زمان بیشتر در خارج از منزل به‌طور مؤثری مصرف انرژی ساختمان برای تهویه مطبوع و نور مصنوعی را به‌خصوص در مناطق گرم و مرطوب کاهش می‌دهد.

مطالعات آسایش حرارتی انسان از سال ۱۹۱۰ در انواع محیط‌های داخلی و فضای باز شروع شده است (بندیک و کارپنتر^۸، ۱۹۱۰؛ یاگلو و همکاران^۹، ۱۹۳۵). بخش اعظم توجهات اخیر در حوزه آسایش حرارتی به فضای باز بوده است که مورد توجه طیف گسترده‌ای از محققان اقلیم‌شناسی شهری و برنامه‌ریزی شهری بوده است (آرنفیلد^{۱۰}، ۲۰۰۳؛ روس^۱، ۲۰۰۷؛ استورات^۲، ۲۰۱۱). از روش‌های واکاوی آسایش حرارتی در

¹Salata and el al.,²Mochida & Lun³Spagnolo & De Dear⁴Bouden & Ghrab⁵Andrade and et al.,t⁶Van Hoof & Hensen⁷Hakim and et al.,⁸Benedict & Carpenter⁹Yaglou & Miller¹⁰Arnfield

فضای باز می‌توان به شاخص‌های PMV^۳ (هوپ^۴، ۱۹۹۹)؛ COMFA^۵ (برون و گیلسی^۶، ۱۹۹۵)؛ MENEX^۷ (بلازاجسک^۸، ۲۰۰۴؛ ۲۰۰۵)؛ PET^۹ (استایگر و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۲)؛ SET^{۱۱} (گیج^{۱۲} و همکاران، ۱۹۷۱؛ گیج و همکاران^{۱۳}، ۱۹۸۶) همین شاخص بعدها با نام شاخص *OUT-SET توسعه یافت (پیک آپ و دی دیر^{۱۴}، ۲۰۰۰)، مدل Sultriness (استیدمن^{۱۵}، ۱۹۸۴)؛ مدل‌های تنش سرمای^{۱۶} CS و تنش گرمایی^{۱۷} HS (آلسیمس و کالما^{۱۸}، ۱۹۷۹)؛ شاخص‌های تعادل درجه انرژی پوستی^{۱۹} STEBIDEX و شاخص بودجه حرارت^{۲۰} HEBIDEX (دی فریتز^{۲۱}، ۱۹۸۵) اشاره نمود. از بین تمام شاخص‌های معرفی شده و صدها شاخص دیگر که در حوصله مطالعه حاضر نمی‌گنجد، شاخصی برای برنامه‌ریزی مدیریت گردشگری و طراحی تقویم گردشگری بهینه است که مبتنی بر شرایط آب و هوایی و چهار متغیر اصلی اثرگذار در آسایش حرارتی انسان شامل دمای هوا، رطوبت، سرعت باد و تابش (متوسط درجه حرارت تابشی) باشد؛ تا بتوان بر اساس آن بهترین نتیجه را ارائه داد.

شاخص‌های مرتبط با فیزیولوژی انسانی که از رابطه بیلان بدن انسان مشتق گردیده‌اند، امروزه اعتبار بیشتری در مطالعات زیست‌اقلیمی انسانی هم‌چنین آب و هواشناسی توریسم کسب نموده‌اند (ماتزاراکیس^{۲۲}، ۲۰۰۱، ۴۵). با توجه به اهمیت شاخص‌های دما-فیزیولوژیک تاکنون تحقیقات زیادی در داخل و خارج کشور انجام شده است که به چند مورد اشاره خواهد شد:

اهیر و ماتزاراکیس^{۲۳} (۲۰۰۷)، در پژوهشی به بررسی درجه حرارت‌های معادل و هم‌ارز فیزیولوژی انسان را در ده روز مشخص از سال بررسی کردند و سپس با ترکیب نتایج حاصل از درجه حرارت‌های معادل و هم‌ارز فیزیولوژی انسان با متغیرهای دیگر هواشناسی از قبیل درجه حرارت، تاب نور خورشید و مقدار

¹Roth

²Stewart

³Predicted Mean Vote

⁴Höppe

⁵COMFA(Comfort Formula)

⁶Brown & Gillespie

⁷Man-Environment heat Exchange

⁸Blazejczyk

⁹Physiological Equivalent Temperature

¹⁰Staiger and et al.,

¹¹Standard Effective Temperature

¹²Gagge and et al.,

¹³Gagge and et al.,

¹⁴Pickup & de Dear

¹⁵Steadman

¹⁶ColdStress

¹⁷Heat Stress

¹⁸Auliciems & Kalma

¹⁹Skin Temperature Energy Balance Index

²⁰Heat Budget Index

²¹de Freitas

²²Matzarakis

²³Oehier and Matzarakis

تعداد روزهای بارندگی و طوفان مناطق آسایش را برای توریست‌ها مشخص کردند. دب و رامچندریه^۱ (۲۰۱۰) به بررسی آسایش حرارتی در پایانه‌های جنوبی راه‌آهن در هند پرداختند؛ نامبردگان با به‌کارگیری شاخص PET به ارزیابی رضایت مسافران در پایانه‌های جنوبی هند در ماه ژوئن پرداختند و در نهایت پیشنهادهایی برای آسایش بهتر مسافران ارائه دادند. پینگ لاین و ماتزاراکیس^۲ (۲۰۱۱) در پژوهشی به تأثیر پارامترهای آب و هوایی بر اساس ادراک حرارتی در تایوان و شرق چین پرداختند. در این پژوهش از شاخص‌های PET و TPCS (طبقه‌بندی آسایش حرارتی) استفاده شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مناطق شرق چین و تایوان برای مردم منطقه معتدله در فصول بهار و پاییز و مناطق جنوبی در بهار و تابستان برای مردم جنب حاره مطلوب می‌باشد. در ایران نیز مطالعاتی در رابطه شاخص‌های زیست‌اقلیمی و مرتبط با دما-فیزیولوژیک انجام گرفته است که به چند مورد اشاره خواهد شد؛ عطایی و هاشمی نسب (۱۳۹۱) به بررسی اقلیم توریستی استان سمنان با استفاده از شاخص دمای معادل فیزیولوژی (PET) پرداختند، بررسی‌های انجام شده نشان داد که همه ایستگاه‌ها در ماه‌های جولای و اوت درجه متفاوتی از تنش گرمایی اندک تا متوسط حاکم است. همچنین همه ایستگاه‌ها طی ماه ژانویه، فوریه، مارس و نوامبر با تنش سرمایی بسیار شدید تا متوسط برخوردار هستند. نجفی و نجفی (۱۳۹۱) به ارزیابی آسایش حرارتی با استفاده از روش‌های PMV و PET در بازار وکیل شیراز پرداختند. نتایج نشان داد که آسایش حرارتی در زمستان از نظر درجه تنش فیزیولوژیک، بدون تنش سرما و حساسیت حرارتی از درجه حرارت برخوردار می‌باشد و کمتر از ۱۵ درصد کاربران بازار از این شرایط ناراضی هستند.

