



شناخت پدیده مخرب جزایر گرمایش شهری و کاهش آن با رویکرد بررسی روسازی راه

آرمین توفیقی، رشید تن زاده*، فریدون مقدس نژاد

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۱
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۰۳
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷

کلمات کلیدی:

جزایر گرمایش شهری
دمای محیط
روسازی خنک
مواد بازتابنده
مصرف انرژی

خلاصه: توسعه محیط های شهری و افزایش بیش از حد جمعیت شهرها، باعث افزایش میزان مصرف انرژی و در نتیجه افزایش دمای محیط های شهری شده است. پدیده افزایش دمای شهرها نسبت به دمای محیط های پیرامون شهری را جزایر گرمایش شهری می نامند. اتلاف انرژی، مصرف منابع مالی، تغییرات اقلیمی و اکوسیستمی از مهمترین پیامدهای ناگوار پدیده جزایر گرمایش شهری است. در این تحقیق، عوامل ایجاد جزایر گرمایش شهری، روش های کاهش این پدیده مخرب با رویکرد استفاده از روسازی های خنک، به طور جامع مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات نشان داده است که جزایر گرمایش شهری با استفاده از روش های ثابت، پیمایشی و از راه دور قابل ارزیابی است. یکی از موثرترین اقدامات در راستای کاهش پدیده مخرب جزایر شهری، استفاده از مواد بازتابنده و کاربرد روسازی های خنک در جاده ها در راستای کاهش دمای شهرها و کاهش تاثیرات پدیده مخرب جزایر گرمایش شهری است. نتایج نشان داده است که با استفاده از روسازی های خنک، دمای محیط تا ۲ درجه سانتی گراد و دمای سطح رویه روسازی تا ۱۳ درجه سانتی گراد، کاهش یافته است. کاربرد سیمان و سنگدانه با رنگ روشن و افزودنی هایی مانند تیتانیوم دی اکسید، اکسید روی، اکسید آلومینیوم و خاکستر کوره، در کاهش این پدیده، موثر بوده است. با افزایش نفوذ پذیری رویه راه، افزایش ضریب انعکاس سطح، افزایش ضریب حرارتی و کاهش ضخامت روسازی میتوان دمای سطح روسازی را کاهش داد و مانع ایجاد پدیده نامطلوب جزایر گرمایش شهری شد.

۱- مقدمه

معرض تغییرات اقلیمی و تاثیرات محلی مانند پدیده جزایر گرمایش شهری می باشند. مطابق مدل سازی مکارتهپی و همکارانش، افزایش رشد جمعیت در یک منطقه با افزایش پتانسیل ایجاد پدیده جزایر گرمایش شهری در آن منطقه ارتباط مستقیم داشته است. این مناطق بیشتر در خاورمیانه، هند و شرق آفریقا مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. افزایش فعالیت های اقتصادی در کنار رشد ساخت و ساز، افزایش دمای مناطق شهری نسبت به محیط های حومه شهری را به همراه داشته است. پدیده نامطلوب جزایر گرمایش شهری به علت تفاوت تبادل دمایی در مصالح ساختمانی و زمین های طبیعی، محصور شدن اشعه های خورشید بین ساختمان های بلند، کاهش پوشش گیاهی، نفوذپذیری کم سطوح، موانع موجود در مسیر حرکت باد و افزایش ظرفیت گرمایی مواد و مصالح، ایجاد شده است [۵].

با تابش نور خورشید به سطوح، مقداری از نور خورشید بازتاب شده و مقدار زیادی از آن توسط سطح جذب می شود. مقداری از گرمای جذب شده، تحت عنوان شار حرارتی حساس، به هوا انتقال می یابد. شار حرارتی

شهرسازی، فرآیندی پیچیده شامل مهاجرت از مناطق کشاورزی به مناطق غیر کشاورزی، تشکیل شهرهای بزرگ و تغییر کاربری زمین های طبیعی به مسکونی و تجاری تعریف شده است. افزایش جمعیت، صنعتی شدن، رشد هزینه ها، افزایش اختلافات اجتماعی، مصرف انرژی و تاثیرات منفی زیست محیطی از جمله مشکلات ناشی از توسعه پدیده شهرسازی است [۱، ۲]. اهمیت توجه به مسئله گرمایش جهانی از ابتدای قرن ۱۹ میلادی همزمان با گرم شدن سطح زمین، مورد توجه محققین در بسیاری از کشورهای دنیا قرار گرفته است. با اسکان بیش از ۵۰ درصد جمعیت جهان در محیط های شهری، شهرسازی به عنوان عامل تاثیرگذاری در پدیده گرمایش شهری شناخته شده است [۳]. مطالعات آماری نشان داده است که با ادامه روند شهرسازی تا سال ۲۰۵۰ میلادی، در حدود ۶ میلیارد نفر در شهرها اسکان یابند. با تولید و انتشار گازهای گلخانه ای، شهرها در

* نویسنده عهده دار مکاتبات: rashidtanazadeh@aut.ac.ir





شکل ۱. لایه های مختلف جزایر گرمایش شهری

Fig. 1. Different layers of Urban Heat Islands

۱ تا ۲ درجه سانتی گراد است که این تفاوت دمایی در طول شب به حداکثر مقدار یعنی ۱۲ درجه سانتی گراد رسیده است [۸].

این پدیده نامطلوب در اکثر شهرهای پرجمعیت دنیا در حال افزایش است. تغییر ساختار شهرها و تغییرات آب و هوایی باعث تشدید جزایر گرمایش شهری شده که کاهش کیفیت هوا و بیماری های ناشی از افزایش دما را به همراه داشته است [۹]. جزایر گرمایش شهری باعث افزایش قابل توجه مصرف انرژی در راستای خنک سازی ساختمان ها در مناطق شهری نسبت به حومه شهرها شده است [۱۰، ۱۱]. با توجه به مطالعات سانتاموریس و همکارانش در ۱۱ منطقه شهری (بانکوک، توکیو، آنتاریو، لس آنجلس، واشنگتن، دالاس، کلرادو اسپرینگز، فونیکس، توسان، اسرائیل و کارولینا) در مورد تاثیر افزایش دمای محیط بر افزایش مصرف انرژی مشخص شد که به ازای هر یک درجه سانتی گراد افزایش دمای محیط، مصرف انرژی بین ۰/۴۵ تا ۴/۶ درصد افزایش یافته است. همچنین با مطالعه ۱۵ منطقه شهری مشخص شد که به ازای هر یک درجه افزایش دمای محیط، مصرف انرژی بین ۰/۵ تا ۸/۵ درصد افزایش یافته است [۱۲]. انتشار گازهای گلخانه ای در اثر فعالیت های صنعتی، مصرف زیاد انرژی در شهرها، ایجاد دره های خیابانی محصور کننده گرما، استفاده از مواد با قابلیت بازتابش پایین نور خورشید در نمای ساختمان ها و سطح جاده ها [۱۳]، از بین رفتن فضای سبز شهرها و

به اختلاف دمای بین سطح و هوای پیرامونی بستگی دارد. انتقال حرارت بین سطوح و هوا تحت تاثیر عواملی مانند وزش باد و ساخت و سازهای عمودی شهر نیز قرار دارد [۶]. میانگین اختلاف دمای مناطق تحت تاثیر پدیده جزایر گرمایش شهری و مناطق پیرامون آن، در حدود ۲ تا ۵ درجه سانتی گراد است [۷]. پدیده جزایر گرمایش شهری به گرمای نسبی (تفاوت دمایی) هوای بین مناطق شهری و مناطق حومه شهری اشاره دارد. مطابق شکل ۱، لایه های مختلف جزایر گرمایش شهری به سه لایه سطحی، لایه سایبان و لایه مرزی تقسیم شده است. انرژی خورشیدی در سطوح سازه ای مناطق شهری، جذب و نگه داری شده و شکل دره مانند شهرها با ساختمان های بلند، باعث خروج گرمای کمتری به سوی آسمان شده است که بازتاب اشعه خورشید و محبوس شدن گرما در دره های خیابانی، به خوبی نشان داده شده است [۸].

