مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۲۰، شماره ۴، ۱۴۰۵، صفحه ۱۵۷–۱۸۰ (مقاله پژوهشی) DOI: 10.30499/ijg.2026.580202.1766

ارزیابی پتانسیل گردشگری فلات مرکزی ایران با رویکرد تحلیل تنش‌های حرارتی در دوره‌های گرم و سرد سال

ابراهیم فتاحی[۱]، فائزه نوری[۲] و عباس رنجبرسعادت‌آبادی[۱*]

[۱] استاد، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران
[۲] دانشجوی دکتری هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۳۱)

چکیده

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی پتانسیل گردشگری فلات مرکزی ایران، شاخص دمای فیزیولوژیک معادل طی دوره ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ محاسبه و تحلیل شد. بدین منظور، متغیرهای مؤثر بر تعادل انرژی بدن انسان شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، فشار بخار، سرعت باد، پوشش ابر و دمای متوسط تابشی گردآوری شدند. برای برآورد دمای متوسط تابشی و محاسبه شاخص PET، از نرم‌افزار RayMan Pro استفاده شد. ویژگی‌های فردی استاندارد شامل قد ۱/۷۵ متر، وزن ۷۵ کیلوگرم، سن ۲۵ سال، پوشش ۰/۹ کلو و فعالیت متابولیکی ۳۲ وات در نظر گرفته شد. به‌منظور بررسی تأثیر عوامل توپوگرافی بر تغییرات آسایش حرارتی، رابطه بین مقادیر PET و ارتفاع ایستگاه‌ها با استفاده از رگرسیون خطی و ضریب تعیین (R^2) تحلیل شد.نتایج نشان داد که بین شاخص PET و ارتفاع رابطه‌ای معکوس برقرار است؛ به‌طوری‌که با افزایش ارتفاع، مقدار PET کاهش یافته و شدت تنش گرمایی تعدیل می‌شود. بیشینه مقدار شیب منفی در ماه می برابر با ۰۱/۰− به‌دست آمد که بیانگر حساسیت بالای شرایط بیوکلیماتیک به تغییرات ارتفاع در آستانه فصل گرم است. همچنین، مقادیر بالای ضریب تعیین در ماه‌های مارس و می و نیز در فصل بهار، با مقدار ۰/۶۹، نشان داد که ارتفاع در این دوره توان تبیین بالایی در تغییرات مکانی PET دارد. در فصل تابستان نیز با وجود کاهش نسبی قدرت تبیین، رابطه PET و ارتفاع همچنان نسبتاً قوی باقی ماند و مقدار ضریب تعیین حدود ۰/۶۳ محاسبه شد. از نظر زمانی، بهار و پاییز به‌عنوان مناسب‌ترین دوره‌های گردشگری اقلیمی شناسایی شدند؛ زیرا بیشترین سهم شرایط بدون تنش یا همراه با تنش خفیف در این فصول رخ می‌دهد. از نظر مکانی نیز نتایج بیانگر ناهمگنی قابل‌توجه پتانسیل گردشگری در منطقه است؛ به‌گونه‌ای که نواحی مرتفع‌تر، به‌ویژه در دوره گرم سال، شرایط مطلوب‌تری برای گردشگری تابستانه دارند، در حالی که نواحی کم‌ارتفاع و کویری بیشتر در معرض تنش گرمایی قرار می‌گیرند.

کلمه‌های کلیدی: شاخص دمای فیزیولوژیک، آسایش حرارتی، گردشگری اقلیمی، فلات مرکزی ایران، RayMan Pro

* نگارنده رابط: aranjbar@gmail.com

۱ مقدمه

امروزه تجزیه و تحلیل نقشه‌های زیست‌اقلیم بخشی جدایی‌ناپذیر از فرایندهای برنامه‌ریزی منطقه‌ای در کشورهای دارای زیرساخت و صنعت گردشگری توسعه‌یافته به شمار می‌رود (ماتزاراکیس و همکاران، ۲۰۰۴؛ لین و ماتزاراکیس، ۲۰۰۸). از دهه‌های گذشته، به دلیل چالش‌های تغییر اقلیم، شرایط آب‌وهوایی و کمیت‌های هواشناسی، مورد توجه برنامه‌ریزی شهری بوده‌اند (باوخه و همکاران، ۲۰۱۳). بسیاری از این مطالعات در خصوص ارزیابی ارتباط آسایش حرارتی انسان با کمیت‌های استاندارد هواشناسی می‌باشد (باوخه و همکاران، ۲۰۱۳). در واقع، لازمه برنامه‌ریزی و مدیریت گردشگری شهری، شناسایی منابع و عوامل مؤثر در توسعه گردشگری و استفاده بهینه و پایدار از آن‌ها است که در راستای تأمین نیازهای فراغتی عامه شهروندان و بازدیدکنندگان در مقیاس محلی و فرامحلی به کار می‌رود. یکی از مهم‌ترین عوامل مذکور، شرایط آسایش اقلیمی جهت گردشگری در فضای باز شهری می‌باشد. ارزیابی مناسب بودن یک منطقه برای گردشگری و فعالیت‌های تفریحی در فضای باز، مستلزم آگاهی از تأثیر آب‌وهوا و مؤلفه حرارتی آن بر رفاه انسان است (گریگوریوا و ماتزاراکیس، ۲۰۱۱). گردشگری از عوامل اقتصادی مهمی است که به طور مستقیم با شرایط آب‌وهوا و اقلیم یک منطقه ارتباط دارد (ماتزاراکیس و همکاران، ۲۰۱۲). مناسب بودن شرایط اقلیمی برای گردشگری می‌تواند در مقیاس کوچک متفاوت باشد؛ به عنوان مثال، تغییرات ارتفاع در محدوده چند کیلومتری از یک منطقه کوهستانی یا حتی در مقیاس کوچک‌تر تحت تأثیر تحولات انسانی (مثلاً جزیره گرمایی شهری) یا زیرساخت‌های گردشگری قرار گیرد. صنعت گردشگری به وضوح به تغییرات اقلیمی حساس می‌باشد و به شدت تحت تأثیر محیط محلی تغییر می‌کند (بکن و هی، ۲۰۰۷). علاوه بر موقعیت جغرافیایی، توپوگرافی، منظر، پوشش گیاهی و شرایط آب‌وهوایی از عواملی هستند که تعیین‌کننده جذابیت یک منطقه گردشگری هستند (ماتزاراکیس و همکاران، ۲۰۰۴). نتایج مطالعات نشان می‌دهد که اطلاعات مربوط به شرایط آب‌وهوا، اولین یا دومین عامل مورد نظر گردشگران در هنگام انتخاب مقصد سفر است (همیلتون و لاو، ۲۰۰۵؛ لین و همکاران، ۲۰۰۶). اطلاع از شرایط آب‌وهوای یک منطقه برای گردشگران، سازمان‌دهندگان گردشگری، عوامل برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاران، به ویژه در دوره قبل و در طول تعطیلات، بسیار مفید و حیاتی است (دی‌فریتاس، ۲۰۰۳؛ ماتزاراکیس، ۲۰۰۶؛ ماتزاراکیس و همکاران، ۲۰۱۳). در ارزیابی اقلیم گردشگری، سه جنبه اصلی آب‌وهوا حائز اهمیت است: ویژگی‌های حرارتی (مانند دما و یا رطوبت هوا)، جنبه‌های زیبایی‌شناختی یا روانی (مانند آسمان آبی روشن) و عوامل فیزیکی (به عنوان مثال، باران، ابرناکی) که در این میان، مورد اول از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (دی‌فریتاس، ۲۰۰۳؛ دی‌فریتاس و همکاران، ۲۰۰۸). جنبه حرارتی محیط عامل اصلی در تعیین شرایط مطلوبیت رفتار هواشناختی انسان است. قرار گرفتن در معرض استرس حرارتی قوی و یا شدید، سلامتی گردشگر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برعکس، هنگامی‌که گردشگران شرایط حرارتی نزدیک به محدوده آسایش حرارتی را تجربه نمایند، تعداد گردشگران ممکن است افزایش یابد (ماتزاراکیس، ۲۰۰۶). یک راه ساده برای توصیف شرایط حرارتی، استفاده از شاخص‌های حرارتی است. در طول دهه‌های گذشته بیش از ۱۰۰ شاخص حرارتی ساده برای توصیف شرایط حرارتی ابداع شدند که اکثر آن‌ها در شرایط گرم شامل دو پارامتر اقلیمی دما و رطوبت نسبی و در شرایط سرد دما و سرعت باد هستند (یندریتسکی و همکاران، ۲۰۱۲). به نظر می‌رسد دمای هوا به تنهایی قادر نیست

تأثیر کلی آب‌وهوا و شرایط آب‌وهوایی را بر سلامت انسان توصیف کند (ماتزاراکیس و آملونگ، ۲۰۰۸؛ ماتزاراکیس، ۲۰۲۱). همراه با دمای هوا، رطوبت هوا، سرعت باد و تابش به عنوان عوامل مهم در زمینه احساسات حرارتی ذهنی و ارزیابی شرایط هواشناسی، از جمله آسایش حرارتی، محسوب می‌شوند (پتسل و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین شاخص‌های ساده از یک طرف به علت نادیده گرفتن روابط دما ـ فیزیولوژیک دارای محدودیت زیادی هستند و هرگز نمی‌توانند نیاز اساسی تحقیقات محققین را برآورد سازند و از طرف دیگر، نتایج کسب‌شده اغلب قابل مقایسه نیستند و آستانه‌های دمایی مورد استفاده به دلخواه محقق تعریف شده‌اند و اثرات محیط حرارتی بیرون را بر انسان به طور کامل نشان نمی‌دهند. مدل‌ها و شاخص‌های مختلفی در دهه‌های گذشته جهت توصیف و ترکیب پدیده‌های حرارتی و فیزیولوژیکی در بدن انسان ایجاد شد (VDI، ۱۹۸۸). این مدل‌ها، شار حرارتی را بین بدن و محیط اطراف به همراه چند عامل اضافی تجربی در نظر می‌گیرند. بنابراین، جفت شدن پارامترهای هواشناسی و ویژگی‌های بدن انسان، تصویر بهتری را در خصوص شرایط آسایش انسان تعیین می‌کند. داده‌های خروجی از این مدل‌های مختلف، میزان تنش‌های گرمایی و سرمایی را تعیین می‌کند (VDI، ۱۹۹۸؛ ماتزاراکیس، ۲۰۰۱؛ یندریتسکی و همکاران، ۱۹۹۰؛ هوپه، ۱۹۹۹؛ فانگر، ۱۹۷۲). بنابراین، از مزیت‌های شاخص‌های پیچیده فیزیولوژیکی این است که آن‌ها روابط مرکب بین سازوکارهای تنظیم گرمایی بدن و فیزیولوژی انسان را در نظر می‌گیرند. در نتیجه شاخص‌های مرتبط با فیزیولوژی انسان که از معادله بیلان انرژی بدن انسان مشتق شده‌اند، امروزه در مطالعات زیست‌اقلیم انسانی جایگاه ویژه‌ای دارند و استفاده از آن‌ها سبب غلبه بر کاستی شاخص‌های ساده و تجربی می‌شود. شاخص‌های معروفی در این زمینه پیشنهاد شده است که از میان آن‌ها، شاخص دمای هم‌ارز فیزیولوژیک (PET) اهمیت بیشتری یافته است. شاخص PET یکی از شاخص‌های فیزیولوژیک انسان به شمار می‌رود که ریشه در مدل بیلان انرژی بدن دارد (ماتزاراکیس، ۲۰۰۷) و محاسبه آن بر اساس روابط ریاضی ارائه‌شده صورت می‌گیرد (هوپه، ۱۹۹۹). بر اساس تعریف، این شاخص برای نرخ سوخت‌وساز در شرایط کار سبک و میزان نارسایی لباس، به ترتیب با مقادیر ۳۲ وات و ۰/۹ کلو، به صورت میانگین تعریف شده است (هوپه و مایر، ۱۹۸۷). به این ترتیب، تنش گرمایی در مقادیر بالای PET و تنش سرمایی در مقادیر پایین آن بروز می‌کند (VDI، ۱۹۹۴؛ VDI، ۱۹۹۸؛ ماتزاراکیس و همکاران، ۲۰۰۷؛ ماتزاراکیس و همکاران، ۲۰۱۰). برای محاسبه شاخص دمای فیزیولوژیک(PET)، از مجموعه‌ای از عناصر هواشناسی و فیزیولوژیک مؤثر بر تعادل انرژی بدن انسان استفاده می‌شود. مهم‌ترین متغیرهای هواشناسی مورد نیاز شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، فشار بخار، سرعت باد، میزان ابرناکی و دمای متوسط تابشی محیط (Tmrt) است که بسته به نوع داده و شرایط مطالعه، به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری شده یا با استفاده از مدل‌ها و نرم‌افزارهای تخصصی برآورد می‌شوند. با توجه به پیچیدگی معادلات مربوط به موازنه انرژی بدن انسان، مدل‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی برای محاسبه شاخص‌های زیست‌اقلیمی توسعه یافته‌اند. در این میان، مدل RayMan از جمله ابزارهای معتبر و پرکاربرد در مطالعات آسایش حرارتی و زیست‌اقلیم انسانی است که در پژوهش حاضر از آن استفاده شده است. مطالعات تطبیقی نیز عملکرد مناسب این مدل را در محاسبه شاخص‌های حرارتی و تابشی تأیید کرده‌اند (برغمدی، ۱۳۹۰؛ دولت‌خواه، ۱۳۹۲). مدل RayMan نخستین بار توسط ماتزاراکیس معرفی شد و سپس توسط انجمن مهندسان آلمان (VDI) توسعه یافت. این مدل توانایی

محاسبه شارهای تابشی را در محیط‌های ساده و پیچیده دارد و با استفاده از متغیرهایی نظیر دمای هوا، رطوبت نسبی، فشار بخار، سرعت باد، پوشش ابر، تابش موج‌کوتاه خورشیدی و تابش موج‌بلند زمینی، امکان برآورد Tmrt و شاخص PET را فراهم می‌سازد.