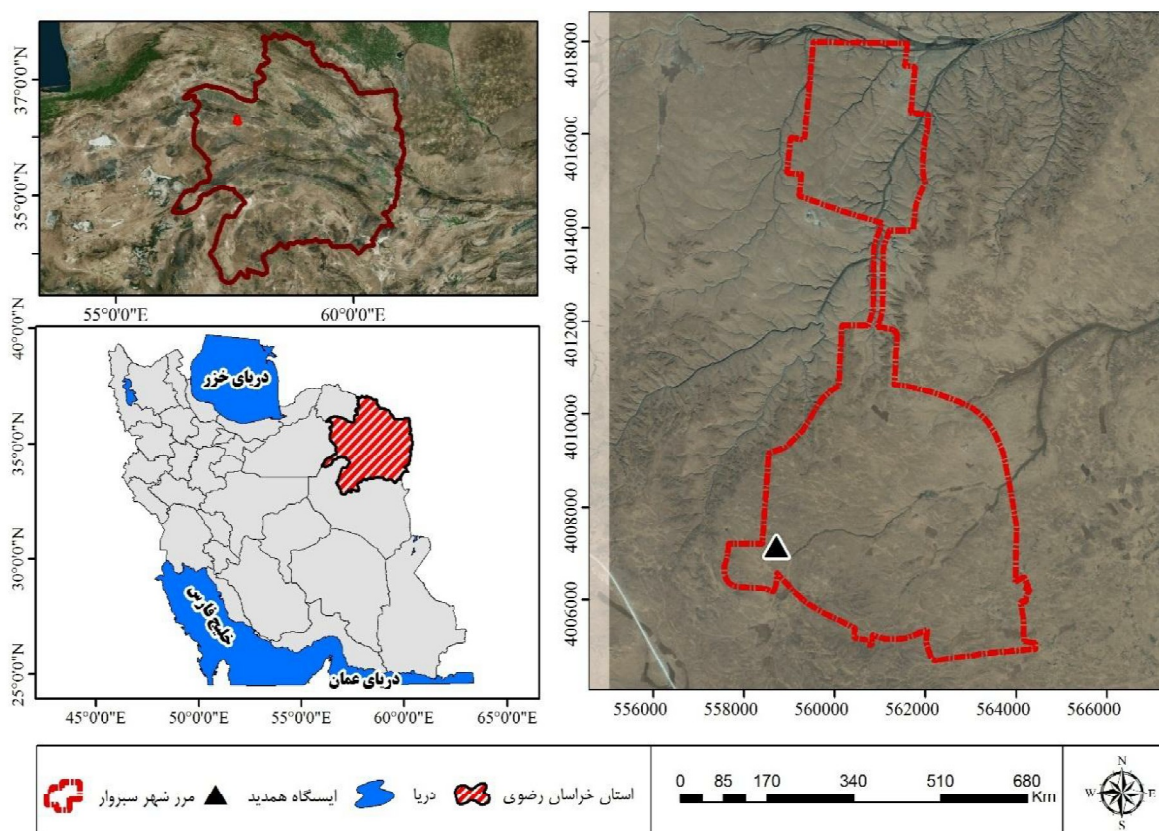
سبزوار یکی از بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهر خراسان رضوی و در مقیاسی گسترده‌تر شمال شرق ایران است. همچنین شهر سبزوار یکی از قدیمی‌ترین مناطق مسکونی ایران با قدمتی بیش از ۶۰۰۰ سال است؛ بدیهی است که شهری با چنین سابقه و قدمتی تاریخی، گردشگری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های اقتصادی باید مد نظر مسئولین و برنامه‌ریزان شهری باشد. با توجه شرایط اقلیمی شمال شرق کشور و از جمله شهر سبزوار، به‌طور سنتی از آنجایی که تعطیلات و درآمد گردشگری را در ایران کنترل می‌کند و معمولاً دوره گرم سال برای گردشگری این شهر انتخاب می‌شود؛ لازم است برنامه‌ریزی دقیقی برای حضور گردشگر تنظیم گردد. موانع اصلی برای حضور گردشگر در فصل سرد سال برف، یخبندان، سوز و در دوره گرم سال گرمای طاقت فرسا، باد همراه با گرد غبار به‌شمار می‌آید. در این پژوهش سعی بر این است که با استفاده از دو شاخص مبتنی بر بیلان انرژی انسانی، شرایط محیطی حرارتی این شهر در طول سال مورد بررسی قرار گیرد. نتایج پژوهش پیش‌رو می‌تواند در تنظیم برنامه‌های زمانی برای اجرای تورهای گردشگری و همچنین برنامه‌های لازم برای بالا بردن کمیت و کیفیت خدمات اورژانس و مؤسسه‌های پزشکی جهت خدمات لازم به گردشگران و مردم شهر سبزوار مورد استفاده قرار گیرد.

¹Deb & Ramachandriaiah

²Ping Lin & Matzarakis

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه شهر سبزوار بین $36^{\circ} 9' 7''$ تا $36^{\circ} 22' 30''$ عرض شمالی و $57^{\circ} 37' 30''$ و 57° طول شرقی و 970 متر از سطح دریا ارتفاع دارد که در شکل ۱ موقعیت آن نسبت به کشور ارائه شده است. شهر سبزوار (مرکز شهرستان سبزوار بر اساس تقسیمات کشوری ۱۳۹۱) با $31/7$ کیلومترمربع مساحت در 228 کیلومتری جنوب غربی مرکز استان خراسان رضوی (مشهد) واقع شده است. طبق تقسیمات جدید کشوری در سال ۱۳۸۳ و پس از تقسیم استان خراسان به سه استان خراسان رضوی، خراسان شمالی و خراسان جنوبی، مرکز شهرستان سبزوار در محدوده‌ی استان خراسان رضوی قرار گرفت. شهرستان سبزوار از شمال به اسفراین، از جنوب به کاشمر، از شرق به نیشابور و از غرب به شاهرود محدود است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

شاخص‌های مرتبط با فیزیولوژی انسان که از رابطه بیلان انرژی بدن انسان مشتق گردیده‌اند، امروزه در مطالعات زیست اقلیم انسانی از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. از جمله شاخص‌های شناخته‌شده‌ای که در این زمینه پیشنهاد شده‌اند شاخص‌های دمای معادل فیزیولوژیک^۱ و متوسط نظر پیش‌بینی شده^۲ که به ترتیب به شاخص‌های (PET) و (PMV) معروف هستند؛ اهمیت بیشتری یافته‌اند. اگرچه این دو شاخص اساساً