این پدیده باعث افزایش دمای شهرها و افزایش تمرکز گاز ازون در سطح شهرها شده است. ازون به عنوان یک گاز گلخانه ای، تاثیر زیادی در افزایش دمای شهری داشته است. معمولاً تفاوت دمای مناطق شهری و مناطق حومه شهری در طول شب حداکثر بوده و این تفاوت دمایی در فصل زمستان قابل توجه بوده است. مطالعات نشان داده است که در شهری با یک میلیون جمعیت، تفاوت دمای مناطق شهری با مناطق حومه شهری در حدود

به علت خصوصیات بازتابندگی و جذب گرمایی متفاوت نسبت به مواد طبیعی، بازتابش کمتر نور خورشید، جذب بیشتر گرما و انتشار آن در شب، باعث رشد این پدیده مخرب شده است [۳۹]. استفاده از روسازی آسفالتی در سطح راه‌ها و پوشش‌های قیری در سقف ساختمان‌ها، با جذب انرژی خورشیدی، باعث گرمایش سطح و محیط اطراف آن شده است [۳۸].

اکبری و همکاران با مطالعه بر روی مناطق تجاری، مسکونی، صنعتی و حمل و نقلی در ۴ منطقه از شیکاگو، درصد پوشش سطوح را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داده است که به طور متوسط گیاهان ۲۹ تا ۴۱ درصد، سقف‌ها ۱۹ تا ۲۵ درصد و سطوح آسفالتی ۲۹ تا ۳۹ درصد پوشش سطوح مناطق شهری را تشکیل داده است. این مطالعه نشان داده است تا ۶۴ درصد پوشش مناطق مورد بررسی، از مواد ساخته شده توسط بشر تشکیل شده است که خود تاثیر زیادی در افزایش دمای محیط داشته است [۴۰].

آسفالت مورد استفاده در شهرها به علت جذب بالای گرما، تاثیر زیادی در افزایش پدیده گرمایش شهری داشته است [۴۱]. بر اساس مطالعات تاکبایاشی و موریاما، دمای سطح آسفالت در طول روز تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد از دمای سطح مناطق با پوشش گیاهی بالاتر است [۴۲]. این مسئله نشان دهنده آن است که استفاده از روسازی آسفالتی، تاثیر زیادی در افزایش پدیده گرمایش شهری داشته است.

استفاده از دستگاه‌های تهویه هوا جهت خنک سازی ساختمان‌ها در فصل تابستان نیز یکی از عوامل مهم گرمایش محیط بیرون از ساختمان‌ها است [۴۳]. این عامل به صورت چرخه‌ای بی پایان است. هر چه دمای محیط بیرون از ساختمان، افزایش یابد، استفاده از این دستگاه‌ها نیز افزایش یافته و موجب گرمایش بیشتر محیط شده است. یکی دیگر از عوامل ایجاد پدیده جزایر گرمایش شهری، ساختمان‌های بلند مرتبه است که مانعی در راستای حرکت باد در شهرها است [۴۴، ۲۲]. ایجاد اختلال در مسیر حرکت باد، باعث عدم عبور هوای تازه و ایجاد جزایر گرمایش شهری شده است [۴۵]. این عوامل در شکل ۲ نشان داده شده است.

اندازه، شکل (مصالح، هندسه و فضای سبز)، عملکرد (مصرف انرژی، مصرف آب، آلودگی)، مکان جغرافیایی (شرایط آب و هوایی، توپوگرافی و حومه های شهری)، زمان (در طول روز و در فصول مختلف) و هواشناسی (میزان باد و ابرها) در تغییرات پدیده جزایر گرمایش شهری موثر است. در شکل ۳، عوامل موثر در پدیده جزایر گرمایش شهری مشخص شده است. همچنین خلاصه ای از تحقیق‌های انجام شده در راستای شناخت عوامل ایجاد یا تشدید پدیده جزایر گرمایش شهری در جدول ۱ نشان داده شده است.

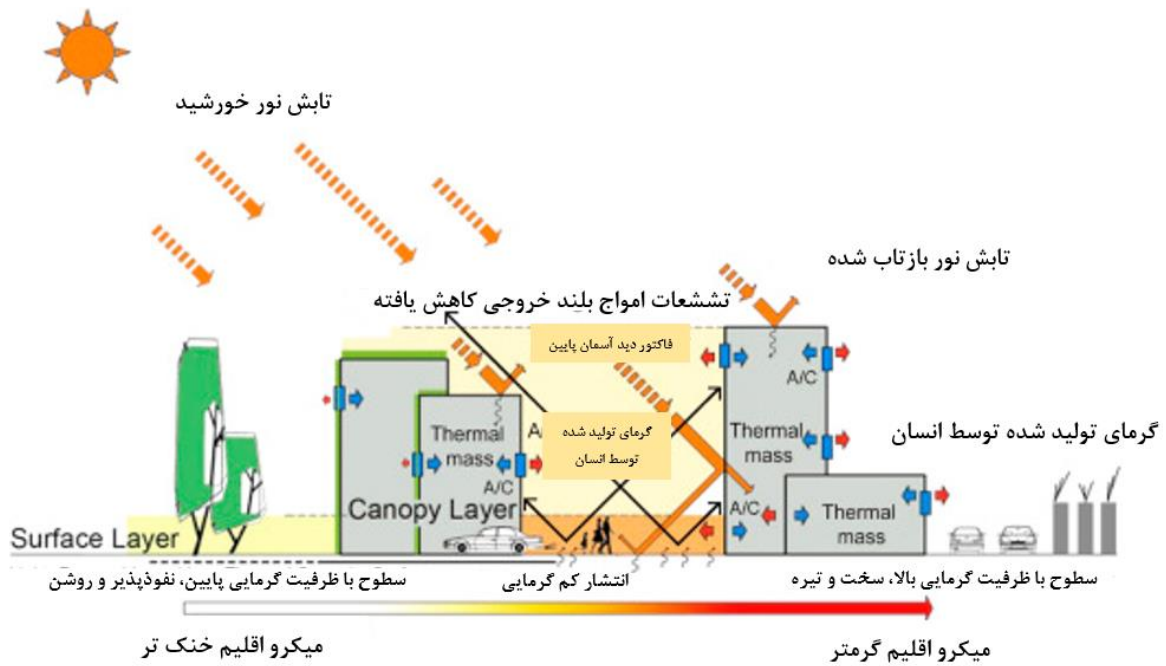
استفاده از مواد با نفوذپذیری پایین [۱۴]، از جمله مهم‌ترین دلایل ایجاد جزایر گرمایش شهری است [۱۵].

این پدیده اثرات مخربی بر سلامت انسان و محیط زیست به همراه داشته است. بر اساس تحقیقات انجام شده، افزایش دمای شهرها باعث رشد گرمایش شهری و طولانی‌تر شدن تابستان‌ها شده است [۱۶]. افزایش دمای مناطق شهری در تابستان منجر به افزایش نرخ مرگ و میر شده است. از جهت دیگر، نرخ رشد مرگ و میر ناشی از سرما در زمستان به دلیل افزایش دما در اثر پدیده گرمایش شهری، کاهش یافته است [۱۷-۱۹]. با توجه به مطالعات انجام شده، نرخ رشد مرگ و میر ناشی از گرمای بیش از حد، بیشترین آمار را بین مرگ و میر مرتبط با آب و هوا به خود اختصاص داده است [۱۹، ۲۰].