ویژگی اصلی و مزیت مدل RayMan در مقایسه با سایر مدل‌های مشابه(به عنوان مثال SOLWEIG ، ENVI-met) محاسبه شار تابش موج کوتاه و بلند، امکان ارزیابی محیط حرارتی در طول سال برای فصول سرد و گرم و استفاده از یک واحد رایج یعنی سلسیوس شناخته شده است (گریگوریوا و ماتزاراکیس، ۲۰۱۱). بررسی نتایج مطالعات انجام‌شده در خصوص شرایط آسایش یا عدم آسایش در نقاط مختلف دنیا نشان داد که شاخص PET به عنوان یکی از کامل‌ترین و دقیق‌ترین شاخص‌ها جهت تخمین محدوده آسایش شناخته شده است (توی و کانتر، ۲۰۱۶؛ کوهن و همکاران، ۲۰۱۲؛ جانسون و همکاران، ۲۰۱۸). هدف از این مطالعه، تعیین پتانسیل‌ها و تنظیم برنامه‌های زمانی گردشگری در فلات مرکزی ایران می‌باشد. بیش از دوسوم فلات مرکزی ایران را اقلیم گرم و خشک تشکیل می‌دهد (رضایی، ۲۰۲۲). در این اقلیم که بیشتر مناطق جنب حاره را شامل می‌شود، به دلیل وزش باد، هوا بسیار خشک است. با وجود آب‌وهوای نسبتاً گرم و خشک غالب، وجود مناطق خوش آب‌وهوای محلی همراه با شرایط مناسبی که در برخی فصول ایجاد می‌شود، این منطقه از جمله نواحی مستعد جهت توسعه گردشگری است که به دلیل موقعیت خاص تاریخی، جغرافیایی، آثار باستانی و فرهنگی خود، همواره به عنوان یکی از مهم‌ترین مراکز گردشگری و توریستی ایران مطرح بوده و همه‌ساله میزبان تعداد فراوانی از گردشگران داخلی و خارجی است؛ لذا تعیین پتانسیل گردشگری فلات مرکزی ایران با تأکید بر وضعیت اقلیم آسایش حرارتی می‌تواند نقش مهمی در برنامه‌ریزی و استفاده بهینه از این مناطق داشته باشد. مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی آسایش زیست‌اقلیمی گردشگری با استفاده از شاخص PET در مقیاس‌های مختلف جهانی و منطقه‌ای انجام شده است. لین و ماتزاراکیس در مطالعه‌ای درباره تایوان و شرق چین، با استفاده از شاخص PET و طبقه‌بندی آسایش حرارتی، نشان دادند که نقشه‌های توزیع فصلی PET می‌توانند ماه‌ها و مقاصد مناسب گردشگری را بر اساس ادراک حرارتی انسان مشخص کنند. آنان همچنین با بررسی ۲۰ مقصد گردشگری تأکید کردند که اطلاعات اقلیمی مبتنی بر احساس حرارتی انسان برای سازمان‌های گردشگری، برنامه‌ریزان سفر و گردشگران کاربرد مستقیم دارد .

در مطالعه‌ای دیگر، ایرماک و همکاران آسایش حرارتی ۱۵ مرکز مهم گردشگری ساحلی در مناطق اژه و مدیترانه ترکیه را با استفاده از شاخص PET بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که ارزیابی PET در مقیاس‌های سالانه، فصلی، ماهانه و حتی تفکیک روز و شب، می‌تواند تصویر دقیق‌تری از قابلیت اقلیمی مقاصد گردشگری ارائه دهد. این یافته از این جهت با پژوهش حاضر همخوان است که اتکا به میانگین‌های کلی اقلیمی برای برنامه‌ریزی گردشگری کافی نیست و باید تغییرات زمانی و مکانی آسایش حرارتی به‌صورت دقیق‌تر تحلیل شود .

در حوزه گردشگری شهری نیز مطالعات انجام‌شده در شهر پورتو پرتغال نشان داده‌اند که شرایط میکروکلیمایی، از جمله دما، رطوبت، باد و تفاوت‌های دمایی درون‌شهری، مستقیماً بر ادراک حرارتی گردشگران اثر می‌گذارد. لوپس و همکاران در یک مطالعه میدانی با ترکیب پرسش‌نامه و اندازه‌گیری‌های میکروکلیمایی نشان دادند که ادراک گردشگران از آسایش حرارتی با رهگذران و شاغلان فضای باز متفاوت است. در مطالعه‌ای دیگر نیز آنان با مدل‌سازی PET در

مرکز گردشگری پورتو نشان دادند که شدت جزیره حرارتی شهری و شرایط باد می‌تواند الگوهای آسایش یا تنش حرارتی را در فضاهای گردشگری تغییر دهد .

در ایران نیز پژوهش‌های مختلفی در زمینه آسایش حرارتی گردشگری انجام شده است. فرج‌زاده و ماتزاراکیس در مطالعه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل RayManو شاخص PET نشان دادند که این شاخص می‌تواند دوره‌های مناسب برای گردشگری، ورزش و فعالیت‌های تفریحی را دقیق‌تر از شاخص‌های ساده‌تر اقلیمی مشخص کند. نتایج آنان نشان داد که در محدوده دریاچه ارومیه، دوره مناسب گردشگری بر اساس PET عمدتاً در ماه‌های گرم‌تر سال متمرکز است؛ موضوعی که نشان می‌دهد زمان مطلوب گردشگری در ایران به‌شدت تابع موقعیت جغرافیایی، ارتفاع و زمینه اقلیمی منطقه است .

روشن، یوسفی و بواژچیک نیز با تحلیل شرایط زیست‌اقلیمی ایران بر اساس شاخص‌های PET و UTCI نشان دادند که به دلیل تنوع اقلیمی کشور، در هر مقطع زمانی می‌توان دست‌کم یک ناحیه با شرایط مناسب برای گردشگری شناسایی کرد. این یافته با نتایج پژوهش حاضر همخوان است؛ زیرا در فلات مرکزی ایران نیز شرایط آسایش حرارتی نه به‌صورت یکنواخت، بلکه به شکل مکانی و فصلی تغییر می‌کند .

حنفی و آتاشگاهی در بررسی غرب و شمال‌غرب ایران با استفاده از PET و مدل RayMan نشان دادند که ماه‌های مناسب گردشگری در این منطقه بسته به موقعیت ایستگاه‌ها متفاوت است؛ به‌گونه‌ای که برخی نواحی در بهار و پاییز و برخی نواحی مرتفع‌تر در بخشی از تابستان شرایط مناسب‌تری دارند. این نتیجه با یافته‌های پژوهش حاضر درباره نقش ارتفاع و تفاوت‌های ناحیه‌ای در شکل‌گیری آسایش حرارتی گردشگری همخوانی دارد .

همچنین شیخ‌زاده، گندمکار و عباسی در پژوهشی آینده‌نگرانه، روند کوتاه‌مدت و بلندمدت اقلیم آسایش گردشگری ایران را برای افق‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ با استفاده از داده‌های اقلیمی، مدلRayMan ، GISو شاخص PETبررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که اقلیم آسایش گردشگری ایران در آینده با الگوهای متفاوتی از تغییرات مکانی و زمانی روبه‌رو خواهد بود. این موضوع اهمیت استفاده از شاخص‌های زیست‌اقلیمی و رویکردهای آینده‌پژوهانه را در برنامه‌ریزی گردشگری نشان می‌دهد .

از سوی دیگر، مطالعات جدیدتر درباره طبیعت‌گردی در مناطق خشک ایران نیز برای پژوهش حاضر اهمیت ویژه‌ای دارند. نورمحمدی و گومز-مارتین نشان داده‌اند که در طبیعت‌گردی، ترجیحات اقلیمی گردشگران فقط به دمای هوا محدود نیست و عواملی مانند باد، بارش، ابرناکی، ساعات آفتابی و شرایط کلی فضای باز نیز در انتخاب زمان و مکان سفر مؤثر هستند. همچنین در مطالعه‌ای درباره مناطق خشک استان اصفهان، تناسب اقلیمی طبیعت‌گردی بر اساس معیارهای زیست‌اقلیمی و ترجیحات گردشگران ایرانی بررسی شده است. این مطالعات از جهت تمرکز بر طبیعت‌گردی فضای باز با پژوهش حاضر قرابت بیشتری دارند و نشان می‌دهند که مفهوم «پتانسیل گردشگری» باید دقیق‌تر و در ارتباط با نوع فعالیت گردشگری تعریف شود .

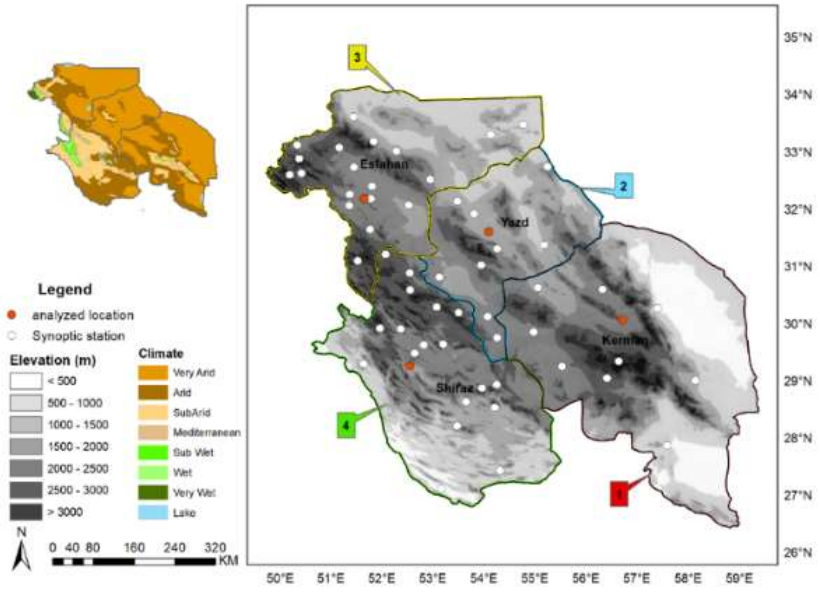
بنابراین، برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که بیشتر بر شهرها، ایستگاه‌های محدود، میانگین‌های فصلی یا ارزیابی کلی اقلیم گردشگری تمرکز داشته‌اند، پژوهش حاضر با تمرکز بر فلات مرکزی ایران، شاخص PET ، مدل RayMan و تحلیل فضایی ـ زمانی، تلاش می‌کند اثر ناهمگنی مکانی و اختلاف ارتفاع را بر آسایش حرارتی گردشگری طبیعت‌محور در فضای باز روشن‌تر کند. این رویکرد امکان شناسایی دقیق‌تر نواحی مستعد طبیعت‌گردی، تعیین تقویم زمانی مناسب فعالیت‌های فضای باز و تفکیک مناطق دارای تنش سرمایی یا گرمایی

را فراهم می‌سازد.

۲ مواد و روش ها

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

پهنه جغرافیایی مورد مطالعه در این تحقیق، بخشی از فلات مرکزی ایران شامل استان‌های اصفهان، یزد، کرمان و فارس است (شکل ۱) که به دلیل برخورداری از جاذبه‌های طبیعی، تاریخی، فرهنگی و اقلیمی متنوع، از مهم‌ترین قطب‌های گردشگری کشور به‌شمار می‌رود. این منطقه با طول تقریبی ۸۲۸ کیلومتر، عرض ۷۲۵ کیلومتر و مساحت ۴۸۴۸۹۸ کیلومتر مربع، بخش قابل‌توجهی از کشور را دربرمی‌گیرد. میانگین ارتفاع آن ۲۲۸۸ متر از سطح دریا است؛ با این حال، دامنه ارتفاعی منطقه از حدود ۱۰۵ متر در پست‌ترین نقاط حاشیه کویر تا بیش از ۴۰۰۰ متر در نواحی کوهستانی تغییر می‌کند. این تنوع ارتفاعی، موجب ناهمگنی قابل‌توجه در شرایط اقلیمی و آسایش حرارتی شده و نقش مهمی در شکل‌گیری پتانسیل گردشگری فصلی منطقه ایفا می‌کند.



شکل ۱. موقعیت منطقه‌ای و محلی فلات مرکزی ایران و پهنه بندی اقلیمی (رضی، ۲۰۲۲) منطقه مورد مطالعه.