¹Physiological Equivalent Temperature

²Predicted Mean Vote

برای اهداف گردشگری طراحی نشده‌اند ولی با بعضی تغییرات و تعدیل‌ها امروزه از مهم‌ترین شاخص‌های آب و هواشناسی توریسم نیز به شمار می‌روند (ماتزاراکیس، ۲۰۰۱، ۴۵). از کاربردهای مهم این شاخص‌ها با توجه به اینکه مرتبط با فیزیولوژی و ارگانیزم بدن انسان می‌باشند، می‌توان در مطالعات برنامه‌ریزی‌های مدیریت پزشکی، اورژانس، مکان‌یابی زمانی و مکانی مراکز امداد رسانی و آسایش حرارتی شهروندان مورد استفاده قرار داد. در اوایل سال ۱۹۳۸ میلادی بود که دکتر باتنر^۱ در ارزیابی تأثیر حرارتی محیط بر روی بدن انسان اثرات مرکب تمام پارامترهای حرارتی را مورد توجه قرار داد. او اعتقاد داشت اگر کسی بخواهد تأثیر آب‌وهوا را بر روی ارگانیزم انسان مطالعه نماید، باید تمام اجزاء حرارتی محیط را مورد ارزیابی قرار دهد. همین دیدگاه منجر به مدل‌سازی بیلان حرارتی انسان گردید که در قالب رابطه شماره (۱) ارائه گردید.

$$(1) \quad M + W + R + C + E_D + E_{RE} + e_{SW} + S = 0$$

در رابطه فوق واحد همه عبارت‌ها وات بر مترمربع (w/m^2) می‌باشد:

M : نرخ سوخت ساز بدن؛ W : خروجی کار فیزیکی؛ R : تابش خالص بدن؛ C : جریان حرارت همرفتی E_D : جریان حرارت نهان تبخیری آب در پوست؛ E_{RE} : مجموع جریان‌های حرارتی مؤثر در گرمایش و تبخیر و تعرق؛ e_{SW} : جریان هوای مؤثر در تبخیر و تعرق بدن؛ S : جریان حرارت ذخیره‌شده جهت سرمایش و گرمایش توده بدن.

حال اگر بدن انسان در حال کسب انرژی باشد عبارت‌های رابطه تماماً مثبت و اگر بدن در حالت از دست دادن انرژی باشد عبارت‌های رابطه منفی خواهد بود که با توجه به ساختار رابطه (۱) امری بدیهی می‌باشد. ولی M معمولاً مثبت بوده ولی W ، E_D ، e_{SW} در اغلب موارد منفی می‌باشند.

شاخص‌های دمای معادل فیزیولوژیک و شاخص نظر متوسط پیش‌بینی‌شده از جمله مهم‌ترین شاخص‌های فیزیولوژی-دما محسوب می‌شوند که از طریق رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$(2) \quad PMV = (0.303 e^{-0.036M} + 0.028)[M - W] - H - E_c - C_{rec} - E_{rec}$$

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

$$(4) \quad E_c = 3.05 \times 10^{-3} [5733 .6.99 \times (M - W) - P_a] + 0.42(M - W - 58.18)$$

$$(5) \quad C_{rec} = 0.0014 M(34 - T_a)$$

$$(6) \quad E_{rec} = 1.72 \times 10^{-5} M(5867 - P_a)$$

H مستقیماً قابل اندازه‌گیری است. از طریق رابطه زیر نیز قابل محاسبه است:

$$(7) \quad H = K_{cl} = t_{sk} - t_{cl} / I_{cl}$$

^۱Buttner

C_{rec} : تبادل حرارت همرفتی تعرق (وات بر مترمربع)، E_{rec} : تبادل حرارت تبخیری تعرق (وات بر مترمربع)،

E_{sw} : تبادل حرارت تبخیری در سطح پوست مواقعی که در حالت حرارتی خنثی قرار دارد (وات بر مترمربع)،

I_{cl} = تابش لباس به طور متوسط برای تمام بدن (وات بر مترمربع)، M = آهنگ سوخت ساز بدن (وات بر مترمربع)، t_{cl} = دمای متوسط پوست (درجه سانتی پایه)، W = نیروی مکانیکی مؤثر (وات بر مترمربع)، E = تبادل حرارتی تبخیری در سطح پوست (وات بر مترمربع)، H = تلفات حرارت خشک به صورت همرفت، هدایت و تابش (وات بر مترمربع)، Pa = رطوبت، فشار بخار جزئی هوا (پاسکال)، Ta = دمای هوا (درجه سانتی گراد)،

مقیاس PMV نوعی تقسیم بندی احساس حرارتی ۷ درجه ای است که دامنه آن از ۳/۵- (سرد) تا ۳/۵+ (گرم) تغییر می کند. صفر در این مقیاس احساس حرارتی خنثی است (جدول ۱). برای محاسبه دقیق و سریع تر این شاخص از نرم افزار *RayMan* استفاده می شود. این نرم افزار به سفارش انجمن مهندسان آلمان در سال ۱۹۹۸ برای محاسبه شارهای تابشی در محیط های ساده و پیچیده بر اساس شاخص های متعددی از جمله دمای هوا، رطوبت هوا، سرعت باد، درجه ابرناکی آسمان، زمان روز و سال، ضریب انعکاس سطوح اطراف و ویژگی های زوایای سه بعدی اطراف طراحی شده است (ذوالفقاری، ۱۳۹۲، ۱۲۹)؛ و بعدها توسط ماتزاراکیس (۲۰۰۲) برای محاسبه شارهای تابشی به ویژه بین ساختمان های شهری پیشنهاد شده است.

جدول ۱- مقادیر شاخص های PET و PMV در درجات مختلف حساسیت انسان (ماتزاراکیس و همکاران،

(۱۹۹۹)

PMV	$PET (c^{\circ})$	حساسیت حرارتی	درجه تنش فیزیولوژیک
		خیلی سرد	تنش سرمایی بسیار شدید
-۳	۴	سرد	تنش سرمای شدید
-۲	۸	خنک	تنش سرمای متوسط
-۱	۱۳	کمی خنک	تنش سرمای اندک
۰	۱۸	راحت	بدون تنش سرما
+۱	۲۳	کمی گرم	تنش گرمای اندک
+۲	۲۹	گرم	تنش گرمای متوسط
+۳	۳۵	خیلی گرم	تنش گرمای شدید
	۴۱	داغ	تنش گرمای بسیار شدید

شاخص دما فیزیولوژیک یا PET نیز یکی دیگر از شاخص های معروف دما-فیزیولوژیک است که از رابطه بیلان انرژی بدن انسان مشتق شده است. در تعریف این شاخص می توان گفت؛ دمایی که طی آن در

یک اتاق نمونه بیلان حرارتی بدن انسان (نرخ سوخت ساز باکار سبک ۸۰ وات بر نرخ سوخت و ساز پایه اضافه می‌شود، ارزش نارسایی لباس در حد ۰/۹ کلو) با دمای پوست و دمای مرکزی بدن انسان؛ در شرایط بدن انسان در شرایط بیرون منزل، در تعادل می‌باشد. واحد نارسایی لباس را کلو می‌گویند و مقاومت یک کلو معادل ۰/۱۵۵ وات بر درجه سانتی گراد در مترمربع است. برای یک شخص در حالت ایستاده و لباس معمولی منزل، آسایش حرارتی مطلوب در یک دمای معادل فیزیولوژیک حدود ۲۰ درجه سانتی گراد حاصل می‌شود. در مقادیر بالای این شاخص، تنش گرما و در مقادیر پایین آن تنش سرما وجود خواهد داشت. برای فعالیت‌های مختلف و پوشش لباس نازک‌تر، مقادیر *PET* افزایش یافته و در شرایط کار سنگین‌تر و پوشش لباس ضخیم‌تر، مقادیر این شاخص کاهش می‌یابد. در تبادل حرارتی بدن انسان با محیط اطراف، لباس عامل مؤثری به‌شمار می‌رود چرا که لباس نارسانا قسمتی از بدن را می‌پوشاند و از تماس سطح بدون با محیط اطراف می‌کاهد. در جدول (۲) ارزش نارسایی لباس‌های مختلف ارائه شده است (ذوالفقاری، ۱۳۸۶، ۱۳۲).