جزایر گرمایش شهری با تشدید تمرکز آلودگی‌ها در محیط‌های شهری، تشکیل ابر، تغییر ساختار باد، افزایش رطوبت و تغییر نرخ تبخیر، باعث تغییر آب و هوای مناطق شهری شده است [۲۱، ۲۲]. پدیده گرمایش شهری به آب و هوای مناطق شهری بستگی دارد و عدم وجود باد یا سرعت کم باد، باعث تشدید این پدیده نامطلوب شده است [۲۳]. در راستای کاهش پدیده جزایر گرمایش شهری و رسیدن به یک طرح بهینه انرژی از روش‌های مختلفی مانند تغییرات در بازتابندگی سطوح، افزایش ضریب دید به آسمان، تغییر نسبت ارتفاع به مساحت کف ساختمان‌ها (حجم ساختمان) و حداکثر نمودن تهویه هوا در مناطق شهری، استفاده شده است [۲۴-۲۶]. در این راستا، استفاده از مواد بازتابنده نور خورشید در سطوح سقف‌ها، کاربرد دیوارهای خنک در نمای سازه‌ها، ایجاد فضای سبز افقی و عمودی و استفاده از روسازی خنک در جاده‌ها از جمله روش‌های کاهش دمای مناطق شهری و کاهش پدیده جزایر گرمایی شهری بوده است [۲۷-۲۹]. روسازی خنک، کاربرد مصالح و فناوری‌های جدید و تغییر روش طرح روسازی است زیرا کاهش قابلیت جذب حرارت، منجر به خنک سازی سطح رویه روسازی و هوای پیرامون راه‌های مناطق شهری شده است [۳۰-۳۳].

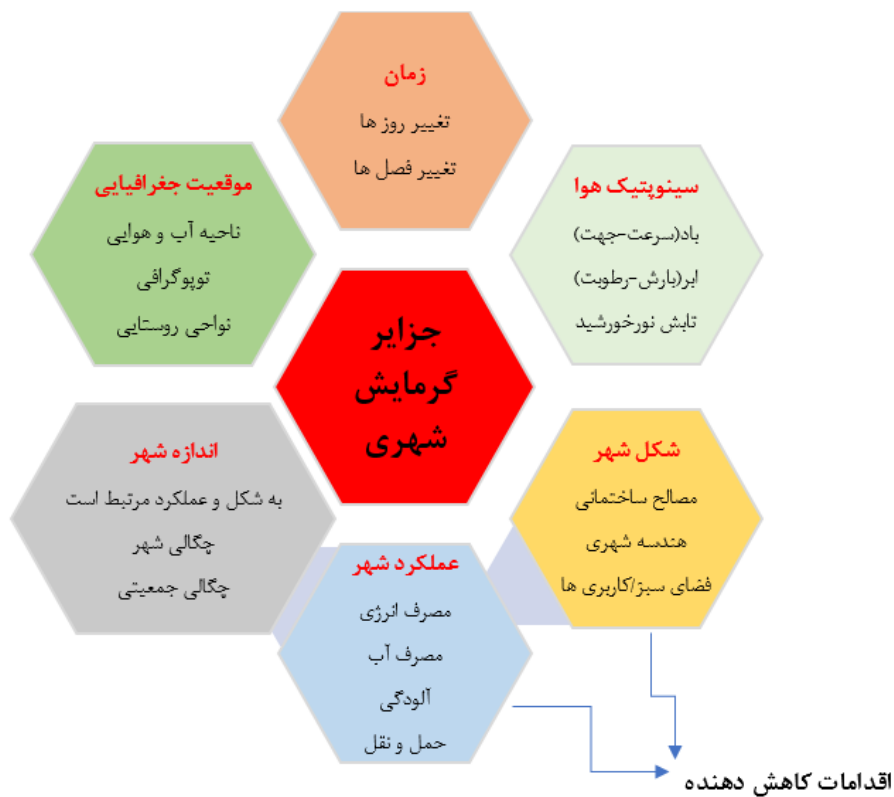
۲- عوامل ایجاد جزایر گرمایی شهری

توسعه و رشد جمعیت شهرها، کاهش و حذف پوشش گیاهی و استفاده از مواد با پتانسیل بالای جذب گرما و قدرت بازتابندگی پایین، از عوامل اصلی تشکیل پدیده نامطلوب گرمایش شهری است [۳، ۹]. شهرسازی، فعالیت‌های شهری، استفاده از مواد مصنوعی و تغییر کاربری زمین‌های طبیعی، دلایل اصلی ایجاد این پدیده نامطلوب است [۳۴-۳۸]. مواد ساخته شده توسط بشر



شکل ۲. بازتاب اشعه خورشید و محبوس شدن گرما در دره‌های خیابانی [۴۶]

Fig. 2. Reflection of the sunlight and trapping of heat in the Street valleys [46]



شکل ۳. عوامل موثر بر جزایر گرمایی شهری [۳۴، ۳۸، ۴۷، ۴۸]

Fig. 3. Effective factors on urban heat islands [34, 38, 47, 48]

جدول ۱. عوامل ایجاد یا تشدید پدیده جزایر گرمایش شهری

Table 1. Factors causing or intensifying the phenomenon of urban heat island

عوامل ایجاد یا تشدید پدیده جزایر گرمایش شهری	سال	مرجع
استفاده از مواد مصنوعی تیره، کاهش پوشش گیاهی، افزایش تقاضای انرژی برای خنک سازی	2001	[۳۵]
شهرسازی، ساختمان‌های بلند مرتبه و دره‌های خیابانی	2002	[۳۹]
اندازه شهر، تراکم جمعیت، فعالیت‌های صنعتی، میزان زمین‌های دچار تغییر کاربری	2006	[۳]
خصوصیات متفاوت دمایی و تابشی مواد مصنوعی در مقایسه با پوشش‌های طبیعی، فعالیت‌های صنعتی	2006	[۲۲]
کاهش قابلیت انعکاس سطوح، کاهش پوشش گیاهی	2008	[۴۰]
شهرسازی و صنعتی شدن، افزایش ظرفیت گرمایی ساختمان‌ها با افزایش جرم آن‌ها، دره‌های خیابانی، خصوصیات دمایی نامطلوب سطوح مصنوعی، تولید گازهای گلخانه‌ای	2008	[۴۴]
تغییر خصوصیات دمایی و تابشی سطوح	2011	[۴۱]
شهرسازی و تغییر خصوصیات دمایی سطوح	2011	[۴۳]
صنعتی شدن، مهاجرت از روستا به شهر و افزایش تراکم شهرها، استفاده از مواد مصنوعی تیره با قابلیت انعکاس کم، کاهش پوشش گیاهی،	2012	[۳۸]
کاهش قابلیت انعکاس سطوح	2012	[۴۲]
قابلیت انعکاس کم مواد مصنوعی استفاده شده در پوشش راه‌ها و ساختمان‌ها	2014	[۳۶]
افزایش نرخ شهرسازی، تغییر خصوصیات دمایی و تابشی سطوح، کاهش پوشش گیاهی، ساختمان‌های بلند مرتبه، فعالیت‌های شهری	2015	[۴۵]
گسترش شهرها، کاهش پوشش گیاهی، کاهش قابلیت انعکاس سطوح	2016	[۳۷]
شهرسازی، گسترش شهرها، افزایش جمعیت، کاهش پوشش گیاهی، افزایش استفاده از مواد مصنوعی، افزایش تقاضای انرژی برای خنک سازی	2017	[۳۴]
شهرسازی و فعالیت‌های شهری، سطوح با قابلیت انعکاس کم، ساختمان‌های بلند مرتبه، آب و هوای گرم	2020	[۹]

۳- تاثیرات مخرب پدیده جزایر گرمایش شهری

گرمایش شهری پدیده‌ای نامرئی است که پیامدهای جبران ناپذیری بر سلامت انسان‌ها داشته است [۴۹]. دمای بالاتر مناطق شهری در مقایسه با مناطق پیرامون شهرها، پیامدهای جبران ناپذیری بر سلامت و رفاه ساکنین شهرها به همراه داشته است [۳۴]. از جمله اثرات مخرب پدیده جزایر گرمایش شهری در فصل تابستان می‌توان به مصرف بیشتر انرژی جهت خنک‌سازی ساختمان‌ها، افزایش آلودگی هوا، بالا رفتن دمای محیط و به خطر افتادن سلامت جامعه اشاره کرد.

افزایش دمای محیط‌های شهری، تاثیرات مخربی بر بخش‌های سلامت، اقتصاد و محیط زیست داشته است. با افزایش دمای محیط، سرعت واکنش شیمیایی ذرات آلاینده موجود در اتمسفر افزایش یافته و باعث آلودگی بیشتر هوا و بروز مشکلاتی برای عابرین پیاده شده است [۵۰]. تماس رواناب‌های سطحی با سطوح گرم نظیر آسفالت و پوشش‌های قیری، باعث افزایش دمای آب شده است. این رواناب‌هایی گرم با ورود به رودها بر سلامت و تولید مثل جانوران آبی تاثیر منفی داشته است [۵۱].