۲-۳ داده ها و روش تحقیق

شاخص PET بر پایه مدل تعادل انرژی بدن انسان تعریف می‌شود و اثر هم‌زمان پارامترهای هواشناسی مؤثر بر تبادل حرارت بدن با محیط را در نظر می‌گیرد. مطابق مطالعات هوپه (۱۹۹۹) و ماتزاراکیس و همکاران (۲۰۰۷) برای محاسبه شاخص‌های زیست‌اقلیمی مانندPET ، متغیرهایی نظیر دمای هوا، رطوبت هوا، سرعت باد و مؤلفه‌های تابشی یا متغیرهای جایگزین آن مانند ابرناکی مورد نیاز هستند که به‌صورت گزارش‌های سه ساعته همدیدی طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ استفاده شده است. در در گام نخست بررسی این پژوهش در کل منطقه و بر اساس آمار و اطلاعات سه ساعته ۵۹ ایستگاه هواشناسی همدیدی انجام شده است که این اطلاعات از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. در ادامه، به‌منظور بررسی تفصیلی‌تر شرایط زیست‌اقلیمی محدوده‌های گردشگری، منطقه مورد مطالعه به چهار پهنه تفکیک شد. در هر پهنه،

یک ایستگاه هواشناسی واقع در محدوده یا نزدیک‌ترین موقعیت به کانون گردشگری، بر اساس دسترسی به داده‌های کامل و پیوسته، موقعیت جغرافیایی و نزدیکی به محدوده مورد بررسی انتخاب شد. لازم به ذکر است که ایستگاه‌های انتخاب‌شده به‌عنوان نقاط شاخص برای تحلیل شرایط اقلیمی همان محدوده گردشگری در نظر گرفته شده‌اند و نتایج حاصل، بیانگر وضعیت اقلیمی پیرامون ایستگاه‌ها است، نه تعمیم قطعی به تمامی سطح هر پهنه. مشخصات ایستگاه‌ها و نمودارهای اقلیمی مربوط به هر یک در جدول ۱ ارائه شده است. پس از گردآوری داده‌های هواشناسی مورد نیاز، پیش‌پردازش و کنترل کیفیت داده‌ها پیش از محاسبه شاخص PET انجام شد. بر این اساس، مقادیر خارج از دامنه‌های فیزیکی قابل قبول، از جمله رطوبت نسبی کمتر از صفر یا بیشتر از ۱۰۰ درصد، سرعت باد منفی، ابرناکی خارج از دامنه ثبت استاندارد به‌عنوان داده مشکوک علامت‌گذاری شدند. همچنین مقادیر بسیار دور از الگوی ماهانه هر ایستگاه با استفاده از معیارهای آماری، از جمله مقایسه با میانگین و انحراف معیار ماهانه و بررسی روند زمانی قبل و بعد از مقدار مورد نظر، کنترل شدند. داده‌های مشکوک پس از بررسی مجدد، در صورت تأیید خطا، حذف یا با استفاده از مقادیر معتبر همان ایستگاه و/یا ایستگاه‌های مجاور تکمیل شدند. در نهایت، مجموعه داده‌های کنترل‌شده برای محاسبه شاخص دمای معادل فیزیولوژیک PET مورد استفاده قرار گرفت.در گام نخست، به‌منظور بررسی اولیه نقش ویژگی‌های توپوگرافی در تغییرات آسایش حرارتی، روند تغییرات شاخص PET نسبت به ارتفاع ایستگاه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، از رگرسیون خطی صرفاً به‌عنوان شناسایی روند بین ارتفاع و PET استفاده شد. با توجه به ماهیت چندعاملی شاخص PET، رابطه آن با ارتفاع الزاماً خطی و مستقیم نیست و می‌تواند تحت تأثیر متغیرهایی مانند دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش، ابرناکی، موقعیت جغرافیایی، کاربری زمین و الگوهای محلی جریان هوا قرار گیرد. ازاین‌رو، نتایج رگرسیون خطی در این پژوهش صرفاً برای توصیف روند کلی میان ارتفاع ایستگاه‌ها و مقادیر PETبه کار رفته است.در ادامه، با در نظر گرفتن این رابطه و نقش ارتفاع در کنترل شرایط زیست‌اقلیمی، محاسبات مربوط به پهنه‌بندی مکانی–زمانی شاخص PETانجام گرفت. سپس مقادیر به‌دست‌آمده در طبقات مختلف تنش حرارتی دسته‌بندی شدند و الگوهای فضایی، فصلی و ناحیه‌ای آسایش حرارتی در محدوده مورد مطالعه تحلیل گردیدند. این روند امکان ارزیابی دقیق‌تر پتانسیل گردشگری اقلیمی فلات مرکزی ایران را بر اساس شدت و توزیع تنش‌های گرمایی و سرمایی فراهم ساخت.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه های همدیدی منتخب در این مطالعه.

منطقه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	اقلیم منطقه
۱	کرمان	30°16'	56°58'	۱۷۵۴	خیلی خشک
۲	یزد	31°54'	54°17'	۱۲۳۰	خشک (بیابانی)
۳	اصفهان	32°31'	51°43'	۱۵۵۰	نیمه خشک
۴	شیراز	29°34'	52°36'	۱۴۸۸	نیمه خشک

۴-۱ شاخص دمای فیزیولوژیک

شاخص دمای معادل فیزیولوژیک (PET) یکی از شاخص‌های زیست‌اقلیمی و فیزیولوژیک انسان است که برای ارزیابی شرایط آسایش حرارتی محیط به کار می‌رود. این شاخص بر پایه مدل بیلان انرژی بدن انسان توسعه یافته و اثر هم‌زمان عناصر اقلیمی و فیزیولوژیک مؤثر بر تبادل حرارت میان بدن و محیط را در نظر می‌گیرد. مبنای نظری PET بر مدل MEMI استوار است

و محاسبه آن بر اساس معادلات موازنه انرژی بدن انسان انجام می‌شود؛ به‌گونه‌ای که دریافت و اتلاف انرژی بدن از طریق فرایندهایی مانند تابش، همرفت، تبخیر، تعرق و تنفس در آن لحاظ می‌گردد. ویژگی مهم شاخص PET آن است که مقدار نهایی آن بر حسب درجه سلسیوس بیان می‌شود؛ بنابراین تفسیر آن در مقایسه با برخی شاخص‌های پیچیده‌تر زیست‌اقلیمی ساده‌تر است. بر این اساس، مقادیر بالای PET نشان‌دهنده افزایش تنش گرمایی و مقادیر پایین آن بیانگر افزایش تنش سرمایی است. در محدوده‌های میانی نیز شرایط آسایش یا آسایش نسبی حرارتی برای انسان فراهم می‌شود. طبقه‌بندی مقادیر PET و سطوح مختلف تنش حرارتی در جدول ۳ ارائه شده است. برای محاسبه PET، مجموعه‌ای از متغیرهای هواشناسی و فیزیولوژیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین متغیرهای هواشناسی مؤثر در این شاخص شامل دمای هوا، رطوبت نسبی یا فشار بخار آب، سرعت باد و دمای متوسط تابشی محیط Tmrt است. از میان این متغیرها، Tmrt اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا بیانگر اثر ترکیبی تابش مستقیم و پراکنده خورشیدی، تابش بازتابی، تابش طول‌موج بلند سطوح پیرامونی، زاویه تابش، وضعیت پوشش آسمان و ویژگی‌های هندسی محیط است. به همین دلیل، PET نسبت به تغییرات تابشی و شرایط خرداقلیمی حساسیت بالایی دارد. در مدل بیلان انرژی بدن انسان، رابطه کلی موازنه انرژی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$M + W + R + C + ED + ERe + ESw + S = 0$$

(۱) موازنه انرژی بدن

$$v_b = \frac{6.3 + 75(T_c - 36.6)}{1 + 0.5(34 - T_{sk})}$$

(۲) نرخ جریان خون از مرکز بدن به پوست

$$S_w = 8.47 \times 10^{-5[(0.1T_{sk}+0.9T_c)-36.6]}$$

(۳) نرخ تعرق فیزیولوژیک

$$H = M(1-\eta)$$

(۴) تولید حرارت داخلی بدن

$$C = A_{sk} f_{cl} h_c (T_a - T_{cl})$$

(۵) شار حرارت همرفتی

$$R = A_{sk} f_{cl} f_{eff} \varepsilon\sigma \, (T_{mrt}^4 - T_{cl}^4)$$

(۶) شار حرارت تابشی

$$E_D = A_sk \, \lambda m (P_a - P_{vsk})$$

(۷) اتلاف حرارت نهان از راه انتشار بخار آب پوست

$$E_{Re} = mrescp(Ta - Tex) + mres\lambda(Pa - Pex)$$

(۸) تبادل حرارت تنفسی

$$E_{sw} = A_{sk} \, \lambda \, h_c w \, \frac{0.622}{p_a c_p} (p_a - p_{vsk})$$

(۹) اتلاف حرارت از طریق تبخیر عرق

$$E_f = m_f c_f (T_f - T_c)$$

(۱۰) حرارت ناشی از غذا و آشامیدنی

$$F_{cs} = v_b \rho c_b (T_c - T_{sk})$$

$$F_{sc} = \frac{T_{sk} - T_{cl}}{I_{cl}}$$

(۱۱) انتقال حرارت از مرکز بدن به پوست و از پوست به لباس

جدول ۲. معرفی نمادها و متغیرهای به‌کاررفته در محاسبه شاخص دمای معادل فیزیولوژیک.

مفهوم / تعریف	نماد	مفهوم / تعریف	نماد
دمای هوا	Ta	میزان سوخت‌وساز یا تولید انرژی متابولیک بدن	M
دمای متوسط تابشی	Tmrt	کار مکانیکی انجام‌شده توسط بدن	W
دمای هوای بازدمی	Tex	حرارت تولیدشده داخلی بدن	H
فشار بخار آب هوا	Pa	شار حرارت تابشی	R
فشار بخار آب اشباع در دمای پوست	Pvsk	شار حرارت همرفتی	C
فشار بخار هوای بازدمی	Pex	اتلاف حرارت نهان از طریق انتشار بخار آب از سطح پوست	ED
سطح پوست بدن	Ask	تبادل حرارت تنفسی	ERe
ضریب افزایش سطح بدن به‌دلیل پوشش لباس	fcl	اتلاف حرارت از طریق تبخیر عرق	ESw
ضریب مؤثر تابشی بدن	feff	میزان ذخیره یا تغییر حرارت بدن	S
ضریب انتقال حرارت همرفتی	hc	نرخ جریان خون از مرکز بدن به پوست	vb
گسیل‌پذیری سطح بدن	ε	دمای مرکزی بدن	Tc
ثابت استفان–بولتزمن	σ	دمای پوست	Tsk
گرمای نهان تبخیر	λ	دمای سطح لباس	Tcl
مقاومت حرارتی لباس	Icl	ضریب رطوبت یا خیس‌بودگی پوست	w
جرم غذا یا نوشیدنی مصرف‌شده	mf	گرمای ویژه هوا	cp
دمای غذا یا نوشیدنی	Tf	گرمای ویژه خون	cb
بازده مکانیکی بدن	η	گرمای ویژه غذا یا نوشیدنی	cf
جرم هوای تنفسی در واحد زمان	$\dot{m}$res	چگالی خون	ρb
شار انتقال حرارت از پوست به سطح لباس	FSC	شار انتقال حرارت از مرکز بدن به پوست	FCS

در معادله موازنه انرژی بدن، تمام مؤلفه‌ها بر حسب وات بیان می‌شوند. علامت هر جمله به جهت تبادل انرژی بستگی دارد؛ به‌گونه‌ای که جریان‌های منجر به دریافت انرژی توسط بدن با علامت مثبت و جریان‌های منجر به اتلاف انرژی با علامت منفی در نظر گرفته می‌شوند. معادله بیلان انرژی بدن انسان و نمادهای آن بر اساس مدل MEMI و دستورالعمل‌های زیست‌هواشناسی انسان تدوین شده‌اند. این معادله تحت تأثیر متغیرهای اقلیمی نظیر دمای هوا، دمای متوسط تابشی، رطوبت، سرعت باد و همچنین متغیرهای فیزیولوژیک و پوششی انسان قرار دارد و مبنای محاسبه شاخص PET در ارزیابی آسایش حرارتی و پتانسیل گردشگری اقلیمی است (هوپه، ۱۹۹۹؛ ماتزاراکیس و همکاران، ۱۹۹۹؛ VDI، ۱۹۹۸، ۲۰۲۲) .

۳ عرفی نرم افزار RayMan Pro

در این پژوهش، شاخص دمای معادل فیزیولوژیک PET با استفاده از نرم‌افزار RayMan Pro محاسبه شد. مدل RayManیکی از ابزارهای معتبر و پرکاربرد در مطالعات زیست‌اقلیم انسانی و آسایش حرارتی است که برای محاسبه شارهای تابشی، دمای متوسط تابشی Tmrtو شاخص‌های حرارتی مانند PET توسعه یافته است. این مدل بر پایه معادلات موازنه انرژی بدن انسان عمل می‌کند و با استفاده از داده‌های مکانی، هواشناسی و فیزیولوژیک، مقدار PET را برای هر ایستگاه یا موقعیت مورد مطالعه محاسبه می‌نماید.