جدول ۲- ارزش نارسایی پوشاک مختلف (رازجویان، ۱۳۶۷)

ردیف	مجموعه پوشاک	ارزش نارسایی به کلو
۱	برهنه	۰
۲	شلوار کوتاه	۰/۱
۳	لباس زیر نازک پنبه‌ای و آستین کوتاه، شلوار بلند، نازک و جوارپنبه‌ای	۰/۳۵
۴	مثل بالا+ پیراهن آستین کوتاه و یقه باز	۰/۵
۵	شلوار سبک، جلیقه، پیراهن آستین بلند و کت	۱
۶	مثل بالا+ پالتوی پنبه‌ای	۱/۵
۷	لباس مخصوص مناطق قطبی	۳/۵

برای محاسبه *PET*، تمام عناصر هواشناسی مؤثر در بیلان انرژی انسان در یک ارتفاع مناسب زیست‌اقلیم‌شناسی مثل ارتفاع ۱/۵ متری زمین اندازه‌گیری می‌شود. پارامترهای مؤثر مثل دمای هوا، فشار بخار، سرعت باد، دمای تابش متوسط محیط اطراف، بسته به موضوع مورد مطالعه و یا از طریق مدل‌های رقومی محاسبه می‌شود. برای بررسی دمای معادل فیزیولوژیک و متوسط نظرسنجی پیش‌بینی شده از دو مدل معروف و کاربردی *MEMI* و *MRT* استفاده می‌شود.

مدل MEMI

مدل PMV دارای یک وجه فیزیکی و یک وجه دما- فیزیولوژیک می باشد؛ که بر اساس تمام پارامترهای هواشناسی شکل گرفته است. مدل $MEMI$ مخفف مدل بیلان انرژی برای افراد^۱ می باشد. این مدل بر اساس اتلاف حرارت محسوس از پوست برابر با حرارت تولید شده توسط خون و حرارت منتقل شده از مرکز به سطح می باشد. مدل $MEMI$ را می توان در غالب رابطه های زیر ارائه نمود:

$$(9) \quad H + C + E + E_p + S_{sr} + E_{lr} + E_{sw} + E_f = S \quad \text{آهنگ جریان خون}$$

$$(10) \quad Q_b = (6.3 + 75(t_c - 36.6)) / 1 + 0.5(34 - t_{sk}) \quad \text{نرخ تعرق}$$

$$(11) \quad S_w = 8.4710^{-3} ((1t_{sk} + 0.9t_c) - 35.6) \text{kg} / \text{sm}^2 \quad \text{تولید حرارت}$$

$$(12) \quad H = M(1 - \eta) \quad \text{شار حرارت همرفتی}$$

$$(13) \quad C = A_{sk} f_{cl} (T_a - T_{sk}) \quad \text{شار حرارت تابشی}$$

$$(14) \quad R = A_{sk} f_{cl} f_{eff} (t_r^4 - T_{sk}^4) \quad \text{انتشار بخار آب}$$

$$(15) \quad E_D = m r (P_a - P_{vsk}) \quad \text{اتلاف حرارت به وسیله تعرق}$$

$$(16) \quad E_{sr} = r_{tp} (T_a - T_r) \quad \text{اتلاف حرارت پنهانی به وسیله تعرق}$$

$$(17) \quad E_{lr} = r_{tr} (P_a - P_{vr}) / P_a \quad \text{اتلاف حرارت به وسیله تبخیر}$$

$$(18) \quad E_{sr} = S_{w'} \quad \text{اتلاف حرارت به وسیله تعرق برای زن}$$

حرارت افزوده یا تلف شده از طریق غذا یا آشامیدنی ها

$$(19) \quad E_{sw} = A_{sk} r_{hc} 0.622 / P_a (P_a - P_{vsk})$$

$$(20) \quad E_f = m f_{cf} (T_f - T_c) \quad \text{حرارت منتقل شده از مرکز به پوست}$$

$$(21) \quad Q_b = \rho_b C_b (T_{sk} - T_c) \quad \text{حرارت وارد شده از پوست به محیط}$$

$$(22) \quad = (T_{sk} - T_{cl}) / I_{ck}$$

$$S = \text{حرارت خالص ذخیره شده در هسته} \quad M = \text{نرخ سوخت ساز (وات بر مترمربع)}$$

$$\eta = \text{کارایی مکانیکی} \quad A_{sk} = \text{سطح پوست بر حسب مترمربع}$$

$$f_{cl} f_{eff} = \text{نسب مساحت شخص پوشیده به مساحت بدون پوشش} \quad T_{sk} = \text{دمای پوست}$$

$$T_a = \text{دمای هوا به درجه سانتی گراد} \quad T_r = \text{دمای تابش متوسط به درجه سانتی گراد}$$

$$T_{rel} = \text{دمای سطح لباس به درجه سانتی گراد} \quad P_a = \text{فشار بخار جزئی به پاسکال}$$

¹Munich Energy Balance Model for individuals

حرارت	انتقال	hc = ضریب	Pvr = فشار بخار اشباع در دمای پوست،
			همرفتی w/k
		r_{im} = جرم هوای تعریقی در هر ثانیه	C_p, C_f, C_b = به ترتیب گرمای ویژه هوا، غذا و خون،
		δ = ضریب ثابت استفان بولتزمن	M_f = معادل غذا در واحد وات،
		r = حرارت نهانی تبخیر	ε = قابلیت انتشار پوست،
		C_b = حرارت ویژه خون	ρ_b = چگالی خون،
			I_{cl} = مقاومت لباس در برابر انتقال حرارت.

دمای معادل فیزیولوژیک یا *PET* یکی از خروجی‌های الگوی *MEMI* است که در هر نوع ارزیابی از شرایط آسایش حرارتی محیط جزو یکی از بهترین شاخص‌های موجود به‌شمار می‌رود. پیچیدگی بسیار زیاد این الگو نرم‌افزارهایی نیز برای محاسبه دقیق و دستیابی سریع به نتایج از طرف کارشناسان و محققان ارائه شده است که الگوی *RayMan* یکی از مناسب‌ترین آن‌ها محسوب می‌شود.