همچنین تفاوت دمایی شهرها نسبت به مناطق روستایی باعث شده است که استفاده از داده‌های آب و هوایی در راستای بررسی راندمان انرژی مصرفی ساختمان‌ها، دارای دقت مناسب نباشد [۵۲]. پدیده جزایر گرمایش شهری می‌تواند افزایش ۱۰ تا ۱۶ درصدی مصرف انرژی در شهرهای دارای سیستم سرمایشی در تابستان را به همراه داشته باشد.

طی مطالعه‌ی انجام شده در کشورهای اروپایی، به ازای هر درجه افزایش دما در تابستان، در شهرهای دارای آب و هوای گرم، مصرف انرژی ۱/۶۶۰ درصد و در شهرهای دارای آب و هوای معتدل ۰/۵۴۲ درصد افزایش یافته است [۳۱، ۵۳، ۵۴]. پدیده جزایر گرمایش شهری در مناطق مدیترانه‌ای، مصرف انرژی در راستای خنک‌سازی ساختمان‌ها را در حومه شهرها، ۱۲ درصد و در مرکز شهرها تا ۴۶ درصد افزایش داده است [۵۵].

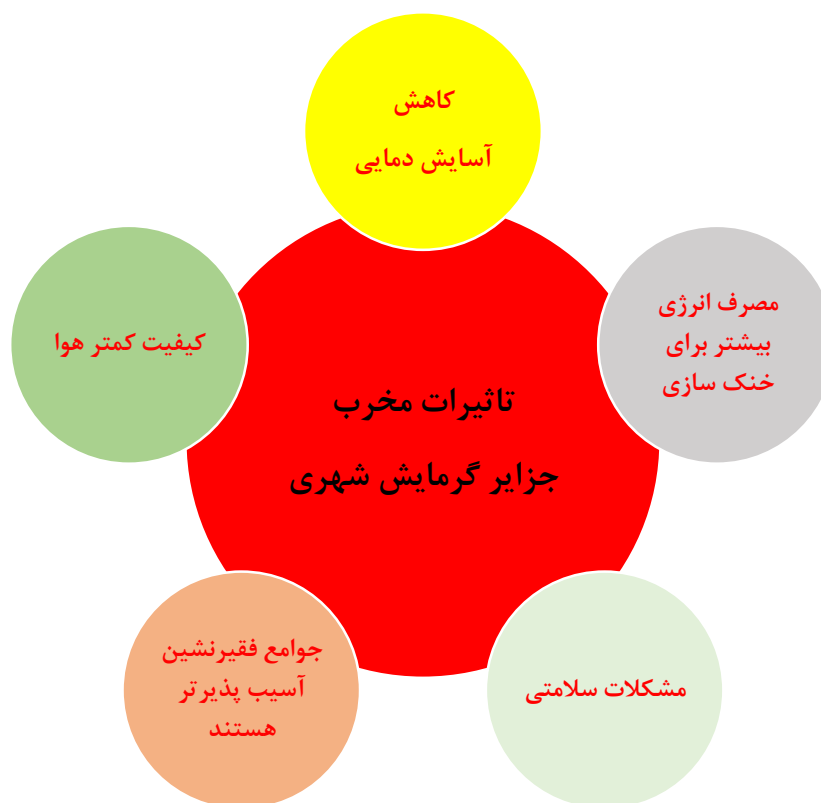
استفاده از مصالح با ضریب انعکاس پایین در ساختمان‌ها و جاده‌ها باعث جذب گرمای اشعه خورشید، محبوس شدن گرما بین ساختمان‌ها و افزایش دمای شهرها شده است. فیضی زاده با مطالعه این پدیده در شهر تبریز، افزایش آلودگی هوا در مناطق تحت تاثیر این پدیده مخرب را مورد بررسی قرار داد [۵۶]. جزایر گرمایش شهری با تغییر ساختار مسیر حرکت بادهای محلی، باعث تمرکز آلودگی هوا در مراکز شهرها شده است [۵۷].

گسترش این پدیده مخرب، باعث مصرف بیشتر منابع انرژی در راستای خنک‌سازی ساختمان‌ها شده است. این موضوع، آسیب پذیر شدن جمعیت شهری نسبت به موج گرما را به دنبال داشته است [۵]. بر اثر شهرسازی سریع در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰، مصرف انرژی ۱۴ درصد افزایش داشته است [۴۵]. بر اساس تحقیقات انجام شده در چین، مشخص شد که دمای هوا در نزدیکی سطح زمین در فصل زمستان، ۰/۰۵ درجه سانتی‌گراد در هر دهه افزایش داشته است [۵۸].

افزایش مصرف انرژی در فصول گرم سال به علت استفاده از دستگاه‌های سرمایشی یکی از اثرات مخرب تشکیل پدیده جزایر گرمایش شهری است [۵۹-۶۱]. با وجود اثرات منفی این پدیده بر مصرف انرژی در تابستان، به دلیل بالا رفتن حداقل دما در زمستان، انرژی مصرفی برای گرمایش ساختمان‌ها می‌تواند کاهش یابد [۵۹]. تاثیرات این پدیده بر مصرف انرژی به صورت نسبی است؛ در زمستان با مصرف کمتر انرژی برای گرمایش ساختمان‌ها و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، شاهد اثرات مثبت این پدیده هستیم اما این پدیده در فصل تابستان اثرات به شدت مخربی بر محیط زیست، سلامت جامعه و اقتصاد دارد. در شکل ۴، تاثیرات مخرب این پدیده مشخص شده است.

مطالعات نشان داده است که باید برای مقابله با پدیده مخرب جزایر گرمایش شهری و تبعات آن، مسائلی مانند حفاظت، احیا و توسعه طبیعت شهری، توسعه پشت بام‌ها و دیوارهای سبز، اصلاح ریخت‌شناختی شهری و طراحی مناسب شهری جهت دستیابی به کریدورهای تهویه هوا مورد توجه ویژه‌ای قرار گیرند. بر اساس تحقیقات برومند و همکاران، دمای بسیاری از مناطق شهری در محدوده بالاتر از حد نرمال قرار می‌گیرند در حالیکه دمای مناطق غیرمسکونی با حجم فضای سبز بیشتر به طور محسوسی کمتر از مناطق شهری است. این امر نشان دهنده اهمیت استفاده از فضای سبز در شهرسازی و کاهش اثرات مخرب جزایر گرمایش شهری است [۶۲].

بر اساس نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته برای شهر تهران توسط فربودی و زمانی، در مدل بهبود یافته دارای فضای سبز، مصالح نفوذپذیر و آب، دما تا ۴ سانتی‌گراد کاهش، رطوبت نسبی تا ۱۰ درصد افزایش، دمای تابش تا ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. همچنین غلظت دی‌اکسید کربن کاهش یافته است [۶۳].



شکل ۴. تاثیرات مخرب پدیده جزایر گرمایش شهری

Fig. 4. The destructive effects of the urban heat island phenomenon

و پیمایشی استفاده شده است. در روش ثابت، سنسورهای اندازه گیری در محل سایه و در ارتفاع حدود ۱/۳ متری سطح زمین نصب می‌شوند و باید به موقعیت سنسورها توجه ویژه‌ای داشت تا مناطق مورد نظر را به طور کامل تحت پوشش قراردهند.

در روش پیمایشی، با نصب این سنسورها بر روی خودرو و حرکت در سطح شهر، سنجش جزایر گرمایش شهری انجام شده است. در این روش باید چند نکته مهم را در نظر گرفت. به علت تغییر دما در طول زمان، داده‌ها باید اصلاح شوند. فرض خطی بودن تغییر دما بر حسب زمان نمی‌تواند فرض مناسبی باشد. سرعت خودرو هنگام نمونه گیری باید در محدوده مناسبی باشد تا نمونه گیری دچار خطا نشود. همچنین تاثیر گرمای موتور و آگزوز خودرو بر سنسورها باید به وسیله حفاظ مناسب خنثی شود. روش پیمایشی نسبت به روش ثابت دارای خطای بیشتری بوده و به نکات بیشتری باید توجه داشت.