فرایند اجرای RayMan Pro در پژوهش حاضر در چند مرحله انجام شد. ابتدا مشخصات مکانی هر ایستگاه شامل عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و ارتفاع از سطح

دریا وارد نرم‌افزار شد. سپس داده‌های هواشناسی مورد نیاز شامل دمای خشک هوا، رطوبت نسبی، فشار بخار آب، سرعت باد و میزان ابرناکی برای دوره آماری مورد بررسی در مدل وارد گردید. این متغیرها از جمله ورودی‌های اصلی مدل برای برآورد شرایط حرارتی و تابشی محیط هستند. در مرحله بعد، متغیرهای فردی و فیزیولوژیک مورد نیاز مدل تعیین شد. از آنجا که ویژگی‌هایی مانند سن، قد، وزن، نوع پوشش و سطح فعالیت در میان افراد مختلف متغیر است، در بسیاری از مطالعات PET از مقادیر استاندارد یا میانگین برای فرد مرجع استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر نیز به‌منظور امکان مقایسه نتایج میان ایستگاه‌ها، قد فرد مرجع برابر با ۱/۷۵ متر، وزن برابر با ۷۵ کیلوگرم و سن برابر با ۲۵ سال در نظر گرفته شد. همچنین مقدار مقاومت حرارتی لباس برابر با ۹/۰ کلو و سطح فعالیت بر اساس مقدار استاندارد مورد استفاده در مدل تنظیم گردید. پس از ورود داده‌های مکانی، هواشناسی و فیزیولوژیک، نرم‌افزار RayMan Proابتدا با توجه به موقعیت جغرافیایی، تاریخ و زمان داده‌ها، وضعیت تابشی محیط را محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از متغیرهایی مانند دمای هوا، رطوبت، سرعت باد و پوشش ابری، دمای متوسط تابشی محیط Tmrtبرآورد می‌شود. در ادامه، مدل با بهره‌گیری از معادلات موازنه انرژی بدن انسان، تبادل حرارت میان بدن و محیط را محاسبه کرده و مقدار نهایی شاخص PET را بر حسب درجه سلسیوس ارائه می‌دهد. در این پژوهش، خروجی‌های محاسبه‌شده نرم‌افزار RayMan Pro برای هر ایستگاه استخراج و برای تحلیل شرایط آسایش حرارتی مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر PET به‌دست‌آمده سپس بر اساس طبقات استاندارد تنش حرارتی تفسیر شد و وضعیت آسایش یا تنش گرمایی و سرمایی در ایستگاه‌های مورد مطالعه مورد مقایسه قرار گرفت.

۴ نتایج

۴-۱ تأثیر ارتفاع بر PET و آسایش حرارتی فصلی

معادلات رگرسیون برای هر ماه در جدول ۲ ارائه شده‌اند تا رابطه بین شاخص PET و ارتفاع ایستگاه‌ها به صورت کمی نشان داده شود. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های مورد مطالعه، میان مقادیر شاخص PET و ارتفاع، یک روند کلی معکوس مشاهده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در بسیاری از مقاطع زمانی، ایستگاه‌های مرتفع‌تر مقادیر پایین‌تری از PET را نشان داده‌اند. این الگو می‌تواند بیانگر نقش ارتفاع در تعدیل شرایط حرارتی، به‌ویژه از طریق کاهش دمای هوا، باشد. با این حال، از آنجا که PET شاخصی چندعاملی است و علاوه بر ارتفاع تحت تأثیر متغیرهایی مانند سرعت باد، رطوبت نسبی، تابش، ابرناکی، موقعیت جغرافیایی و شرایط محلی قرار دارد، نتایج به‌دست‌آمده به‌عنوان رابطه علّی قطعی تفسیر نمی‌شود. بنابراین، رابطه مشاهده‌شده بیشتر نشان‌دهنده نقش احتمالی و مهم ارتفاع در کنار سایر عوامل اقلیمی و محیطی مؤثر بر آسایش حرارتی است. از دیدگاه کاربردی، شیب منفی خط برازش می‌تواند برای توصیف روند عمومی تغییرات PET نسبت به ارتفاع در ایستگاه‌های منتخب مفید باشد، اما این مقدار نباید به‌عنوان نرخ قطعی تغییر آسایش حرارتی در کل استان یا همه مناطق مرتفع تفسیر شود. بر این اساس، مناطق مرتفع‌تر می‌توانند در دوره‌های گرم سال از نظر کاهش تنش گرمایی، شرایط مساعدتری برای برخی فعالیت‌های گردشگری در فضای باز داشته باشند؛ در مقابل، در دوره‌های سرد سال، همین کاهش PET ممکن است موجب افزایش تنش سرمایی و محدودیت برای برخی انواع گردشگری شود.بیشینه مقدار شیب منفی در ماه می (۰.۰۱-) مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده حساسیت بالای شرایط بیوکلیماتیک به تغییرات ارتفاع در آستانه فصل گرم است. این موضوع حاکی از آن است که در این بازه

زمانی، جابه‌جایی ارتفاعی حتی در مقیاس‌های نسبتاً کوچک می‌تواند بهبود قابل توجهی در شرایط آسایش گردشگران ایجاد کند. به همین ترتیب، در ماه‌های مارس و آوریل نیز مقادیر بالای شیب، بیانگر نقش کلیدی ناهمواری‌ها در شکل‌دهی به الگوی فضایی آسایش حرارتی در فصل بهار است. تحلیل ضریب تعیین (R^2) نیز این الگو را تأیید می‌کند. مقادیر بالای R^2 در ماه‌های مارس (۰.۶۹)، می (۰.۶۹) و به‌طور کلی فصل بهار (۰.۶۹)، نشان‌دهنده قدرت تبیین بالای ارتفاع در تغییرات PETدر این دوره است. از منظر گردشگری، این امر بیانگر آن است که در فصل بهار، عامل ارتفاع می‌تواند به‌عنوان یک شاخص قابل اعتماد برای مکان‌یابی مقاصد گردشگری با شرایط آسایش حرارتی مطلوب مورد استفاده قرار گیرد. به بیان دیگر، توپوگرافی در این فصل نقش تعیین‌کننده‌تری در توزیع مکانی مطلوبیت اقلیمی ایفا می‌کند. در مقابل، کاهش مقدار R^2 در فصل زمستان، به‌ویژه در ماه دسامبر، نشان می‌دهد که در این دوره، ارتفاع به‌تنهایی بخش کمتری از تغییرات PET را در میان ایستگاه‌های مورد مطالعه توضیح می‌دهد. این وضعیت می‌تواند ناشی از نقش هم‌زمان سایر عوامل اقلیمی مانند تغییرات سامانه‌های جوی، پوشش ابری، سرعت باد، رطوبت و شرایط محلی باشد؛ با این حال، به دلیل استفاده از رگرسیون ساده، سهم مستقل هر یک از این عوامل در این پژوهش قابل تفکیک نیست. این وضعیت بیانگر آن است که در دوره‌های سرد سال، صرفاً اتکا به عامل ارتفاع برای ارزیابی پتانسیل گردشگری کافی نبوده و باید سایر پارامترهای اقلیمی نیز مدنظر قرار گیرند. در فصل تابستان، اگرچه رابطه منفی بین PET و ارتفاع همچنان برقرار و نسبتاً قوی است R^2 در حدود ۰.۶۳، اما کاهش نسبی ضریب تعیین نسبت به بهار نشان می‌دهد که عوامل دیگری مانند رطوبت نسبی، شدت تابش خورشیدی و شرایط محلی سطح زمین نیز در تعیین تنش گرمایی نقش مهم‌تری پیدا می‌کنند. با این حال، همین میزان از همبستگی نیز تأیید می‌کند که ارتفاع همچنان یکی از مؤثرترین عوامل در کاهش تنش گرمایی و افزایش جذابیت گردشگری در این فصل است.

جدول ۲. مقادیر همبستگی و روابط رگرسیونی شاخص PET و ارتفاع ایستگاه ها.

ماه	R^2	معادله رگرسیون
دسامبر	۰/۵۲	y = -0.0065x + 16.285
ژانویه	۰/۵۶	y = -0.007x + 15.529
فوریه	۰/۶۳	y = -0.0079x + 19.505
مارس	۰/۶۹	y = -0.0088x + 27.236
آوریل	۰/۶۹	y = -0.0094x + 34.518
مه	۰/۶۹	y = -0.0102x + 43.222
ژوئن	۰/۶۲	y = -0.0091x + 47.898
ژوئیه	۰/۶۳	y = -0.0087x + 49.742
اوت	۰/۶۲	y = -0.0086x + 46.838
سپتامبر	۰/۶۳	y = -0.0085x + 41.703
اکتبر	۰/۶۴	y = -0.0083x + 33.488
نوامبر	۰/۶۱	y = -0.0074x + 22.668
زمستان	۰/۵۷	y = -0.0071x + 17.107
بهار	۰/۶۹	y = -0.0095x + 34.992
تابستان	۰/۶۳	y = -0.0088x + 48.159
پاییز	۰/۶۳	y = -0.0081x + 32.62
سالانه	۰/۶۵	y = -0.0084x + 33.219

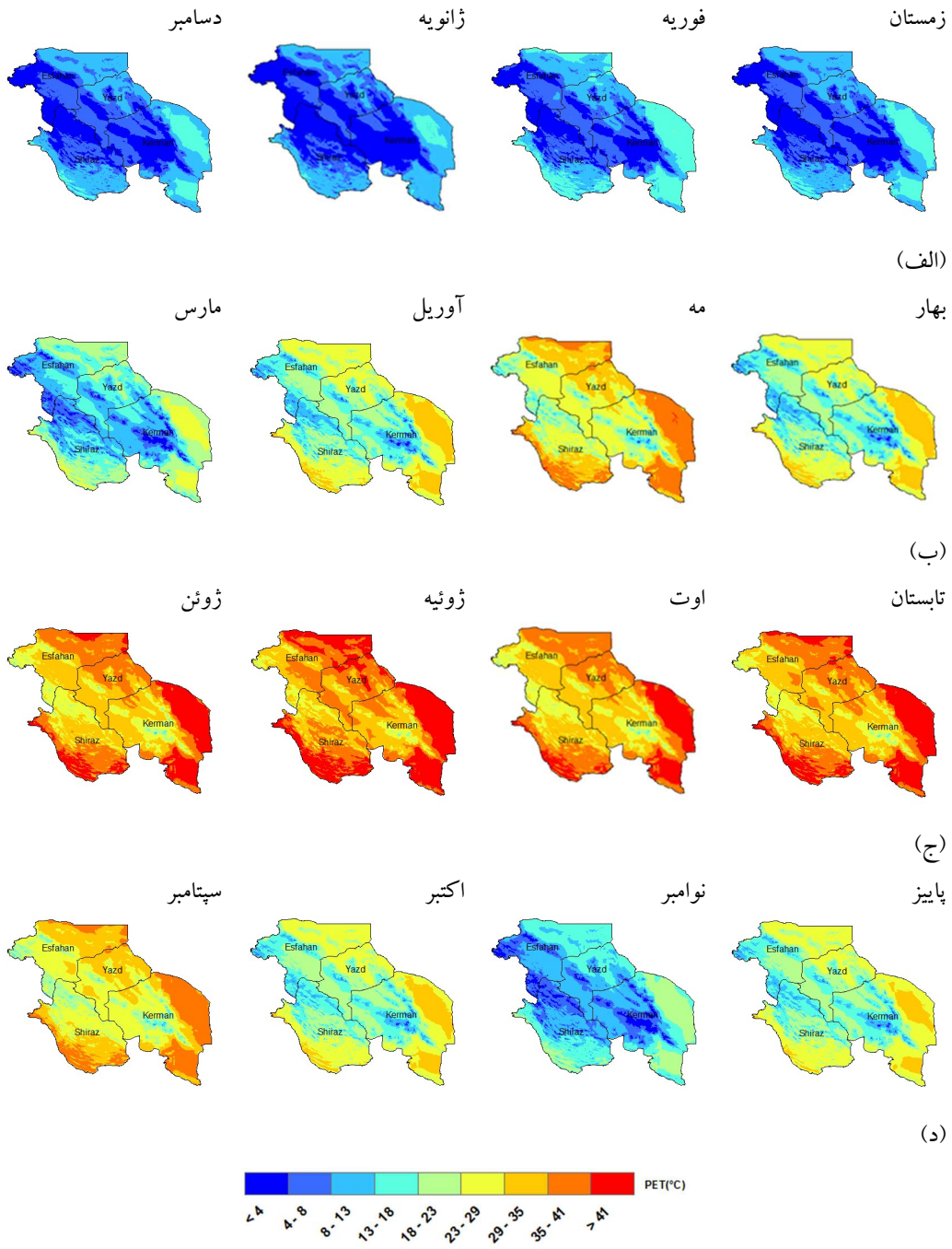
۴-۲ الگوی مکانی و زمانی شاخص PET

شکل (۲) الگوی مکانی زمانی شاخص دمای فیزیولوژیک (PET) را در مقیاس ماهانه و فصلی در فلات مرکزی ایران نشان می‌دهد که بیانگر یک چرخه بیوکلیماتیک کاملاً منظم با دامنه تغییرات بالا در طول سال است. این الگو، بازتابی از برهم‌کنش عوامل اقلیمی و ویژگی‌های توپوگرافیک (خصوصاً ارتفاع) بوده و چارچوبی مناسب برای ارزیابی پتانسیل گردشگری اقلیمی فراهم می‌کند. در فصل زمستان، غالب منطقه تحت تأثیر مقادیر پایین PET (عمدتاً کمتر از ۱۳ درجه