متوسط دمای تابشی محیط (T_{mrt})^۱

برای محاسبه شاخص‌های حرارتی، تهیه داده‌های هواشناسی مثل دمای هوا، رطوبت هوا و سرعت باد به‌سادگی امکان‌پذیر است؛ ولی بعضی از داده‌ها مثل محاسبه دمای تابشی محیط (T_{mrt}) که یکی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی هواشناسی در محاسبه بیلان انرژی بدن انسان در شرایط گرم تابستان است به‌سادگی در دسترس نیست. با توجه به اینکه دمای متوسط تابشی بیشترین تأثیر را بر شاخص مهم دما-فیزیولوژیک مثل *PMV* و *PET* دارد، نحوه محاسبه بر اساس رابطه (۲۲) ارائه گردید.

$$Ei = \varepsilon_i * \delta * T_{si}^4 \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)

δ = ضریب ثابت استفان بولتزمن برابر با $5/67 * 8^{-10} w/m^2/k^4$ ؛ T_{si} = دمای سطح i ام؛ ε_i = ضرایب

انتشار

متغیرهای مورد نیاز برای تعیین شاخص‌های *PMV* و *PET* را به چهار دسته به‌قرار زیر تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱- متغیرهای موقعیتی شامل طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع.

۲- متغیرهای هواشناسی شامل دمای هوای خشک برحسب درجه سانتی‌گراد، فشار بخار برحسب هکتوپاسکل، رطوبت نسبی در حساب درصد، سرعت باد برحسب متر بر ثانیه و میزان ابرناکی آسمان برحسب اکتا مورد استفاده قرار گرفت در اینجا لازم به ذکر است که میانگین‌های ۶۰ ساله داده‌های هواشناسی

^۱Mean Radiant Temperature

(۲۰۱۵-۱۹۵۵ میلادی) به صورت سری زمانی به وقت محلی در مدل وارد گردید. در بررسی آسایش حرارتی نیز از میانگین‌های درجه حرارت، میانگین درجه حرارت کمینه روزانه و میانگین درجه حرارت بیشینه روزانه استفاده شده است.

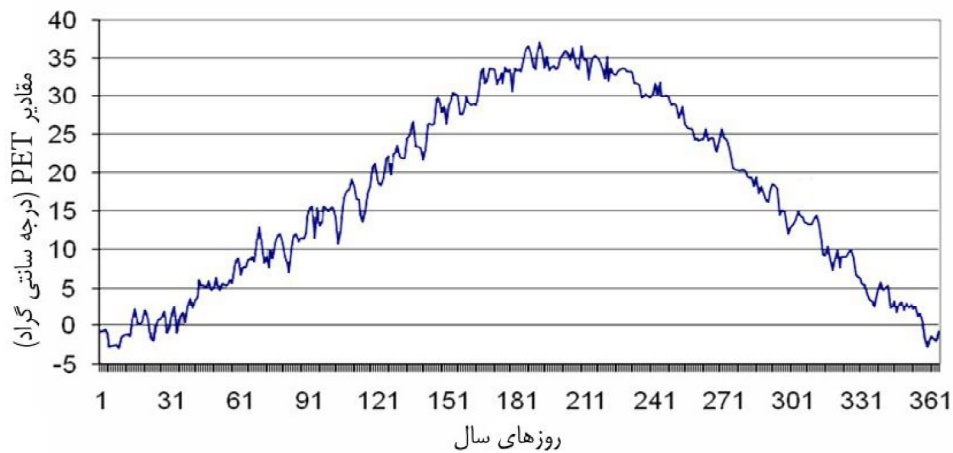
۳- متغیرهای فردی به عنوان ویژگی‌های فیزیولوژیک فردی از قبیل قد، وزن، سن و جنسیت وارد مدل شد.

۴- آخرین دسته از متغیرهای مورد نیاز مدل نوع پوشش و فعالیت فردی می‌باشد. پوشش برحسب کلو و فعالیت برحسب وات وارد مدل گردید.

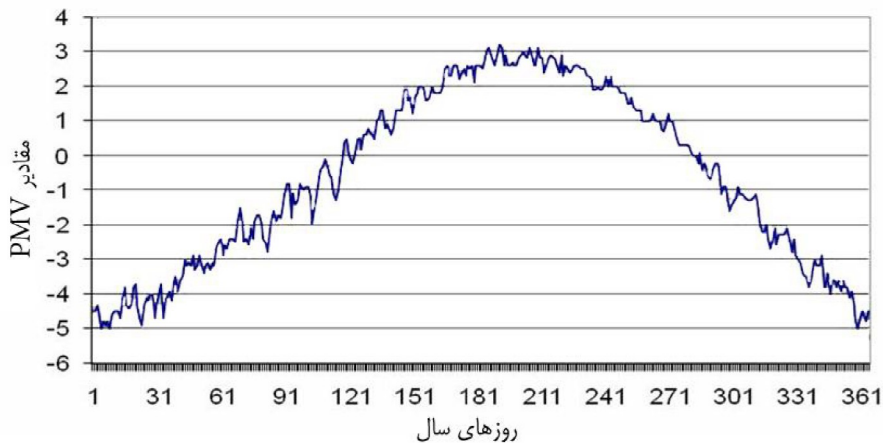
بعد از تعریف متغیرها به صورت میانگین روزانه ۶۰ ساله و وارد نمودن آن‌ها به مدل، خروجی مدل به صورت مقادیر محاسبه شد برای هر کدام از شاخص‌های دما-فیزیولوژیک PMV و PET به دست آمد و در قالب یک ماتریس $۲*۳۶۵$ ارائه گردید.

نتایج و بحث

خروجی نهایی الگوی *RayMan* به صورت یک ماتریس با ابعاد ۳۶۵ در ۲ ارائه شده که در ترسیم نموداری تغییرات شاخص‌های مورد مطالعه استفاده گردیده‌اند. نمودارهای ۱ و ۲ به ترتیب تغییرات درون سالی (با میانگین ۳۰ ساله) شاخص‌های PET و PMV را در شهر سبزوار نمایش می‌دهند.