۴- روش‌های سنجش جزایر گرمایی شهری

میزان گرمایش اندازه گیری شده به محل ایستگاه‌های هواشناسی واقع در داخل و خارج شهر وابستگی داشته و کد ارتفاعی ایستگاه‌های خارج شهر باید با کد ارتفاعی شهر مورد مطالعه، یکسان باشد. عدم مشابهت کد ارتفاعی ایستگاه‌های سنجش دما، تناقض نتایج را به دنبال خواهد داشت. به طور مثال، ایستگاه‌های واقع در شهرهای سانو و ایسوزاکی به ترتیب دارای اختلاف ارتفاع ۳۳ و ۶۷ متری هستند که این اختلاف ارتفاع به ترتیب باعث ایجاد اختلاف دمایی ۰٫۲ و ۰٫۴ درجه سانتی گراد شده است [۶۴، ۶۵]. روش سنجش جزایر گرمایش شهری بر اساس موقعیت مکانی و روش مشاهده این پدیده قابل تعیین است [۸].

هوا را می‌توان به دو لایه تاج پوش شهر (از سطح زمین تا خط میانگین ارتفاع ساختمان‌ها و درخت‌ها) و لایه مرزی (بالای لایه تاج پوش شهر) تقسیم کرد. در راستای سنجش دما در لایه تاج پوش شهر، از دو روش ثابت

کامل‌تری از وضعیت گرمایش مناطق شده است [۶۲].

۴-۱- ضریب بازتابش خورشیدی (SR) و نحوه محاسبه آن

پارامترهایی از مشخصات سطح روسازی بر تغییرات دمای هوای پیرامون سطح روسازی تاثیرگذار است. برخی از این پارامترها عبارتند از میزان بازتابش خورشید، نفوذپذیری، انتقال حرارتی و ضخامت لایه رویه روسازی. ضریب بازتابش خورشیدی یا توان بازتاب به صورت نسبت انرژی خورشیدی منعکس شده از سطح جسم به کل انرژی خورشیدی تابیده شده به آن تعریف می‌شود که با عددی بین ۰ تا ۱ معرفی شده است [۶۸]. هر چه این عدد به ۱ نزدیک‌تر باشد، قدرت انعکاس سطح بیشتر و دمای جسم کمتر است [۶۹]. به طور معمول سطوح سقف ساختمان‌ها دارای ضریب بازتاب ۰,۰۵ تا ۰,۰۵، برای رنگ مشکی و ۰,۰۸ تا ۰,۵ برای سطوح فلزی) و مواد خنک دارای ضریب بازتاب بالاتر از ۰,۶۵ می‌باشند [۷۰].

$$SI = \frac{\text{Solar Energy Globally Reflected}}{\text{Total Incident Solar Energy}} \quad (1)$$

در جدول ۲، چند نمونه از میزان ضریب بازتابش خورشید برای چند ماده نشان داده شده است. ضریب بازتابش سطوح دارای ضریب بازتابش بالاتر بر خلاف سطوح دارای ضریب بازتابش پایین‌تر، در طول عمر خود، کاهش می‌یابد. این کاهش در مناطق گرم و مرطوب، ۲ تا ۳ برابر مناطق گرم و خشک است. در بررسی بر اساس نوع محصول (شامل روکش‌های کارخانه‌ای،

طی تحقیق انجام گرفته در شهر میلان، پدیده جزایر گرمایش شهری در لایه تاج پوش در زمان شب، باعث افزایش میانگین ۳ تا ۴ درجه سانتی‌گرادی دما شده است. حداکثر افزایش دما ۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. در لایه مرزی از سه روش ثابت، پیمایشی و از راه دور برای اندازه‌گیری جزایر گرمایش شهری میتوان استفاده کرد. در روش ثابت، سنسورها روی برج‌ها نصب شده که این سنسورها باید دارای فاصله کافی از برج باشند تا اندازه‌گیری از دقت مناسب برخوردار باشد. همچنین می‌توان از بالن‌های هواشناسی متصل و جدا استفاده کرد که این بالن‌ها پروفیل دمایی منطقه مورد بررسی را در اختیار محققین قرار می‌دهند. بالن‌ها محدودیت‌هایی از قبیل باد، طوفان و هوانوردی دارند. برای تشخیص این پدیده به حداقل ۲ سنسور روی برج یا بالن نیاز است. در روش پیمایشی در لایه مرزی از سنسورهای نصب شده روی هواپیماها استفاده می‌شود. در روش از راه دور از سنسورهای تشخیص صدای محیط استفاده می‌شود.

برای ارزیابی پدیده جزایر گرمایش شهری، از روش‌های از راه دور و سنسورهای تشخیص اشعه فرو سرخ برای اندازه‌گیری دمای سطوح استفاده می‌شود. بسته به نیاز می‌توان از ماهواره، هواپیما و سنسورهای در سطح زمین استفاده کرد. جهت اعتبار سنجی داده‌های ماهواره‌ها از داده‌های سنسورهای در سطح زمین استفاده می‌شود [۶۶]. با کاربرد روش از راه دور در مناطقی دارای تعداد کم ایستگاه‌های هواشناسی، سنجش دمای هوا با دقت بالاتری انجام شده است. بین دمای سطح زمین و هوای بالای آن ارتباط مستقیمی وجود دارد [۶۷]. همچنین استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در بازه‌های زمانی طولانی و استفاده همزمان از داده‌های چند ماهواره منجر به تحلیل‌های

جدول ۲. مقایسه ضریب بازتاب خورشید برای چند ماده

Table 2. Comparison of solar reflectivity for several materials

ضریب بازتابش خورشیدی (SR)	ماده
۰/۰۴ تا ۰/۰۶	روسازی آسفالتی مشکی
۰/۳ تا ۰/۴۵	روسازی آسفالتی با روکش سفید
۰/۱۲ تا ۰/۲	دال بتنی خاکستری
۰/۷ تا ۰/۷۷	دال بتنی سفید
۰/۷۵ تا ۰/۷۵	سنگ مرمر سفید
۰/۲ تا ۰/۴	سنگ مرمر تیره

بیشتر روسازی‌های متعارف از نوع بتن نفوذ ناپذیر و آسفالتی است که در تابستان به حداکثر دمای ۴۸ تا ۶۷ درجه سانتی گراد می‌رسد.

این روسازی‌ها گرما را ذخیره و باعث انتشار گرما در شب می‌شوند. همچنین گرمای موجود در روسازی می‌تواند باعث گرم شدن رواناب‌های سطحی شود. این پدیده باعث ایجاد جزایر گرمایش شهری شده و کیفیت آب را هم تحت تاثیر قرار می‌دهند [۸۰]. میزان تاثیر روسازی در گرمایش شهری به متغیرهایی مانند مقدار ضریب انعکاس، تشعشع، ضریب انتقال حرارتی، ظرفیت گرمایی و میزان نفوذپذیری روسازی بستگی دارد.

در حالت کلی، مقدار ضریب انعکاس مواد بر اساس رنگ و سختی سطح آن‌ها اندازه گیری می‌شود. رنگ‌های روشن دارای جذب گرمای خورشید کمتری بوده، در حالیکه جذب طیف فرورسرخ ناشی از تابش خورشید، به رنگ ماده بستگی ندارد. همچنین مصالح دارای سطوح صیقلی، دمای پایین‌تری نسبت به مصالح با سطوح زبر داشته است [۸۱، ۳۱]. روسازی به دلیل جذب گرمای خورشید، دمای بیشتری نسبت به هوای موجود در بالای خود داشته و شدت این اختلاف دما به میزان بازتابندگی سطح روسازی ارتباط دارد [۳۲]. انتقال گرما در روسازی، نقشی اساسی در دمای روسازی و تشکیل پدیده جزایر گرمایش شهری دارد و در قالب چند مکانیزم مانند همرفت، هدایت، بازتاب و تشعشع قابل انجام است [۷۹، ۸۲]. مکانیزم‌های مختلف انتقال گرما در روسازی راه‌ها در شکل ۵ به صورت خلاصه نشان داده شده است.