سلسیوس) قرار دارد که نشان‌دهنده حاکمیت تنش سرمایی و محدودیت جدی برای گردشگری مبتنی بر آسایش حرارتی است. با این حال، الگوی فضایی نشان می‌دهد که نواحی کم‌ارتفاع‌تر، به‌ویژه در بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی، شرایط ملایم‌تری داشته و می‌توانند به‌عنوان کانون‌های نسبی گردشگری زمستانه مطرح شوند. در مقابل، مناطق مرتفع مرکزی و غربی به دلیل تشدید شرایط سرمایی، از مطلوبیت گردشگری کمتری برخوردارند. با ورود به فصل بهار، گذار سریع از تنش سرمایی به شرایط آسایش حرارتی رخ می‌دهد. در ماه مارس، هنوز شرایط خنک مشاهده می‌شود، اما در آوریل و به‌ویژه می، بخش وسیعی از منطقه وارد محدوده آسایش و نیمه‌گرم (۱۸ تا ۲۹ درجه سلسیوس) می‌شود. این دوره از نظر گردشگری، پنجره طلایی آسایش اقلیمی محسوب می‌شود. شکل‌گیری گرادیان مکانی مشخص، به‌طوری‌که نواحی شرقی و جنوبی زودتر گرم می‌شوند و مناطق مرتفع غربی شرایط معتدل‌تری دارند، امکان تنوع فضایی در انتخاب مقاصد گردشگری را فراهم می‌کند. این ویژگی، مزیت مهمی برای توزیع زمانی و مکانی گردشگران و کاهش تمرکز فشار گردشگری است. در فصل تابستان، شرایط بیوکلیماتیک به‌شدت محدودکننده می‌شود. گسترش مقادیر بالای PET (بیش از ۳۵ و حتی ۴۱ درجه سلسیوس) در بخش عمده‌ای از منطقه، به‌ویژه در نواحی شرقی و جنوب‌شرقی، بیانگر حاکمیت تنش گرمایی شدید و بسیار شدید است که به‌طور قابل توجهی از مطلوبیت گردشگری می‌کاهد. در این میان، تنها مناطق مرتفع و غربی به‌واسطه اثر تعدیل‌کننده ارتفاع، در محدوده‌های قابل تحمل‌تر قرار می‌گیرند. این موضوع نشان می‌دهد که در فصل تابستان، گردشگری ارتفاع‌محور یا جابه‌جایی به نواحی خنک‌تر، به‌عنوان یک راهبرد سازگار با اقلیم اهمیت می‌یابد. در فصل پاییز، کاهش تدریجی PET موجب بازگشت شرایط به محدوده‌های آسایش حرارتی می‌شود. در سپتامبر هنوز اثرات تنش گرمایی در برخی نواحی باقی است، اما در اکتبر، بخش قابل توجهی از منطقه وارد محدوده آسایش (۱۸ تا ۲۳ درجه سلسیوس) می‌شود که مجدداً شرایط مطلوبی برای گردشگری فراهم می‌آورد. در نوامبر، با کاهش بیشتر دما، برخی نواحی به سمت شرایط خنک و سرد حرکت می‌کنند. الگوی فضایی پاییز، مشابه بهار، نشان‌دهنده یک گرادیان حرارتی قابل‌توجه است که امکان برنامه‌ریزی منعطف گردشگری را فراهم می‌کند.

۴-۳ مساحت و درصد طبقات ۹ گانه PET در فصول سال

جدول (۳) توزیع فضایی و سهم نسبی طبقات مختلف شاخص دمای فیزیولوژیک (PET) که توسط ماتزاراکیس و همکاران (۲۰۰۷) ارائه شده را در چهار فصل سال نشان می‌دهد که بیانگر نوسانات شدید تنش‌های حرارتی در مقیاس فصلی است. الگوی کلی حاکی از یک جابه‌جایی از غلبه تنش سرمایی در زمستان به تنش گرمایی در تابستان و شکل‌گیری شرایط بهینه آسایش حرارتی در فصول انتقالی است؛ الگویی که مستقیماً قابلیت‌ها و محدودیت‌های گردشگری اقلیمی منطقه را تعیین می‌کند. در فصل پاییز، توزیع طبقات PETنشان‌دهنده حاکمیت شرایط نسبتاً مطلوب از نظر گردشگری است. بیشترین سهم مساحت به کلاس تنش گرمایی خفیف (۳۲.۴ درصد) و محدوده بدون تنش حرارتی (۲۹.۲ درصد) اختصاص دارد که در مجموع بیانگر گستره وسیعی از شرایط قابل‌قبول برای فعالیت‌های گردشگری است. حضور همزمان تنش سرمایی خفیف (۲۳.۷ درصد) نشان‌دهنده آغاز گذار حرارتی و کاهش تدریجی دما است. از منظر برنامه‌ریزی گردشگری، این فصل به‌عنوان یک دوره با تعادل حرارتی و پراکندگی فضایی مناسب مقاصد قابل بهره‌برداری قابل تفسیر است.



شکل ۲. پهنه بندی ماهانه و فصلی شاخص PET براساس روابط رگرسیونی بدست آمده (جدول۲) در منطقه مورد مطالعه طی سال های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷.

در فصل بهار، اگرچه الگوی کلی مشابه پاییز است، اما تغییراتی در ترکیب طبقات مشاهده می‌شود که بیانگر افزایش تدریجی بار گرمایی است. کاهش نسبی سهم شرایط بدون تنش (۲۵.۹ درصد) و افزایش تنش گرمایی متوسط (۱۳.۵ درصد) نشان‌دهنده حرکت سیستم اقلیمی به سمت شرایط گرم‌تر است. با این حال، حضور همزمان

طبقات سرمایی (به‌ویژه تنش سرمایی متوسط با ۹.۳ درصد) بیانگر پویایی و ناپایداری حرارتی این فصل است. این ویژگی باعث می‌شود بهار به‌عنوان مطلوب‌ترین فصل گردشگری از نظر تنوع اقلیمی و امکان انتخاب فضایی مقاصد شناخته شود، زیرا طیفی از شرایط آسایش تا گرمای ملایم در منطقه قابل دسترسی است. در مقابل، فصل زمستان با تمرکز بالای طبقات تنش سرمایی مشخص می‌شود، به‌طوری‌که تنش سرمایی متوسط (۳۰.۵ درصد)، شدید (۲۸.۰ درصد) و بسیار شدید (۲۹.۹ درصد) بخش عمده‌ای از منطقه را پوشش می‌دهند. فقدان کامل شرایط بدون تنش یا گرمایی نشان‌دهنده محدودیت شدید زیست‌اقلیمی برای گردشگری عمومی است. در این شرایط، فعالیت‌های گردشگری به‌شدت وابسته به گردشگری خاص (نظیر گردشگری زمستانی یا مبتنی بر جاذبه‌های غیر اقلیمی) خواهد بود و از نظر آسایش حرارتی، منطقه در وضعیت نامطلوب قرار دارد. در فصل تابستان، الگوی کاملاً معکوسی نسبت به زمستان مشاهده می‌شود. غلبه تنش گرمایی متوسط (بیش از ۱۶۵ هزار کیلومتر مربع) و تنش گرمایی شدید (بیش از ۱۳۸ هزار کیلومتر مربع)، همراه با حضور مقادیر هرچند محدود از تنش بسیار شدید، بیانگر حاکمیت شرایط استرس‌زای گرمایی در بخش عمده‌ای از منطقه است. سهم ناچیز یا تقریباً صفر طبقات سرمایی و حتی شرایط بدون تنش حرارتی نشان می‌دهد که از منظر گردشگری، این فصل با محدودیت شدید فضایی برای فعالیت‌های روباز مواجه است. در چنین شرایطی، تنها نواحی محدود با ویژگی‌های توپوگرافیک خاص (مانند ارتفاعات) می‌توانند به‌عنوان پناهگاه‌های اقلیمی عمل کنند.

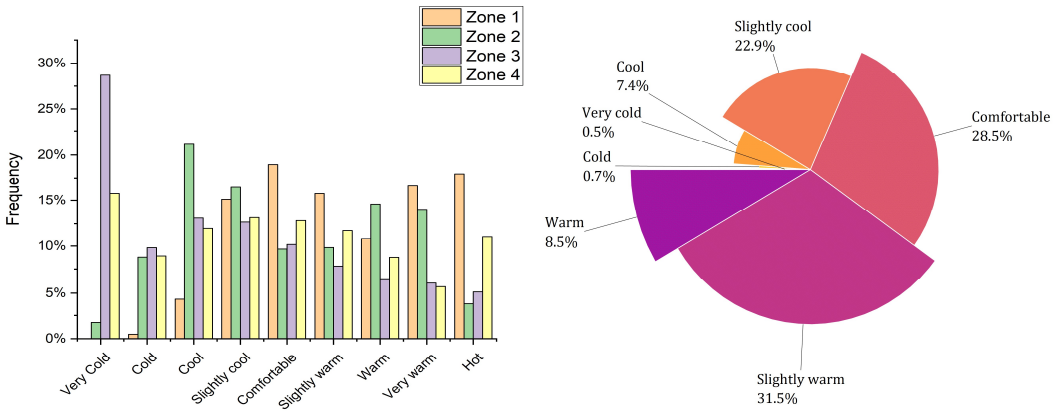
درصد مساحت شاخص PET در کل دوره و فرکانس شاخص PET (برحسب درجه سلسیوس) به تفکیک درجات مختلف تنش در استان های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، بیشترین سهم به طبقه کمی گرم (۳۱.۵ درصد) اختصاص دارد که نشان‌دهنده غالب بودن شرایطی است که اگرچه در محدوده قابل تحمل قرار دارند، اما می‌توانند در برخی موارد به ایجاد تنش گرمایی خفیف منجر شوند. در کنار آن، طبقه راحت با سهم قابل‌توجه ۲۸.۵ درصد، بیانگر وجود یک بازه زمانی گسترده با شرایط بهینه آسایش حرارتی است که از منظر گردشگری، بیشترین مطلوبیت را برای فعالیت‌های روباز و حضور گردشگران فراهم می‌کند. سهم ۲۲.۹ درصدی طبقه کمی خنک نیز نشان‌دهنده آن است که بخش قابل‌توجهی از زمان، شرایط حرارتی در محدوده‌ای قرار دارد که همچنان برای گردشگری قابل قبول بوده و حتی در برخی فعالیت‌ها (به‌ویژه در مناطق گرم) می‌تواند مطلوب تلقی شود. در مجموع، تمرکز بیش از ۸۰ درصد از داده‌ها در سه طبقه کمی گرم، راحت و کمی خنک بیانگر حاکمیت شرایط زیست‌اقلیمی نسبتاً مناسب در بخش عمده‌ای از سال است. در مقابل، طبقات حدی سهم بسیار کمتری دارند. شرایط گرم (۸.۵ درصد) و خنک (۷.۴ درصد) نشان‌دهنده وقوع محدود دوره‌های تنش حرارتی متوسط هستند، در حالی که طبقات سرد(۰.۷ درصد) و بسیار سرد (۰.۵ درصد) بیانگر نادر بودن تنش سرمایی شدید در منطقه است. این موضوع از منظر گردشگری حائز اهمیت است، زیرا نشان می‌دهد محدودیت‌های ناشی از سرمای شدید نقش چندانی در کاهش پتانسیل گردشگری ندارند، در حالی که تنش گرمایی حتی اگر عمدتاً در سطح خفیف باشد، عامل مهم‌تری در محدودسازی آسایش گردشگران به‌شمار می‌رود. نتایج توزیع فراوانی نسبی طبقات مختلف شاخص دمای فیزیولوژیک (PET) را به تفکیک شهرهای مورد مطالعه (شکل ۳ سمت راست) بیانگر ناهمگنی قابل توجه شرایط آسایش حرارتی در بین استان‌ها است که مستقیماً بر جذابیت و

جدول۳. مساحت (برحسب کیلومتر مربع) و درصد مساحت طبقات ۹ گانه شاخص PET در فصول مختلف سال.

PET (°C)	طبقه بندی تنش حرارتی	پاییز		بهار		زمستان		تابستان	
		مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد
		(km2)	(%)	(km2)	(%)	(km2)	(%)	(km2)	(%)
<۴	تنش سرمایی بسیار شدید	۴۸۸/۰۳	۰/۵	۱۴۸۵/۱۹	۰/۳	۱۴۲۹۳۷/۲۶	۲۹/۹	۰	۲۹/۹
۴ – ۸	تنش سرمایی شدید	۳۰۴۱/۴۹	۰/۶	۶۴۶۱/۸۴	۱/۳	۱۳۵۵۹۵/۴۱	۲۸	۰	۲۸
۸ – ۱۳	تنش سرمایی متوسط	۳۴۳۶۶/۰۵	۷/۱	۴۵۱۱۵/۶۲	۹/۳	۱۴۷۹۶۵/۳۳	۳۰/۵	۶۴/۷۴	۳۰/۵
۱۳ – ۱۸	تنش سرمایی خفیف	۱۱۴۵۹۹/۱۸	۲۳/۷	۱۰۳۸۰۹/۴۱	۲۱/۴	۵۶۲۵۰/۲۵	۱۱/۶	۷۰۶/۸۴	۱۱/۶
۱۸ – ۲۳	بدون تنش حرارتی	۱۴۱۵۵۳/۹۹	۲۹/۲	۱۲۵۶۳۱/۷۴	۲۵/۹	۰	۰	۶۶۲۴/۳۹	۰
۲۳ – ۲۹	تنش گرمایی خفیف	۱۵۶۸۷۵/۴	۳۲/۴	۱۳۶۴۲۶/۰۶	۲۸/۲	۰	۰	۶۷۴۶۶/۶۶	۰
۲۹ – ۳۵	تنش گرمایی متوسط	۳۱۸۲۴/۱	۶/۶	۶۵۶۱۴/۶۷	۱۳/۵	۰	۰	۱۶۵۱۰۸/۰۵	۰
۳۵ – ۴۱	تنش گرمایی شدید	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳۸۸۰۲/۲۵	۰
۴۱>	تنش گرمایی بسیار شدید	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۲۱	۰

کارکرد گردشگری آن‌ها تأثیر می‌گذارد. در استان اصفهان، تمرکز بالای فراوانی در طبقه بسیار سرد (حدود ۲۹ درصد) نشان‌دهنده غلبه تنش سرمایی شدید در بخش قابل‌توجهی از زمان است. حضور قابل‌توجه در طبقات سرد و خنک نیز این الگو را تقویت می‌کند. از منظر گردشگری، این وضعیت بیانگر محدودیت نسبی برای گردشگری عمومی در دوره‌های سرد و در عین حال، وجود پتانسیل برای توسعه گردشگری فصلی (به‌ویژه در

دوره‌های معتدل‌تر) یا فعالیت‌های خاص سازگار با سرما است. در مقابل، استان کرمان الگویی کاملاً متفاوت را نشان می‌دهد. تمرکز فراوانی در طبقات راحت، کمی گرم و گرم تا بسیار گرم بیانگر غالب بودن شرایط حرارتی ملایم متمایل به گرما است. این ویژگی، کرمان را به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین نواحی از نظر تداوم زمانی شرایط قابل قبول برای گردشگری معرفی می‌کند، هرچند در دوره‌های گرم، احتمال افزایش تنش گرمایی می‌تواند به‌عنوان عامل محدودکننده مطرح شود. بنابراین، در این استان مدیریت زمانی گردشگری و استفاده از ظرفیت‌های مکانی خنک‌تر (نظیر ارتفاعات) اهمیت می‌یابد. استان یزد دارای الگویی نسبتاً متعادل اما با دامنه نوسان بالا است؛ به‌گونه‌ای که هم در طبقات خنک (مانند خنک و کمی خنک) و هم در طبقات گرم (مانند گرم و بسیار گرم) سهم قابل‌توجهی دارد. این ویژگی بیانگر تنوع و پویایی شرایط بیوکلیماتیک در این استان است که می‌تواند فرصت‌هایی برای توزیع زمانی گردشگری در طول سال فراهم کند، اما در عین حال نیازمند برنامه‌ریزی دقیق برای مدیریت دوره‌های تنش حرارتی است.