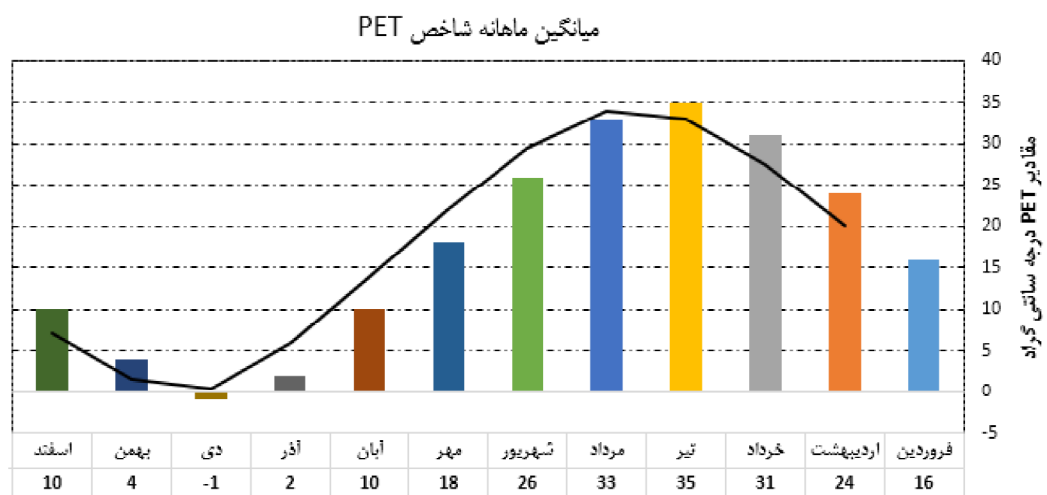


نمودار ۱- تغییرات مقادیر PET در طول سال در شهر سبزوار



نمودار ۲- تغییرات مقادیر PMV در طول سال در شهر سبزوار

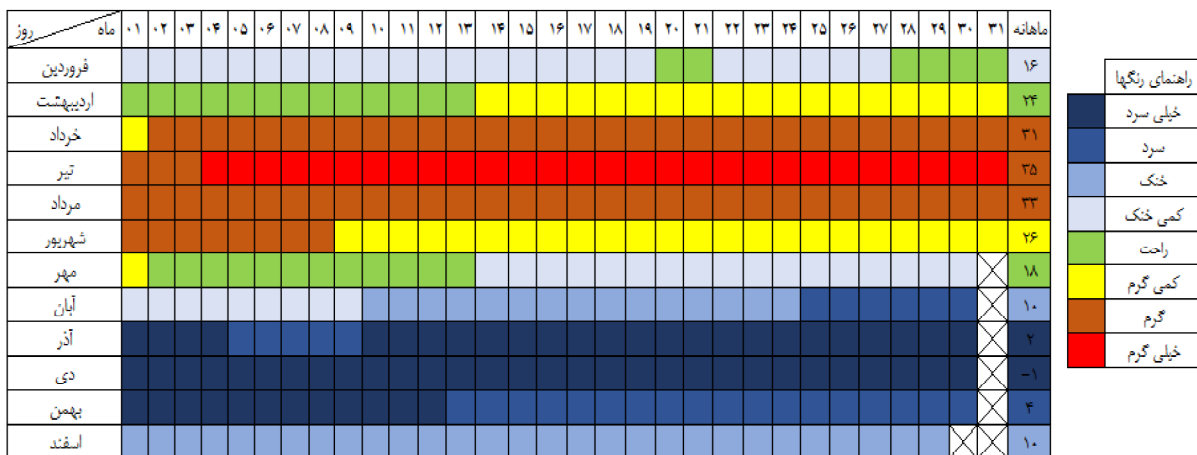
نمودار ۱ متوسط تغییرات PET را در طول سال در شهر سبزوار نشان می‌دهد بر اساس آستانه‌های جدول ۱، مقادیر PET کمتر از ۴ درجه سانتی‌گراد نشانگر تنش سرمای بسیار شدید می‌باشد. بر همین اساس روزهای اول تا چهارم آذر و از نهم آذرماه تا پایان ماه و همچنین کل ماه دی و ماه بهمن تا روز دوازدهم، تنش سرمای بسیار شدید در شهر سبزوار حکم فرم است. تنش سرما با درجات مختلف از بسیار شدید تا تنش سرمایی اندک در ماه‌های آبان و اسفند تداوم می‌یابد. به‌طور کلی در شمال شرق کشور و به‌خصوص شهر سبزوار با ورود موج‌های سرمایی از شمال شرق (پرفشار سبیری) به کشور شرایط کم از کم از حالت ایدئال دمایی فاصله می‌گیرد. همان‌طور که نمودار (۳) نیز نشان می‌دهد آسایش حرارتی در شهر سبزوار دارای دو اوج بهاره و پاییزه می‌باشد، اوج بهاره از نیمه دوم فروردین تا نیمه‌های اردیبهشت ادامه دارد؛ و موج پاییزه در مهرماه و در مقیاسی کوچک‌تر تا نیمه اول آبان در شهر سبزوار حاکم می‌باشد.



نمودار ۳- تغییرات ماهانه PET در شهر سبزوار

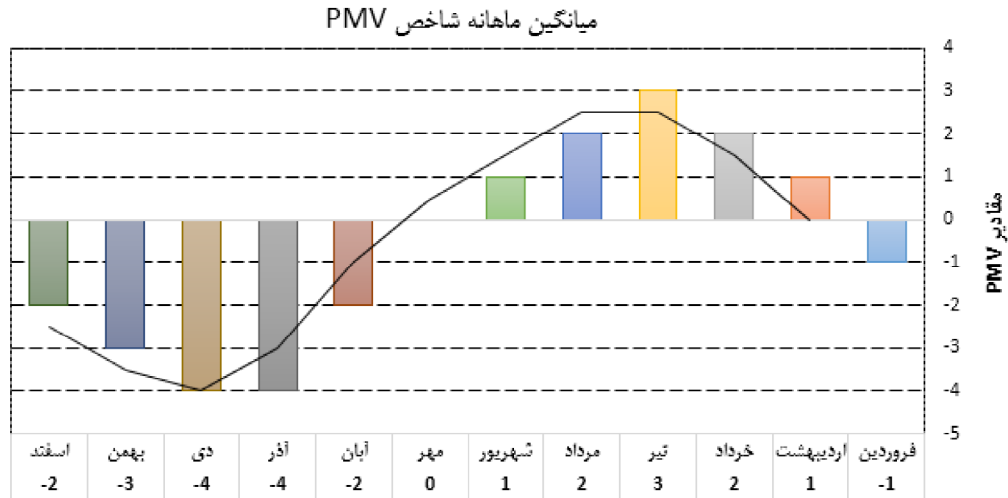
بر اساس تقسیم‌بندی جدول ۱، زمانی که دمای معادل فیزیولوژیک از ۲۳ درجه سانتی‌گراد بیشتر شود آسایش حرارتی جای خود را به شرایط گرم‌تر می‌دهد و به تدریج شرایط تنش گرمایی ایجاد می‌شود، این

شرایط ابتدا با تنش گرمای اندک حدوداً از نیمه دوم اردیبهشت ماه آغاز می‌گردد و تا روزهای ابتدایی ماه خرداد ادامه دارد نمود دیگر این شرایط در روزهای پایانی تابستان خودنمایی می‌کند، به طوری که تقریباً از دهه دوم ماه شهریور آغاز و تا روزهای ابتدایی ماه مهر نیز ادامه دارد. سپس تنش گرما متوسط یا گرم در ماه‌های تابستان بر منطقه حکم فرما می‌گردد؛ این شرایط تغییر از تیرماه که شرایط تنش گرمایی، خیلی گرم را تجربه می‌کند در ماه‌های خرداد، مرداد و دهه اول ماه شهریور بر منطقه حکم فرم است. تقویم آسایش حرارتی استخراج شده توسط نرم افزار *RayMan* در شکل ۲ نمایش داده شده است.