بر اساس تحقیقات انجام شده توسط سانتاموریس و همکارانش، دمای سطوح روسازی در رنگ‌های مشکی و سفید تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد با هم اختلاف دما داشته که نشان دهنده تاثیر رنگ در میزان جذب گرما در روسازی است [۸۳]. دمای روسازی با رویه آسفالتی سفید رنگ با ضریب انعکاس ۰/۴۵ نسبت به روسازی با رویه آسفالتی مشکی رنگ و ضریب انعکاس ۰/۰۳، در حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد کمتر تعیین شده است. همچنین دمای حداکثر چهار نوع آسفالت با رنگ‌های زرد، قهوه‌ای روشن (بژ)، سبز و قرمز با ضرایب انعکاس ۰/۲۶، ۰/۳۱، ۰/۱۰ و ۰/۱۱ نسبت به دمای حداکثر آسفالت مشکی رنگ به ترتیب در حدود ۹، ۷، ۵ و ۴ درجه سانتی‌گراد کمتر است [۸۴].

گلدن و کالوش [۸۵] با آزمایش بر رویه‌های متفاوت، تاثیر رنگ روسازی بر کاهش دمای آن را مورد بررسی قرار دادند. روسازی آسفالتی مشکی رنگ با ضخامت کم و زیاد به ترتیب دارای ضرایب انعکاس ۰/۲ و ۰/۱۷ و دمای حداکثر ۶۳/۳ و ۶۲/۸ درجه سانتی‌گراد بود. برای روسازی با رنگ سفید، ضرایب انعکاس ۰/۲۵ و ۰/۲۶ و دمای حداکثر برابر با ۵۸/۳ و ۵۶/۱ سانتی‌گراد به دست آمد.

روکش‌های در محل، فلز، قیر اصلاح شده، ورق‌های پلی‌ممبران و آجر)، محصولات روکش اجرا شده در محل، قیر اصلاح شده و ورق پلی‌ممبران، دارای بیشترین نرخ کاهش SR و فلز و روکش اجرا شده در کارخانه، دارای کمترین نرخ کاهش SR نسبت به زمان است [۷۱].

۴-۲- شاخص انعکاس خورشیدی (SRI) و نحوه محاسبه آن

از بین پارامترهای تاثیرگذار بر دمای پیرامون سطح، بازتابش خورشیدی و انتشار حرارتی در محاسبه شاخص انعکاس خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته است. شاخص انعکاس خورشیدی به صورت نسبت تفاوت دمای سطح مورد آزمایش با دمای سطح با رنگ مشکی به تفاوت دمای سطوح با رنگ‌های مشکی و سفید تعریف شده و به صورت درصد بیان می‌شود [۷۲-۷۴].

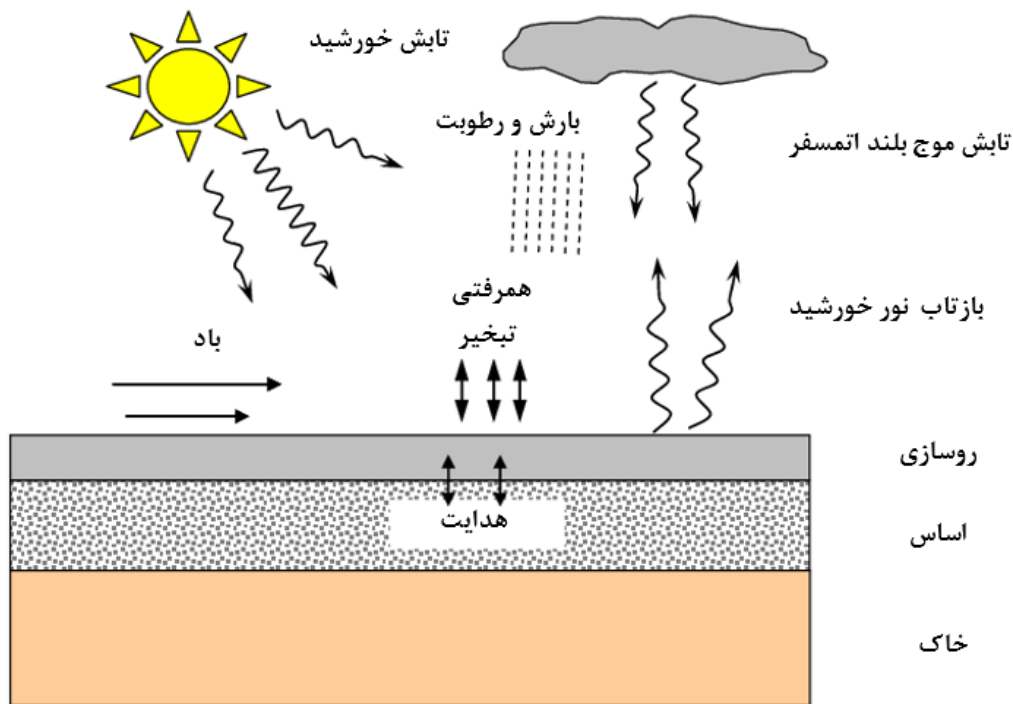
$$SRI = 100 \times \frac{T_{sb} - T_{se}}{T_{sb} - T_{sw}} \quad (2)$$

SRI = شاخص انعکاس خورشیدی (درصد)، T_{sb} = دمای سطح مشکی، T_{sw} = دمای سطح سفید و T_{se} دمای سطح مورد آزمایش است. شاخص انعکاس خورشیدی به عنوان معیاری در سنجش میزان تاثیر مواد بر کاهش پدیده جزایر گرمایش شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ضریب ترکیبی از ضریب بازتاب و گسیلندگی (انتشار) سطح است. با توجه به ثابت بودن میزان گسیلندگی (حدود ۰٫۹) موادی مانند قیر، بتن و سنگدانه، سعی بر افزایش میزان بازتاب سطح برای دستیابی به میزان بالاتر SRI است [۷۵، ۷۶].

۵- روسازی و نقش آن در پدیده جزایر گرمایش شهری

حدود ۹۰ درصد از گرمایش مناطق شهری به دلیل کاربرد مصالح جاذب گرما است که تمایل دارند گرما را در خود نگه دارند. تنها ۱۰ درصد از گرمایش شهری به دلیل فعالیت کارخانه‌ها، وسایل نقلیه و ساختمان‌ها است [۷۷]. ۲۹ تا ۴۵ درصد سطوح شهری توسط روسازی‌ها پوشانده شده است در نتیجه، روسازی تاثیر ویژه ای مهمی در تشکیل جزایر گرمایی شهری داشته است [۷۸].

روسازی‌های آسفالتی پتانسیل جذب گرمای بیشتری نسبت به سطوح طبیعی داشته، به همین دلیل گرمای بیشتری به اتمسفر منتقل کرده و باعث تشکیل جزایر گرمایش شهری شده است [۷۹]. در ایالات متحده آمریکا،



شکل ۵. مکانیزم های انتقال گرما در روسازی راهها

Fig. 5. Heat transfer mechanisms in road pavements

ضریب انعکاس تنها عامل تاثیرگذار بر درجه حرارت سطح روسازی نبوده و ظرفیت گرمایی و ضخامت روسازی نیز نقش مهمی در درجه حرارت حداکثر سطح روسازی داشته است.

بر اساس تحقیقات ویجیسکرا و همکاران در سال ۲۰۱۲، پروفیل دمایی ثبت شده روسازی در طول ۷ روز، اختلاف دمایی ۱۰ درجه سانتی گراد را بین اعماق ۵ و ۳۰ سانتی متری نشان داده است. این اختلاف دما بیانگر قابلیت جذب بالاتر گرما توسط لایه قیری در مقایسه با سایر لایه‌ها در طول روز است. هر چه ضخامت لایه قیری بیشتر باشد، گرمای بیشتری در آن ذخیره شده و در طول شب به هوا منتشر می شود [۸۶، ۸۷].