(ب) (الف)

شکل ۳. الف) درصد مساحت شاخص PET در کل دوره(سال های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷) و ب) فرکانس شاخص PET (برحسب درجه سلسیوس) به تفکیک درجات مختلف تنش در ناحیه ۱ (شهر کرمان)، ناحیه ۲ (شهر یزد)، ناحیه ۳ (شهر اصفهان) و ناحیه ۴ (شهر شیراز).

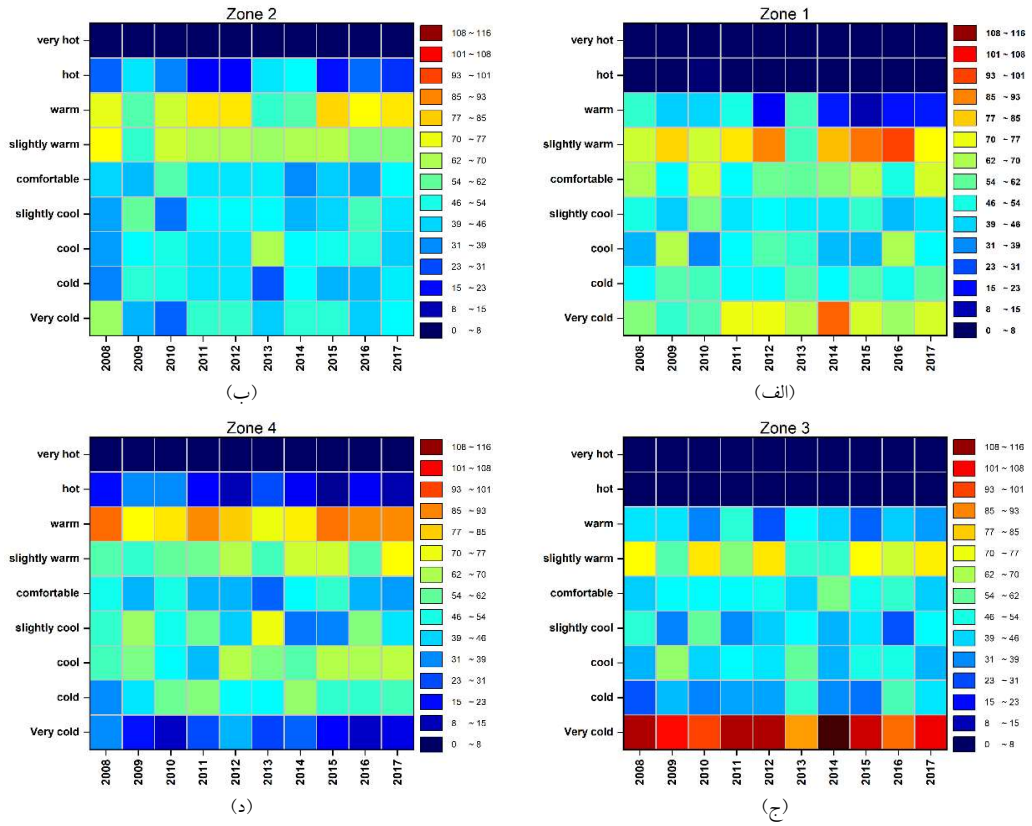
۴-۴ عداد روزهای تنش سرمایی و گرمایی (۲۰۰۸–۲۰۱۷) در چهار شهر ایران

شکل (۵) تغییرات زمانی فراوانی روزهای همراه با تنش‌های حرارتی بر اساس شاخص PET را در چهار استان طی دوره ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ نشان می‌دهد. این الگوها امکان تحلیل همزمان پویایی زمانی و ناهمگنی مکانی شرایط بآسایش حرارتی را فراهم کرده و چارچوبی مناسب برای ارزیابی پایداری و قابلیت اطمینان اقلیم گردشگری در فلات مرکزی ایران ارائه می‌دهند. در ناحیه ۱ (استان کرمان)، تمرکز غالب فراوانی در طبقات راحت و کمی گرم در اکثر سال‌ها، بیانگر پایداری نسبی شرایط آسایش حرارتی با گرایش به گرمای ملایم است. این ثبات زمانی، از منظر گردشگری حائز اهمیت است، زیرا نشان‌دهنده وجود یک بازه زمانی قابل پیش‌بینی و نسبتاً پایدار برای فعالیت‌های گردشگری است. محدود بودن فراوانی طبقات گرم و بسیار گرم نیز نشان می‌دهد که ریسک تنش گرمایی شدید در این ناحیه پایین بوده و شرایط اقلیمی آن از نظر آسایش، نسبتاً قابل اعتماد است.

در ناحیه ۲ (استان یزد)، الگوی زمانی پیچیده‌تر و نوسانی‌تری مشاهده می‌شود. افزایش متناوب فراوانی طبقات گرم و کمی گرم در برخی سال‌ها، در کنار حضور قابل‌توجه طبقات خنک و کمی خنک، بیانگر تغییرپذیری بالاتر شرایط بیوکلیماتیک است. این نوسانات نشان می‌دهد که اگرچه این زون از ظرفیت گردشگری برخوردار است، اما پایداری اقلیم گردشگری در آن کمتر بوده و نیازمند مدیریت زمانی دقیق‌تر و انعطاف‌پذیری در برنامه‌ریزی گردشگری است. همچنین، نسبت به ناحیه ۱، وقوع تنش گرمایی در برخی سال‌ها اندکی برجسته‌تر است. در ناحیه ۳ (استان اصفهان)، غلبه مستمر طبقه بسیار سرد در بخش عمده دوره زمانی، بیانگر سلطه تنش سرمایی شدید و پایداری شرایط سرد در این ناحیه است. این الگو نشان‌دهنده محدودیت قابل توجه برای گردشگری مبتنی بر آسایش حرارتی در بخش زیادی از سال بوده و بیانگر آن است که پتانسیل گردشگری در این زون بیشتر به دوره‌های محدود زمانی (فصول انتقالی) یا به انواع خاصی از گردشگری وابسته است. همچنین، سهم ناچیز طبقات گرم نشان می‌دهد که تنش گرمایی در این زون تقریباً نقش حاشیه‌ای دارد. در ناحیه ۴ (استان فارس)، ترکیبی از شرایط حرارتی مشاهده می‌شود که بیانگر یک الگوی بینابینی اما نسبتاً پویا است. فراوانی قابل توجه طبقات گرم و کمی گرم در کنار حضور طبقات خنک و سرد، نشان‌دهنده تنوع و نوسان حرارتی در مقیاس سالانه است. این ویژگی از منظر گردشگری می‌تواند به‌عنوان یک مزیت تلقی شود، زیرا امکان تنوع زمانی و مکانی فعالیت‌های گردشگری را فراهم می‌کند، هرچند که نیازمند مدیریت دقیق برای اجتناب از دوره‌های تنش حرارتی است.

شکل (۶) الگوی تغییرات زمانی فراوانی روزهای همراه با طبقات مختلف شاخص PET را در چهار ناحیه اقلیمی فلات مرکزی ایران طی دوره ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ نشان می‌دهد. این الگو، بیانگر روند فصلی مشخصی از جابه‌جایی بین تنش‌های سرمایی و گرمایی است، اما در عین حال تفاوت‌های مکانی قابل‌توجهی در شدت، تداوم و زمان وقوع این تنش‌ها میان نواحی مختلف مشاهده می‌شود که نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی پتانسیل گردشگری اقلیمی دارند. در ناحیه ۱ (کرمان)، توزیع زمانی شاخص PET نشان‌دهنده یک رژیم حرارتی نسبتاً متعادل و پایدار است. در زمستان، اگرچه فراوانی طبقات سرد افزایش می‌یابد، اما شدت تنش سرمایی نسبت به سایر نواحی محدودتر است. با ورود به بهار، افزایش سریع فراوانی طبقات آسایش (۱۳ تا ۲۳ درجه سلسیوس) وکمی گرم بیانگر شکل‌گیری یک بازه زمانی مطلوب برای گردشگری است. در تابستان، هرچند دما به سمت محدوده‌های گرم (۲۳ تا ۳۵ درجه) متمایل می‌شود، اما سهم دماهای بسیار بالا (بیش از ۳۵ درجه) محدود باقی می‌ماند. این ویژگی نشان می‌دهد که ناحیه ۱ از نظر پایداری اقلیم گردشگری و کاهش ریسک تنش گرمایی شدید، یکی از مناسب‌ترین نواحی منطقه محسوب می‌شود.

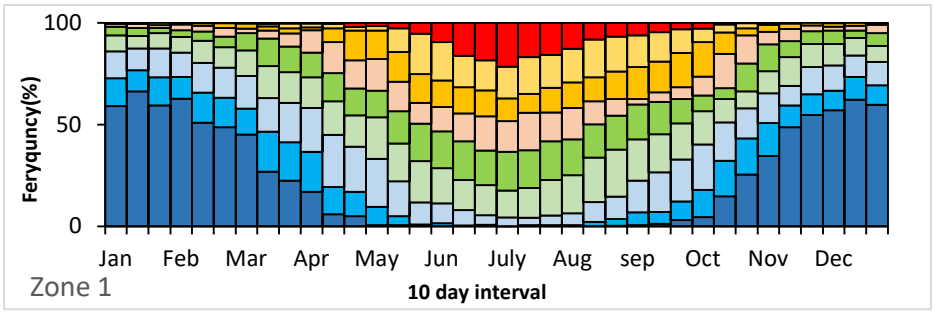
در ناحیه ۲ (یزد)، الگوی حرارتی از پویایی و نوسان بیشتری برخوردار است. زمستان‌ها نسبتاً ملایم‌تر از ناحیه ۳ بوده، اما گذار به شرایط گرم در بهار سریع‌تر اتفاق می‌افتد. در بازه‌های ده‌روزه فصل گرم، افزایش محسوس فراوانی طبقات «گرم» و «بسیار گرم» نشان‌دهنده تشدید تنش گرمایی است. این نوسانات حاکی از آن است که اگرچه این ناحیه دارای ظرفیت گردشگری است، اما پایداری زمانی شرایط آسایش کمتر بوده و نیازمند مدیریت دقیق تقویم گردشگری است. به‌عبارت دیگر، در این ناحیه، انتخاب زمان مناسب برای فعالیت‌های گردشگری اهمیت بالاتری دارد.



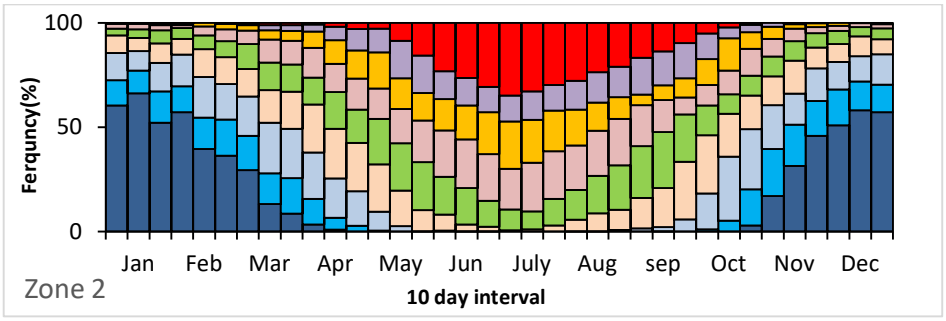
شکل ۵. تعداد روزهای همراه با تنش های سرمایی و گرمایی در سال های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ در الف) ناحیه ۱ (شهر کرمان)، ب) ناحیه ۲ (شهر یزد)، ج) ناحیه ۳ (شهر اصفهان) و د) ناحیه ۴ (شهر شیراز).