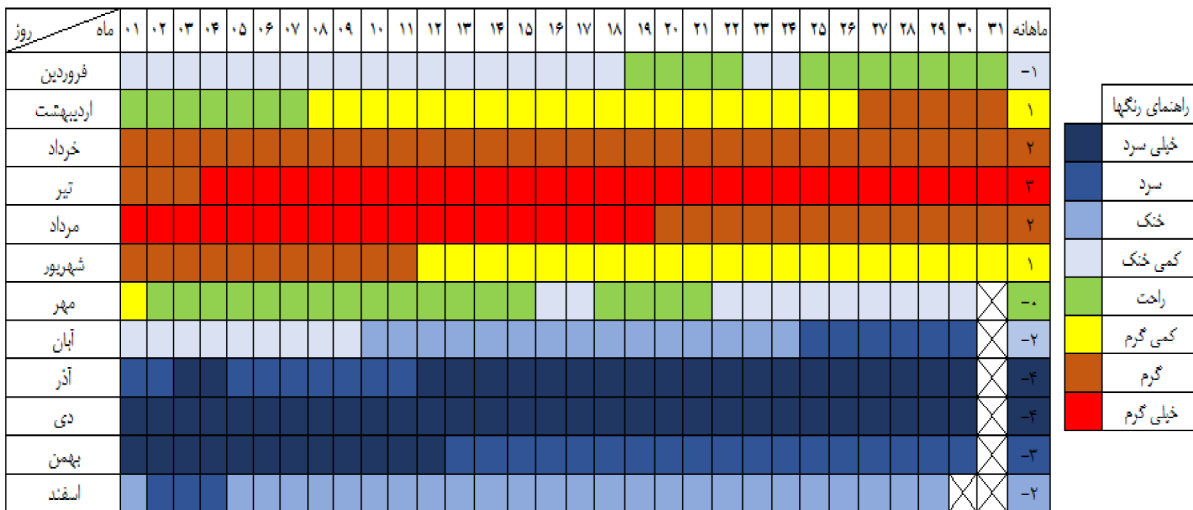


شکل ۲- طبقه‌بندی شاخص *PET* به تفکیک روزانه

نمودار ۲ مقادیر متوسط *PMV* را برای هر کدام از روزهای سال را نشان می‌دهد. بر اساس آستانه‌ها جدول ۱ اگر مقدار محاسبه شده برای شاخص *PMV* بین ۰/۵ و -۰/۵ باشد شرایط آسایش حرارتی و اگر مقادیر شاخص بین ۳/۵- و ۳/۵ باشد تنش سرمایی شدید برای حالت منفی و تنش گرمایی برای حالت مثبت وجود دارد. با توجه به همین تقسیم‌بندی‌ها در طول سال شرایط متفاوتی بر سبزوار حاکم است به طوری که شرایط آسایش حرارتی در شاخص *PMV* همانند شاخص *PET* دارای دو اوج آسایشی می‌باشد نمودار (۴). اوج اول از دهه سوم ماه فروردین تا دهه اول ماه اردیبهشت و اوج دوم آن نیز از اول مهرماه تا بیستم همین ماه ادامه دارد. تنش گرمایی با درجات مختلف از روزهای پایانی اردیبهشت آغاز و تا دهه اول شهریور ادامه می‌یابد. مشکل اصلی شهر سبزوار از نظر مؤلفه حرارتی، تنش سرمایی بسیار شدید است که تقریباً ۶۰ روز از سال با تنش سرمایی بسیار شدید مواجه بوده است؛ و تنش سرمایی با درجات متفاوت از دهه سوم مهرماه آغاز و این شرایط تا دهه دوم فروردین ادامه می‌یابد.



نمودار ۴- تغییرات ماهانه PMV در سبزوار



شکل ۳- طبقه‌بندی شاخص PMV به تفکیک روزانه

نتیجه‌گیری

بررسی محیط حرارتی شهر سبزوار با استفاده از شاخص دما-فیزیولوژیک PET و PMV باهدف تعیین مناسب‌ترین زمان برای حضور گردشگر و به‌طور کلی آسایش حرارتی شهروندان در سبزوار نشان داد که: بر اساس آستانه‌های تعیین شده شرایط آسایش حرارتی طبق شاخص PET بین ۱۸ تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد محقق می‌شود، شرایط نامبرده در شهر سبزوار دارای دو اوج بهاره و پاییزه می‌باشد، اوج بهاره از نیمه دوم فروردین به مدت حدود ۲۰ روز تا نیمه‌های اردیبهشت ادامه دارد؛ و موج پاییزه در مهرماه در حدود ۱۵ روز تداوم می‌یابد. همین وضعیت با اختلاف ناچیزی برای شاخص PMV نیز از نظر زمانی مصداق می‌یابد. می‌توان گفت که فرد در حالت عادی با سوخت ساز ۸۰ وات (کار سبک مثل رانندگی) و ۰/۹ کلو لباس (لباس سبک شامل پیراهن آستین‌بلند، شلوار، جوراب، زیرپوش و کفش) در سبزوار حدود ۳۵ تا ۴۰ روز در سال از نظر حرارتی احساس آسایش می‌کند. در بقیه ایام سال شهر سبزوار درجات متفاوتی از تنش‌های

سرمایی و گرمایی را تجربه می‌کند. در بیش‌تر ایام سال محیط حرارتی راحت در فضای آزاد در سبزوار فقط از طریق تنظیم شرایط بدنی و پوشش امکان‌پذیر است. مشکل اصلی از نظر آسایش حرارتی در شهر سبزوار حاکمیت دوره طولانی تنش سرمایی است؛ به‌طوری که تنش سرمایی با درجات مختلف تقریباً ۱۹۰ روز از سال بر منطقه حکم فرماست و همین شرایط دراز مدت تنش سرمایی از جاذبه‌های شهر بر حضور گردشگر می‌کاهد. البته باید توجه داشت با توجه به اقلیم گرم و نیمه‌خشک سبزوار شرایط آسایش در ماه‌های گرم سال در فصل تابستان نیز با تنش‌های گرمایی بسیار شدید به‌خصوص در ماه‌های تیر و مرداد به همراه دارد. در واقع می‌توان اذعان داشت که در هر دو روش مورد مطالعه ماه‌های فروردین و مهر با اندکی اختلاف زمانی بهترین ماه‌ها از لحاظ آسایش اقلیمی دانست که انسان در این دو ماه احساس آسایش می‌کند و در ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند که از ماه‌های سرد هستند، اقلیم شهر تحت تأثیر سامانه‌های اقلیمی که از سمت شمال شرق وارد کشور می‌شوند قرار دارد و شرایط نامطلوبی را در این ماه‌ها به وجود می‌آورد و انسان در طی این ماه‌ها احساس عدم آسایش می‌کند. در ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور تا دهه اول مهر منطقه تحت استیلای پرفشار جنب‌حاره است که باعث استقرار هوای بسیار گرم و خشک و جو باروتروپیک و هوای پایدار ناشی از وارونگی‌های دینامیکی قرار دارد و این شرایط باعث آسمان صاف، تابش شدید آفتاب و افت رطوبت نسبی می‌گردد که در پی آن شرایط اقلیمی به سمت شرایط نامطلوب سوق پیدا می‌کند. در مجموع روش‌های *PMV* و *PET* در با در نظر گرفتن موازنه‌های گرمایی، خصوصاً با لحاظ نمودن فراسنج‌های اقلیمی و شرایط فیزیولوژیک متناسب با پوشش و فعالیت انسان با واقعیات اقلیمی منطقه نتایج بهتری را نسب به سایر روش‌ها همانند آنچه رضایی (۱۳۹۲) برای منطقه مورد مطالعه بکار بسته استنشا نمی‌دهد. از این رو لازم است نهادها و سازمان‌های ذی‌ربط به‌ویژه مجریان تورهای گردشگری، هلال‌احمر، فوریت‌های پزشکی و سایر نهادهای مرتبط، برنامه‌ریزی‌های لازم را با دقت و حساسیت بیش‌تر برای حضور گردشگر در یک محیط حرارتی راحت فراهم نمایند.