لی و همکاران با بررسی روسازی آسفالتی نفوذپذیر در شرایط خشک و خیس در ۷ روز آزمایش نشان دادند که دمای هوای نزدیک به سطح رویه روسازی، در حدود ۰/۲ تا ۰/۴۵ درجه سانتی گراد، دمای هوای سطح زیرین روسازی، در حدود ۱/۲ تا ۱/۶ درجه سانتی گراد و دمای هوای لایه‌های کاهش یافته است [۸۸]. این کاهش دما، نشان دهنده تاثیر روسازی‌های

همچنین برای روسازی آسفالتی دارای خرده‌های پلاستیک با ضخامت‌های کم و زیاد، ضرایب انعکاس به ترتیب برابر با ۰/۱۲ و ۰/۱۳ و دمای حداکثر برابر با ۶۷/۲ و ۶۶/۷ درجه سانتی گراد بود در حالی که برای روسازی با رنگ سفید، ضرایب انعکاس برابر با ۰/۱۲ و ۰/۲۶ و دمای حداکثر برابر با ۶۵ و ۵۱/۱ درجه سانتی گراد به دست آمد.

با توجه به نتایج، نمونه روسازی بتنی دارای خرده‌های پلاستیک با ضخامت کم و دانه بندی باز دارای کمترین ضریب انعکاس (۰/۱۲) و بیشترین درجه حرارت (۶۷ درجه سانتی گراد) و نمونه روسازی بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی متر دارای بیشترین ضریب انعکاس (۰/۴۶) و کمترین درجه حرارت (۵۱/۱ سانتی گراد) است. این نتایج، نشان دهنده نرخ وابستگی دما به ضریب انعکاس برابر با ۴/۷- کلوین به ازای هر ۰/۱ افزایش ضریب انعکاس است. این نرخ در نمونه آسفالتی دارای خرده‌های پلاستیک با رنگ سفید، ۱۲/۳- کلوین به ازای هر ۰/۱ افزایش ضریب انعکاس است. همچنین ضریب انعکاس این نمونه نسبت به نمونه بتنی ۰/۲ کمتر، ضخامت آن برابر نیمی از ضخامت نمونه بتنی و چگالی آن نیز کمتر است. مشخص شد که

گرما توسط آب موجود در روسازی جذب شده و با تبخیر آن، به خنک سازی روسازی کمک می شود [۹۳، ۹۴]. افزایش ضریب بازتاب روسازی، نتایج مطلوبی نظیر کاهش دمای محیط پیرامونی، کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها و کاهش آلودگی شهرها را به همراه داشته باشد. در کنار مزایای این روسازی‌ها، آلودگی ناشی از تولید، اجرا و نگهداری این روسازی‌ها نیز باید مورد بررسی قرار گیرد [۹۵].

تحقیقات نشان داد که استفاده از دیوار، سقف و روسازی با ضریب انعکاس بیشتر منجر به کاهش ۳ درجه سانتی گراد دمای هوا شده است [۹۶]. استفاده از روسازی خنک در ایالت کالیفرنیا منجر به کاهش ۰/۹ درجه سانتی گراد دمای هوای شهر شده است [۹۷]. همچنین در لس آنجلس با افزایش ضریب انعکاس روسازی از ۰/۱ به ۰/۳۵، دمای هوا در حدود ۰/۶ درجه سانتی گراد کاهش یافته است [۹۸]. در خیابان‌هایی که نسبت ارتفاع ساختمان به عرض خیابان بیش از ۱ می باشد، استفاده از روسازی‌های خنک باعث بازتاب اشعه خورشید و محبوس شدن آن بین ساختمان‌ها شده است [۹۳]. کاربرد مصالح با ضریب بازتاب بیشتر در نمای ساختمان‌ها می‌تواند منجر به کاهش ۱۰ تا ۷۰ درصدی مصرف انرژی در راستای خنک سازی ساختمان گردد. اگرچه بر اثر کثیف شدن نما و کم شدن ضریب انعکاس آن، میزان مصرف انرژی نسبت به حالت اولیه افزایش می‌یابد و با شستشوی نما می‌توان این مشکل را تا حدودی برطرف کرد [۹۹]. این مشکل در روسازی راه نیز بر اثر ترافیک وارد به روسازی و پیرشدگی آن به وجود می‌آید که با انجام بهسازی‌هایی مانند چپ سیل، اسلاری سیل و روکش، برطرف خواهد شد. روکش علاوه بر بهبود سازه‌ای روسازی، با بهبود وضعیت راه به کاهش مصرف سوخت و راحتی سرنشینان خودروها نیز کمک می‌کند [۹۹-۱۰۱]. همچنین در راستای کاهش دمای روسازی، عوامل متعدد دیگری نیز در خنک سازی روسازی قابل بررسی است [۸۰]. نرخ انتقال حرارت روسازی به هوای مجاور آن، به سرعت و دمای هوای عبوری، سختی سطح روسازی و مساحت روسازی در معرض هوا وابسته است. برخی از روسازی‌های نفوذپذیر دارای سطح سخت‌تری نسبت به روسازی‌های مرسوم هستند که باعث افزایش سطح موثر روسازی می‌شود. افزایش سطح موثر روسازی باعث افزایش نرخ انتقال حرارت، خنک سازی روسازی و کاهش بازتابندگی خالص روسازی شده است. ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی، ضخامت و موقعیت روسازی در تغییر این پدیده موثر است. تحقیقات نشان داده است که کاربرد روسازی با ضریب انعکاس بالا، دمای روسازی را در اعماق مختلف روسازی کاهش داده است و اگرچه در طول روز، شدت گرمای خروجی از

نفوذپذیر در کاهش پدیده مخرب جزایر گرمایش شهری است. همچنین عبور دادن آب باران از روسازی یا آب به کاررفته در آبیاری گیاهان می‌تواند باعث کاهش دمای روسازی و هوای پیرامون آن شود.

افزایش دمای هوا در مناطق شهری بر اثر تغییر پوشش سطوح و کاهش پوشش گیاهی ایجاد شده است. استفاده از مصالح تیره در ساختمان‌ها و روسازی باعث جذب و محبوس شدن بیشتر گرمای خورشید و افزایش دمای سطح و هوای محیط شده است. این امر بر آسایش ساکنین شهر و مصرف انرژی ساختمان‌ها تاثیر ناخوشایندی داشته است [۸۹، ۹۰].

۶- روسازی خنک با رویکرد استفاده از رویه های انعکاسی

روسازی راه‌ها با پوشش ۴۰ درصدی ساختار شهری، نقش مهمی در زمینه ساختار شهری و کاهش پدیده گرمایش شهری داشته است [۸۸]. یکی از روش‌های کاهش این پدیده، کاربرد روسازی خنک است. در روسازی‌های خنک با استفاده از مواد افزودنی، روکش‌ها و طراحی بهینه لایه‌های روسازی، جذب گرما توسط روسازی، کاهش یافته که منجر به کاهش پدیده گرمایش شهری شده است [۷۶، ۷۷]. در این روش، با استفاده از افزایش نفوذپذیری و ضریب بازتاب روسازی، دمای سطح روسازی کاهش یافته است [۷۴، ۸۹، ۹۰]. در مطالعات زیادی بر دمای سطح روسازی خنک تمرکز شده است با اینکه گرمای محسوس انتشار یافته از روسازی به هوای اطراف نیز دارای اهمیت بالایی است. اگر ظرفیت گرمایی روسازی بیشتر شود تا گرمای بیشتری را در خود جذب کند ممکن است در روز مناسب بوده و گرمای کمتری را به هوای اطراف منتقل سازد اما این رویکرد باعث اثر منفی در زمان شب خواهد شد، زیرا گرمای دریافتی را در شب به هوای اطراف منتقل ساخته و باعث افزایش دمای هوا می‌شود. بنابراین در طراحی روسازی‌های خنک باید به تغییرات ظرفیت گرمایی آن توجه لازم را داشت [۹۱]. روسازی آسفالتی تازه به دلیل پوشش سنگدانه‌ها توسط قیر دارای ضریب انعکاس ۰/۰۵ است با اینکه ضریب انعکاس روسازی آسفالتی پیر شده با مشخص شدن سنگدانه‌ها به ۰/۱۵ می‌رسد، همچنین روسازی بتنی دارای ضریب انعکاس ۰/۲۵ می‌باشد [۹۲]. در روسازی‌های دارای ضریب انعکاس بالاتر، گرمای کمتری جذب می‌گردد، به طوری که به ازای هر ۰/۱ افزایش ضریب انعکاس، دمای روسازی ۶ درجه سانتی گراد کاهش خواهد یافت. روسازی‌های متداول آسفالتی و بتنی را می‌توان با استفاده از موادی مانند قیر رنگی، روکش رنگ روشن و کوبیدن سنگدانه‌های روشن به روسازی با قابلیت انعکاس بالاتر تبدیل کرد. در روسازی‌های دارای نفوذپذیری بالاتر،

روسازی افزایش می‌یابد، در طول شب گرمای کمتری از روسازی به هوای بالای آن منتقل می‌شود که خود باعث کاهش پدیده جزایر گرمایش شهری شده است. استفاده از روسازی های خنک در خیابان‌های با ترافیک کم، موثر بوده است. این نوع روسازی در خیابان‌های احاطه شده توسط ساختمان‌های بلند اثربخشی مناسبی نداشته است.