در ناحیه ۳ (اصفهان)، الگوی زمانی شاخص PET تحت سلطه تنش‌های سرمایی در بخش قابل‌توجهی از سال قرار دارد. فراوانی بالای طبقات بسیار سرد و سرد در دوره زمستان نشان‌دهنده محدودیت جدی برای گردشگری عمومی در این فصل است. هرچند در بهار، شرایط به سمت آسایش حرکت می‌کند، اما این دوره نسبتاً کوتاه بوده و با افزایش سریع دما در تابستان جایگزین می‌شود. در فصل گرم نیز، حضور طبقات دمایی بالا (به‌ویژه بیش از ۳۵ درجه) بیانگر وقوع تنش گرمایی قابل‌توجه است. بنابراین، این ناحیه از نظر گردشگری دارای پتانسیل فصلی محدود با دوگانگی تنش سرمایی و گرمایی است و بیشترین مطلوبیت آن به دوره‌های انتقالی محدود می‌شود.

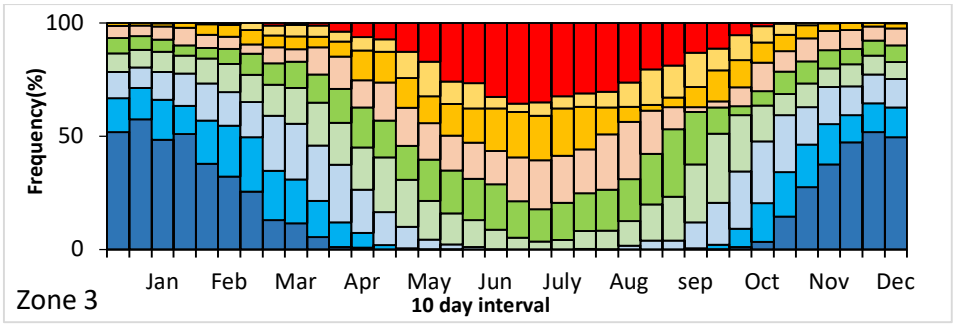
در ناحیه ۴ (فارس)، شرایط حرارتی الگوی بینابینی اما متمایل به گرما را نشان می‌دهد. زمستان‌ها نسبتاً ملایم بوده و سهم دماهای بسیار پایین محدود است که این موضوع می‌تواند به‌عنوان مزیتی برای گردشگری زمستانه تلقی شود. با این حال، در بهار، افزایش سریع دما موجب کوتاه شدن دوره آسایش می‌شود و در تابستان، غلبه دماهای بالا (به‌ویژه ۲۹ تا ۴۱ درجه سلسیوس) نشان‌دهنده تشدید تنش گرمایی است. تداوم این شرایط تا اوایل پاییز بیانگر طولانی بودن فصل گرم در این ناحیه است. در نتیجه، ناحیه ۴ دارای پتانسیل گردشگری فصلی با محدودیت در دوره‌های گرم و وابستگی به زمان‌بندی دقیق است.



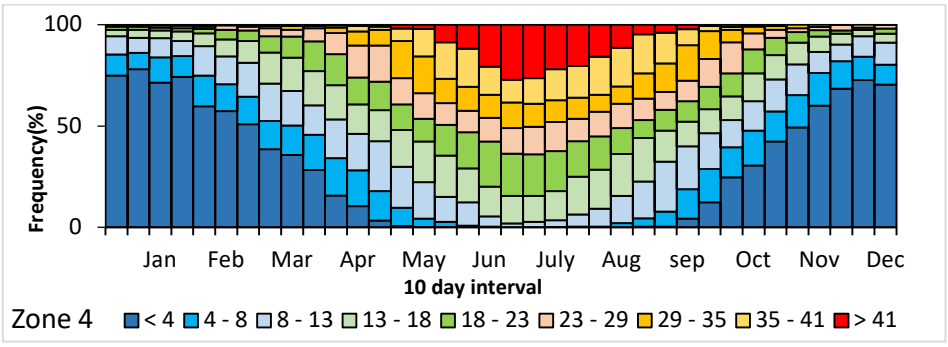
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۶. تغییرات زمانی–فصلی فراوانی طبقات شاخص دمای فیزیولوژیک (PET) در مقیاس دهروزه به تفکیک نواحی اقلیمی فلات مرکزی ایران (۲۰۰۸–۲۰۱۷): (الف) ناحیه ۱، (ب) ناحیه ۲، (ج) ناحیه ۳، (د) ناحیه ۴. طیف رنگی از آبی به قرمز بیانگر گذار از شرایط سرمایی به شرایط گرمایی است؛ به‌طوری‌که رنگ‌های آبی نشان‌دهنده طبقات سردتر، رنگ‌های سبز نشان‌دهنده شرایط آسایش یا نزدیک به آسایش، رنگ‌های زرد و نارنجی نشان‌دهنده تنش گرمایی متوسط و رنگ قرمز بیانگر تنش گرمایی شدید است.

۵ بحث و نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که شاخص دمای معادل فیزیولوژیک PET به‌عنوان یکی از شاخص‌های فیزیولوژیک مبتنی بر بیلان انرژی بدن انسان، توانایی بالایی در تبیین شرایط آسایش حرارتی و تنش‌های اقلیمی در فلات مرکزی ایران دارد. این شاخص به دلیل در نظر گرفتن هم‌زمان متغیرهایی مانند دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش و ویژگی‌های فیزیولوژیک انسان، نسبت به شاخص‌های ساده دمایی، تصویر دقیق‌تری از شرایط واقعی احساس‌شده توسط گردشگران ارائه می‌دهد. یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش حاضر، وجود رابطه معکوس میان PET و ارتفاع بود. بر این اساس، با افزایش ارتفاع، مقدار PET کاهش یافته و شدت تنش گرمایی تعدیل می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که توپوگرافی یکی از عوامل اصلی کنترل‌کننده آسایش حرارتی در فلات مرکزی ایران است. با این حال، تأثیر ارتفاع را نباید به‌صورت جدا از سایر عناصر اقلیمی تفسیر کرد؛ زیرا تابش خورشیدی، سرعت و جهت باد، رطوبت نسبی، پوشش ابر نیز در شکل‌گیری شرایط آسایش یا تنش حرارتی نقش دارند. این نتیجه با یافته‌های فرج‌زاده، سلیقه و علیجانی (۱۳۹۵) همخوان است که نشان دادند مقدار شاخص UTCI در ایران با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد و روزهای بدون تنش حرارتی از مناطق پست به نواحی مرتفع افزایش پیدا می‌کند؛ به‌ویژه در تابستان، مناطق کوهستانی و مرتفع بیشترین روزهای آسایش را تجربه می‌کنند. از نظر زمانی، یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که فلات مرکزی ایران دارای یک الگوی دوگانه است؛ به‌گونه‌ای که زمستان و تابستان به‌ترتیب با غلبه تنش سرمایی و گرمایی، دوره‌های محدودکننده‌تر گردشگری هستند، در حالی که بهار و پاییز بیشترین سهم شرایط آسایش حرارتی را دارند. این الگو بیانگر آن است که فصول انتقالی، یعنی بهار و پاییز، مناسب‌ترین بازه‌های زمانی برای گردشگری طبیعت‌محور و فعالیت‌های فضای باز در منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شوند. این یافته با نتایج اسماعیلی و همکاران (۱۳۹۰) همسو است. آنان با استفاده از شاخص PET، شرایط اقلیم آسایشی چهار شهر مهم گردشگری ایران، یعنی مشهد، اصفهان، رشت و کیش را بررسی کردند و نشان دادند که دوره آسایش اقلیمی در شهرهای مورد مطالعه کوتاه بوده و عمدتاً در دو دوره مجزا، یعنی ابتدای بهار و ابتدای پاییز، رخ می‌دهد. در آن پژوهش، طول دوره آسایش برای مشهد و اصفهان ۳۵ روز، برای رشت ۳۷ روز و برای کیش ۸۵ روز برآورد شد. همچنین تنش سرمایی زمستانی به‌عنوان محدودیت اصلی مشهد، اصفهان و رشت و تنش گرمایی فصل گرم به‌عنوان محدودیت اصلی کیش و تا حدی اصفهان معرفی شد. بنابراین، نتیجه پژوهش حاضر درباره کوتاه بودن پنجره‌های زمانی آسایش و تمرکز آن‌ها در بهار و پاییز، با شواهد تجربی این مطالعه هماهنگ است. نتایج پژوهش حاضر همچنین با مطالعه کاظمی و همکاران (۱۳۹۴) درباره شهر کرمان قابل مقایسه است. آنان با استفاده از داده‌های اقلیمی ۲۰ ساله، نرم‌افزار RayMan، شاخص PET و طرح اطلاعات اقلیم گردشگری CTIS، تقویم زمانی گردشگری شهر کرمان را استخراج کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بازه زمانی یکم اردیبهشت تا ۱۱ خرداد و ۱۰ شهریور تا ۲۸ مهر، بهترین زمان برای حضور گردشگران در کرمان است، در حالی که ۱۰ آذر تا ۲۲ بهمن بدترین زمان برای گردشگری محسوب می‌شود. این نتیجه، مانند پژوهش حاضر، بر اهمیت فصول انتقالی و محدودیت فصل سرد در مناطق مرکزی و خشک ایران تأکید دارد. از نظر مکانی، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که پتانسیل اقلیمی گردشگری در فلات مرکزی ایران یکنواخت نیست و تفاوت‌های ناحیه‌ای چشمگیری دارد. شهر کرمان به دلیل شرایط پایدارتر و دامنه محدودتر

تنش‌های حرارتی، بیشترین قابلیت را برای توسعه گردشگری در طول سال نشان می‌دهد. در مقابل، شهر اصفهان با غلبه تنش سرمایی و شهر شیراز با شدت بالاتر تنش گرمایی، محدودیت بیشتری برای گردشگری فضای باز دارند. شهرهای یزد و شیراز نیز به دلیل نوسانات بیشتر، نیازمند برنامه‌ریزی دقیق‌تر از نظر زمان‌بندی فعالیت‌های گردشگری هستند. یافته‌های پژوهش حاضر درباره نقش ارتفاع در تعدیل شرایط حرارتی، با نتایج حنفی (۱۴۰۱) درباره غرب کشور نیز قابل مقایسه است. حنفی با استفاده از مدل RayMan و شاخص PET در استان‌های کردستان، کرمانشاه و همدان نشان داد که در بیشتر بخش‌های غرب کشور، آسایش اقلیمی گردشگری در دو دوره مجزا رخ می‌دهد: از اوایل اردیبهشت تا اواخر خرداد و از اواسط شهریور تا اوایل آبان. همچنین در آن پژوهش، نقشه‌های اقلیم گردشگری بر اساس تغییرات ارتفاعی و ارتباط میان PET و ارتفاع تهیه شد و زمان‌های مناسب برای فعالیت‌هایی مانند کوه‌نوردی در ارتفاعات الوند، چهل‌چشمه، پرو و شاهو شناسایی گردید. این نتیجه با یافته پژوهش حاضر درباره اهمیت ارتفاع به‌عنوان عامل تعدیل‌کننده تنش گرمایی و ظرفیت مناطق مرتفع به‌عنوان پناهگاه اقلیمی همسو است. با این حال، مقایسه با مطالعه حنفی، رادسر و پاشاپور (۱۴۰۲) درباره شمال‌غرب کشور نشان می‌دهد که نقش ارتفاع و فصل در همه مناطق ایران یکسان نیست. آنان نشان دادند که در مناطق کوهستانی مانند اردبیل، خلخال، سراب و مشکین‌شهر، دوره آسایش اقلیمی از اوایل خرداد آغاز شده و تا اواسط شهریور ادامه می‌یابد و تابستان در این مناطق شرایط بسیار مناسبی برای گردشگری دارد. در مقابل، از مهر تا فروردین، تنش سرمایی با شدت‌های مختلف حاکم است. این تفاوت نشان می‌دهد که نتایج پژوهش حاضر درباره محدودیت تابستان در فلات مرکزی، نباید به همه مناطق ایران تعمیم داده شود. در مناطق مرتفع‌تر و سردتر، تابستان می‌تواند فصل مطلوب گردشگری باشد، در حالی که در بخش‌های گرم‌تر فلات مرکزی، تابستان اغلب با تنش گرمایی همراه است. بر این اساس، یکی از نکات مهم این پژوهش، ضرورت تعریف دقیق مفهوم «پتانسیل گردشگری» است. نتایج این مطالعه بیش از آنکه درباره گردشگری به معنای عام باشد، درباره پتانسیل اقلیمی گردشگری طبیعت‌محور و فعالیت‌های فضای باز از منظر آسایش حرارتی است. در مجموع، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که پتانسیل اقلیمی گردشگری در فلات مرکزی ایران تابعی از میانگین دما نیست، بلکه به مجموعه‌ای از عوامل شامل ارتفاع، تابش خورشیدی، باد، رطوبت نسبی، پایداری زمانی آسایش، شدت تنش‌های حرارتی، ناهمگنی مکانی و نوع فعالیت گردشگری وابسته است. بهار و پاییز مناسب‌ترین دوره‌ها برای گردشگری طبیعت‌محور و فعالیت‌های فضای باز هستند، در حالی که تابستان و زمستان به دلیل غلبه تنش گرمایی و سرمایی، محدودیت بیشتری دارند. همچنین مناطق مرتفع می‌توانند در دوره‌های گرم سال نقش پناهگاه اقلیمی داشته باشند، اما در فصل سرد ممکن است خود به عامل محدودکننده تبدیل شوند.

منابع

اسماعیلی، رضا.، گندمکار، امیر.، و حبیبی نوخندان، مجید. (۱۳۹۰). ارزیابی اقلیم آسایشی چند شهر اصلی گردشگری ایران با استفاده از شاخص دمای معادل فیزیولوژیک (PET). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۳(۷۵)، ۴۷-۶۱.