۵- منابع و مآخذ

۱. ذوالفقاری، ح (۱۳۹۲)، آب و هواشناسی توریسم، چاپ سوم، انتشارات سمت، تهران، ۲۰۰ صفحه.
۲. ذوالفقاری، ح (۱۳۸۶)، تعیین تقویم زمانی مناسب برای گردش در تبریز با استفاده از شاخص‌های دمای معادل فیزیولوژی (PET) و متوسط نظر پیش‌بینی شده (PMV)، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۶۲.
۳. رازجویان، م (۱۳۶۷)، آسایش به وسیله معماری هم ساز با اقلیم، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
۴. رضایی، ح. (۱۳۹۲)، بررسی پتانسیل‌های اقلیمی جهت توسعه توریسم در خراسان رضوی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار.
۵. عطایی، ه؛ هاشمی نسب، س. (۱۳۹۱)، ارزیابی تطبیقی زیست اقلیم انسانی شهر اصفهان با استفاده از روش‌های ترجونگ، Tci, PET, PMV، مطالعات و پژوهش‌های شهری و منطقه‌ای، سال چهارم، شماره چهاردهم.
۶. نجفی، م.ع؛ نجفی، ن (۱۳۹۱)، بررسی آسایش حرارتی با استفاده از روش‌های PFT و PPD (مطالعه موردی: بازار وکیل شیراز)، هفت حصار، شماره اول.
7. Andrade, H., Alcoforado, M. J., & Oliveira, S. (2011). Perception of temperature and wind by users of public outdoor spaces: relationships with weather parameters and personal characteristics. *International journal of biometeorology*, 55(5).
8. Arnfield, J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*.
9. Auliciems, A., & Kalma, J. D. (1979). A climatic classification of human thermal stress in Australia. *Journal of Applied Meteorology*, 18, 616-626.
10. Benedict, F. G., & Carpenter, T. M. (1910). *The metabolism and energy transformations of healthy man during rest*. Carnegie Institution of Washington, Publication No.126.
11. Blazejczyk, K. (2004). Assessment of radiation balance in man in various meteorological and geographical conditions. *Geographical Polemical*, 77.
12. Blazejczyk, K. (2005). MENEX2005-the updated version of man-environment heat exchange model. <http://www.igipz.pan.pl/tl/files/igipz/ZGiK/opracowania/indywidualne/blazejczyk/MENEX2005.pdf>. (22,2013)
13. Bouden, C., & Ghrab, N. (2005). An adaptive thermal comfort model for the Tunisian context: a field study results. *Energy and Buildings*, 37(9).
14. Brown, R. D., & Gillespie, T. J. (1995). *Microclimatic landscape design: Creating thermal comfort and energy efficiency*. New York: Wiley.
15. De Freitas, C. R. (1985). Assessment of human bio climate based on thermal response. *International Journal of Biometeorology*, ۲۹(۲).
16. Deb, C., & Ramachandraiah, A. (2010). Evaluation of thermal comfort in a rail terminal location in India. *Building and Environment*, 45(11).

17. Gagge, A. P., Fobelets, A. P., & Berglund, P. E. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions*, 92.
18. Gagge, A. P., Stolwijk, J., & Nishi, Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, 77 (1).
19. Hakim, A. A., Petrovitch, H., Burchfiel, C. M., Ross, G. W., Rodriguez, B. L., White, L. R., ... & Abbott, R. D. (1998). Effects of walking on mortality among nonsmoking retired men. *New England Journal of Medicine*, 338(2).
20. Höppe, P. R. (1999). The physiological equivalent temperature – A universal index for the bio meteorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43.
21. Matzarakis, A, Mayer H and Iziomon M G (1999), application of a Universal Thermal Index: Physiological Equivalent Temperature. *Int. J. biometeorology*. 43.
22. Matzarakis, A., (2004), "Assessing climate for tourism purposes: Existing methods and climate, tourism and recreation tools for the thermal complex", In *Proceedings of the First International Workshop on Climate, Tourism and Recreation*, www.mif.uni-freiburg.de/isb
23. matzarakis, A. (2001). climate and bioclimatic information for the tourism in Greece. *Proceedings the 1st International workshop on climate. Tourism and recreation. International society of biometeorology, commission on climate, tourism and recreation.*
24. Mochida, A., & Lun, I. Y. (2008). Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10).
25. Oehier. K and Matzarakis, A. (2007), *Developments in tourism Climatology*.
26. Pickup, J., & de Dear, R. (2000). An outdoor thermal comfort index (OUT-SET*) –Part I – The model and its assumptions. In R. J. de Dear, J. D. Kalma, T. R. Oke, & A. Auliciems (Eds.), *Biometeorology and urban climatology at the turn of the millennium .ICB-ICUC'99*, Sydney, WCASP-00, WMO/TD No. 1026.
27. Ping Lin, T. Matzarakis, A. (2011), *Tourism climate information based on human thermal perception in Taiwan and Eastern China*, *Tourism Management*, volume 32.
28. Roth, M. (2007). Review of urban climate research in (sub) tropical regions. *International Journal of Climatology*, 27.
29. Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, A., & de Lieto Vollaro, R. (2015). How high albedo and traditional buildings' materials and vegetation affect the quality of urban microclimate. A case study. *Energy and Buildings*, 99.
30. Spagnolo, J., & De Dear, R. (2003). A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Building and environment*, 38(5).
31. Staiger, H., Laschewski, G., & Grätz, A. (2012). The perceived temperature – A versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: Scientific basics. *International Journal of Biometeorology*, 56.

-
32. Steadman, R. G. (1984). A universal scale of apparent temperature. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23.
 33. Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31.
 34. Van Hoof, J., & Hensen, J. L. (2007). Quantifying the relevance of adaptive thermal comfort models in moderate thermal climate zones. *Building and Environment*, 42(1).
 35. Yaglou, C. P., & Miller, W. E. (1925). Effective temperature with clothing. *ASHRAE Transactions*, 31.