بامری‌نژاد، فریده.، کشتکار، امیر. رضا.، کریم‌پور‌یحان، مجید.، و افضلی، علی. (۱۳۹۸). به‌کارگیری شاخص‌های اقلیمی در تعیین مناطق مستعد گردشگری استان کرمان. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۰(۳)، ۷۸-۹۸.

https://doi.org/10.22108/gep.2019.118403.1182

برقی، حمید.، یزدان‌پناه، حجت اله.، و اسماعیلی، آرزو. (۱۳۹۶). ارزیابی اقلیم آسایش گردشگری مسیر رودخانهٔ زاینده‌رود با استفاده از شاخص CTIS. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۸(۳)، ۸۱-۹۶. https://doi.org/10.22108/gep.2017.97864.0

حنفی، علی. (۱۴۰۱). تعیین تقویم مناسب طبیعت‌گردی در غرب کشور با استفاده از شاخص PET. جغرافیای طبیعی، ۱۵(۵۸)، ۵۱-۷۰.

حنفی، علی.، رادسر، مصطفی.، و پاشاپور، حجت اله. (۱۴۰۲). ارزیابی و پهنه‌بندی تقویم اکوتوریسم منطقه شمال غرب کشور در جهت توسعه فعالیت‌های گردشگری. مهندسی جغرافیایی سرزمین، ۷(۴)، ۷۹۳-۸۱۰. https://doi.org/10.22034/jget.2024.158355

فرج‌زاده، حسن.، سلیقه، محمد.، و علیجانی، بهلول. (۱۳۹۵). کاربرد شاخص اقلیم حرارتی جهانی در ایران از منظر گردشگری. مخاطرات محیط طبیعی، ۵(۷)، ۱۱۷-۱۳۸. https://doi.org/10.22111/jneh.2016.2658

شیخ‌زاده، کامران.، گندمکار، امیر.، و عباسی، علیرضا. (۱۴۰۴). شناخت روند تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت اقلیم آسایش گردشگری ایران. *جغرافیا و آینده‌پژوهی منطقه‌ای*، ۴(۳)، ۹۲-۱۱۰. https://doi.org/10.20366/GRFS.2025.56228.1127

رنجبر، عباس، نوری، فائزه، مرادی، محمد، و فتاحی، ابراهیم. (۱۳۹۹). برآورد توزیع زمانی رخداد تنش‌های گرمایی و سرمایی شدید در فضای باز شهر تهران؛ مطالعه موردی: منطقه ۹. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۱(۴۲)، ۱۵-۱.

دولتخواه، مهدی. (۱۳۹۰). بررسی شاخص‌های زیست‌اقلیمی مؤثر در آسایش انسان؛ مطالعه موردی: شهر کاشمر [پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم سبزوار، پژوهشکده جغرافیا و علوم زیستی].

Barghadi, A. (1389). Investigation of biomedical evaluation index in Sabzevar (Master's thesis, Geography).

Bauche, J. P., Grigorieva, E. A., & Matzarakis, A. (2013). Human-biometeorological assessment of urban structures in extreme climate conditions: The example of Birobidzhan, Russian Far East. Advances in Meteorology, 2013, Article 749270. https://doi.org/10.1155/2013/749270

Becken, S., & Hay, J. (2007). Tourism and climate change: Risks and opportunities. Channel View Publications.

de Freitas, C. R. (2003). Tourism climatology: Evaluating environmental information for decision making and business planning in the recreation sector. International Journal of Biometeorology, 48(1), 45–54.

de Freitas, C. R., Scott, D., & McBoyle, G. (2008). A second generation climate index for tourism (CIT): Specification and verification. International Journal of Biometeorology, 52(5), 399–407. https://doi.org/10.1007/s00484-007-0134-3

Fanger, P. O. (1972). Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. New York, NY: McGraw-Hill.

Farajzadeh, H., & Matzarakis, A. (2012). Evaluation of thermal comfort conditions in Ourmieh Lake, Iran. Theoretical and Applied Climatology, 107, 451–459. https://doi.org/10.1007/s00704-011-0492-y

Grigorieva, E., & Matzarakis, A. (2011). Physiologically equivalent temperature as a factor for tourism in extreme climate regions in the Russian Far East: Preliminary results. European Journal of Tourism, Hospitality and Recreation, 3, 127–142.

Hamilton, J. M., & Lau, M. A. (2005). The role of climate information in tourist destination choice decision-making. In Proceedings of the 17th International Congress of Biometeorology (pp. 608–611).

Hanafi, A., & Atashgahi, H. (2017). Determination of thermal bioclimatic conditions for tourists in west and northwest of Iran using PET. International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology, 2(1), 61–71. https://doi.org/10.22161/ijeab/2.1.10

Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International Journal of Biometeorology, 43, 71–75.

Irmak, M. A., Bilge, C., Yilmaz, S., & Daş, M. E. (2025). Microclimate-focused thermal comfort assessment in coastal settlements with tourism activities. Pure and Applied Geophysics, 182(5), 2199–2217. https://doi.org/10.1007/s00024-025-

Jendritzky, G., de Dear, R., & Havenith, G. (2012). UTCI—Why another thermal index? International Journal of Biometeorology, 56, 421–428. https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7

Jendritzky, G., Menz, G., Schmidt-Kessen, W., & Schirmer, H. (1990). Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen. Akademie für Raumforschung und Landesplanung.

Lin, T.-P., Hwang, C. C., & Cheng, H. Y. (2006). The influence of climate information on travel arrangements. In Leisure, Recreation and Tourism Research Symposium (pp. 120–126).

Lin, T.-P., & Matzarakis, A. (2008). Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. International Journal of Biometeorology, 52, 281–290.

Lin, T. P., & Matzarakis, A. (2011). Tourism climate information based on human thermal perception in Taiwan and Eastern China. Tourism Management, 32(3), 492–500. https://doi.org/10.1016/j.tourman.2010.03.017

Lopes, H. S., Remoaldo, P. C., Ribeiro, V., & Martín-Vide, J. (2021). Perceptions of human thermal comfort in an urban tourism destination: A case study of Porto (Portugal). Building and Environment, 205, Article 108246. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108246

Lopes, H. S., Remoaldo, P. C., Ribeiro, V., & Martín-Vide, J. (2022). A comprehensive methodology for assessing outdoor thermal comfort in touristic city of Porto (Portugal). Urban Climate, 45, Article 101264. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101264

Matzarakis, A. (2001). Assessing climate for tourism purposes: Existing methods and tools for the thermal complex. In Proceedings of the First International Workshop on Climate, Tourism and Recreation (pp. 101–113).

Matzarakis, A. (2006). Weather- and climate-related information for tourism. Tourism and Hospitality Planning & Development, 3(2), 99–115. https://doi.org/10.1080/14790530600938279

Matzarakis, A. (2021). Comments about urban bioclimate aspects for consideration in urban climate and planning issues in the era of climate change. Atmosphere, 12(4), Article 546. https://doi.org/10.3390/atmos12040546

Matzarakis, A., & Amelung, B. (2008). Physiological equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans. In Seasonal forecasts, climatic change and human health (pp. 161–172). Springer.

Matzarakis, A., de Freitas, C., & Scott, D. (Eds.). 03719-w
(2004). Advances in tourism climatology. Meteorological Institute, University of Freiburg.

Matzarakis, A., Hämmerle, M., Endler, C., Muthers, S., & Koch, E. (2012). Assessment of tourism and recreation destinations under climate change conditions in Austria. Meteorologische Zeitschrift, 21(2), 157–165. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0342

Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: Physiological equivalent temperature. International Journal of Biometeorology, 43, 76–84.

Matzarakis, A., Rammelberg, J., & Junk, J. (2013). Assessment of thermal bioclimate and tourism climate potential for Central Europe: The example of Luxembourg. Theoretical and Applied Climatology, 114, 193–202. https://doi.org/10.1007/s00704-013-0835-y

Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2008). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Application of the RayMan model. International Journal of Biometeorology, 51, 323–334.

Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. International Journal of Biometeorology, 54, 131–139.

Mayer, H., & Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. Theoretical and Applied Climatology, 38, 43–49. https://doi.org/10.1007/BF00866252

Nasrollahi, N., Hatami, Z., & Taleghani, M. (2017). Development of outdoor thermal comfort model for tourists in urban historical areas: A case study in Isfahan. Building and Environment, 125, 356–372. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.006

Nourmohammadi, F., & Gómez-Martín, M. B. (2022). Climate preferences of Iranian tourists for nature-based tourism (NBT) in arid regions. Atmosphere, 13(11), Article 1784. https://doi.org/10.3390/atmos13111784

Nourmohammadi Najafabadi, F., & Gómez-Martín, M. B. (2023). Evaluation of climate suitability for nature-based tourism (NBT) in arid regions of Isfahan Province (Iran). Atmosphere, 14(10), Article 1565. https://doi.org/10.3390/atmos14101565

Pecelj, M., Matzarakis, A., Vujadinović, M., Radovanović, M., Vagić, N., Đurić, D., & Cvetković, M. (2021). Temporal analysis of urban-suburban PET, mPET and UTCI indices in

Belgrade (Serbia). Atmosphere, 12(7), Article 916. https://doi.org/10.3390/atmos12070916

Raziei, T. (2022). Climate of Iran according to Köppen–Geiger, Feddema, and UNEP climate classifications. Theoretical and Applied Climatology, 148(3–4), 1395–1416. https://doi.org/10.1007/s00704-022-03992-y

Roshan, G., Yousefi, R., & Błażejczyk, K. (2018). Assessment of the climatic potential for tourism in Iran through biometeorology clustering. International Journal of Biometeorology, 62, 525–542. https://doi.org/10.1007/s00484-017-1462-6

VDI. (1994). Environmental meteorology: Interactions between atmosphere and surfaces; calculation of short-wave and long-wave radiation (VDI Guideline 3789, Part 2). Beuth Verlag.

VDI. (1998). Environmental meteorology: Methods for the human-biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning at regional level; Part I: Climate (VDI Guideline 3787, Part 2). Beuth Verlag.

VDI. (2022). Environmental meteorology: Methods for human-biometeorological evaluation of the thermal component of the climate (VDI Guideline 3787, Part 2:2022-06). Beuth Verlag.

Iranian Journal of Geophysics, Vol 20, No 4, 2026, P. 9 (Research article)
DOI: 10.30499/ijg.2026.580202.1766

Assessment of the tourism potential of the central plateau of Iran using a thermal stress analysis approach during warm and cold periods of the year

Ebrahim Fatahi[1], Faezeh Noori[2] and Abbas Ranjbar Saadat Abadi[1*]

[1] *Professor, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran*
[2] *Ph.D. Student, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran*

(Received: 20 May 2026, Accepted: 22 July 2026)

Summary
Tourism is highly sensitive to climatic conditions because tourists' comfort and travel decisions are influenced by heat and cold stress. This issue is particularly important in arid and semi-arid regions where strong seasonal and spatial thermal variations create both opportunities and constraints for tourism development. The Central Plateau of Iran, encompassing the provinces of Isfahan, Yazd, Kerman, and Fars, represents one of the country's most important tourism regions due to its cultural heritage, desert landscapes, mountainous environments, and diverse natural attractions. However, climatic contrasts and topographic variability significantly affect thermal comfort and tourism suitability across the region.

This study assessed the tourism potential of the Central Plateau of Iran using the Physiological Equivalent Temperature (PET) index during the period 2008–2017. Meteorological variables including air temperature, relative humidity, vapor pressure, wind speed, cloud cover, and mean radiant temperature (Tmrt) were prepared and analyzed. Because Tmrt is a key component of PET calculation, the RayMan Pro software was employed to estimate Tmrt and compute PET values. Standard human parameters were considered, including a height of 1.75 m, body weight of 75 kg, age of 25 years, clothing insulation of 0.9 clo, and an activity level of 32 W. To evaluate the influence of topography on thermal comfort, the relationship between PET values and station elevation was examined using linear regression and the coefficient of determination (R^2) at monthly, seasonal, and annual scales.

The results revealed a consistent inverse relationship between PET and elevation, indicating that increasing altitude reduces PET values and moderates heat stress conditions. The steepest negative slope (-0.01) was observed in May, reflecting the high sensitivity of bioclimatic conditions to elevation during the transition to the warm season. Furthermore, the highest explanatory power of elevation was recorded in March and May and during spring, with R^2 values reaching 0.69, demonstrating the strong influence of topography on the spatial distribution of thermal comfort. Although the explanatory power decreased slightly in summer, the relationship remained relatively strong, with an R^2 value of approximately 0.63.

Seasonal PET patterns showed that winter was generally dominated by cold stress, particularly in high-elevation areas, whereas summer was characterized by moderate to strong heat stress in lowland regions. In contrast, spring and autumn provided the most favorable thermal conditions, with large areas falling within comfortable or slightly stressful thermal categories. Regional analysis highlighted substantial spatial variability, with Kerman exhibiting relatively stable and favorable thermal conditions, Yazd showing greater thermal variability, Isfahan being more affected by cold stress, and Fars experiencing higher summer heat stress.

Overall, the findings demonstrate that tourism potential in the Central Plateau of Iran is strongly controlled by seasonal thermal conditions and elevation. Spring and autumn represent the most suitable periods for tourism activities, while high-elevation areas function as important climatic refuges during hot seasons. These results emphasize the importance of bioclimatic zoning and climate-sensitive tourism planning to enhance tourist comfort and support sustainable tourism development.

Keywords: Physiological equivalent temperature, thermal comfort, climate tourism, central plateau of Iran, RayMan Pro

[*] Corresponding author: aranjbar@gmail.com