کاربرد روسازی با هدایت حرارتی بالا در هر دو نوع خیابان‌های باز و احاطه شده توسط ساختمان‌های بلند، موثر واقع شده است. استفاده از مواد دارای هدایت حرارتی بالا در سطح و اساس روسازی، کاهش حداکثر شدت خروجی گرما از روسازی را به همراه داشته است در حالی که استفاده از مواد دارای هدایت حرارتی پایین در سطح روسازی باعث کاهش میانگین دمای روسازی خواهد شد [۱۰۲]. در خیابان‌هایی که نسبت ارتفاع ساختمان‌های پیرامون راه به عرض خیابان، بیش از یک باشد، میتوان از روسازی جاذب انرژی خورشیدی استفاده کرد. از این روسازی می‌توان برای گرم کردن آب در زیر سطح روسازی و تولید برق استفاده کرد. برای انتقال بیشتر حرارت و افزایش دمای آب میتوان از سنگدانه‌هایی با ضریب هدایت حرارتی بالا مانند کوارتز، پودر مس و رنگ‌های جاذب گرما و دارای ضریب انعکاس کم استفاده کرد [۱۰۳]. جذب حرارت توسط روسازی در تابستان در روز به ۴۰ مگاژول بر متر مربع رسیده است [۱۰۴، ۱۰۵]. با استفاده از سلول‌های خورشیدی، اشعه‌های خورشید را می‌توان به الکتریسیته تبدیل کرد. مقدس نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۷ با ساخت دو نمونه صفحات خورشیدی و روسازی خورشیدی به بررسی این موضوع پرداختند. نمونه اول (پنل خورشیدی) دارای سلول‌های خورشیدی جاسازی شده در لاستیک و نمونه دوم (روسازی خورشیدی) دارای سلول‌های خورشیدی جاسازی شده در داخل رویه راه است [۱۰۶].

امروز کاربرد رویه‌های بازتابنده نور خورشید در راستای کاهش پدیده جزایر گرمایش شهری در حال افزایش است. این روش به عنوان راهکاری ارزان قیمت با قابلیت کاهش دمای سطح روسازی شناخته می‌شود [۱۰۷]. در شهرها به دلیل سرویس دهی مناسب و هزینه‌های ساخت و نگهداری پایین، معمولاً از روسازی آسفالتی استفاده می‌شود. با پیشرفت دانش و تکنولوژی، روسازی‌های انعکاسی با رنگ روشن نیز می‌توانند افزایش عمر بهره برداری و کاهش هزینه‌ها را به همراه داشته باشند [۱۰۸]. این روسازی‌ها با کاهش جذب گرما میتوانند دمای کمتری نسبت به روسازی‌های متداول داشته باشند. با افزایش بازتابندگی روسازی می‌توان جذب گرمای آن را کاهش داد [۱۰۹]. روسازی‌های انعکاسی تاثیر قابل توجهی بر کاهش دمای سطح

و هوای اطراف راه در طول روزهای گرم داشته است [۶۹، ۱۱۰]. با انجام پاشش رنگ بر روی رویه ی روسازی موجود در راستای افزایش ضریب انعکاس روسازی، ضریب اصطکاک روسازی کاهش یافته که از نظر ایمنی قابل قبول نیست. برای رفع این مشکل میتوان به مخلوط رنگی، مقداری ماسه سیلیسی یا تکه‌های سرامیک افزود تا اصطکاک راه افزایش یابد [۱۰۱]. سنویراتنه و همکاران در سال ۲۰۲۱ با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های دارای رنگ‌های مختلف (قرمز، مشکی و خاکستری) و بافت‌های مختلف (صیقلی، سخت و ناهموار)، تاثیر همزمان رنگ و بافت سطوح بر دمای سطح را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که سطوح قرمز و خاکستری به ترتیب دارای دمای کمتری در حدود ۴/۲ و ۴/۵ درجه سانتی گراد نسبت به سطوح دارای رنگ مشکی هستند. همچنین سطح خاکستری با بافت صیقلی دارای ۲/۶ درجه سانتی گراد دمای کمتری نسبت به سایر بافت‌ها با رنگ خاکستری است. سطح قرمز با بافت ناهموار دارای ۰/۶ درجه سانتی گراد دمای کمتری نسبت به سطح خاکستری با بافت صیقلی است. مشخص شد که در ترکیب رنگ و بافت سطوح، سطح قرمز با بافت ناهموار میتواند نقش بهینه‌تری در کاهش پدیده جزایر گرمایش شهری و اثرات مخرب آن داشته باشد [۱۱۱].

سانتاموریس و کریاکودیس در سال ۲۰۱۶ آزمایشی در راستای ارزیابی روسازی‌های انعکاسی انجام دادند. چند هدف در این آزمایش دنبال شد؛ کاهش جزایر گرمایش شهری، افزایش آسایش حرارتی (شرایط آب و هوایی مانند دما و سرعت باد مطلوب)، اطمینان از ایمنی در رانندگی با پرهیز از درخشندگی نامطلوب در سطح روسازی و کاهش آلودگی هوای ناشی از کارکرد وسایل نقلیه موتوری. در این راستا میتوان از مصالحی استفاده کرد که در بازه فرسوخ پرتو خورشید، دارای بازتاب بیشتری نسبت به بازه قابل مشاهده توسط چشم انسان باشد. در این راستا از دو روکش با ضریب بازتابش خورشیدی (SR) ۰/۳۵ و ۰/۶۶ استفاده شد در حالی که ضریب لایه آسفالتی موجود، برابر با ۰/۰۴ بوده است. نتایج نشان داد که استفاده از این دو روکش در روسازی موجب کاهش حداکثر ۷/۵ درجه سانتی گراد از دمای سطح روسازی و ۱/۵ درجه سانتی گراد از دمای محیط پیرامون راه شده است. اگرچه روکش‌های انعکاسی باعث کاهش دمای روسازی و محیط شده است اما این روکش‌ها برای داشتن حداکثر کارایی، نیاز به نگهداری داشته زیرا بر اثر نشست آلودگی‌های محیطی روی سطح روسازی و اثرات لاستیک خودروها روی روکش، ضریب انعکاس روکش کاهش می‌یابد.

تحقیقات نشان داده است که مواد آسفالتی سرد پس از شستشوی سطح

تحقیقات نشان داد که با افزایش ضریب انعکاس سنگدانه ها از مقدار ۰/۰۵ تا ۰/۲، مقدار دمای سطح راه تا ۹ درجه سانتی گراد کاهش یافته است [۱۱۸]. ضریب انعکاس چپ سیل حدود ۵۷ تا ۷۷ درصد میزان ضریب انعکاس سنگدانه‌های آن است [۱۱۹، ۱۲۰].

۶-۱-۲- استفاده از سیمان سفید در مخلوط بتنی

ضریب انعکاس سیمان سهم زیادی در میزان انعکاس خورشیدی بتن دارد [۹۳]. در تولید سیمان سفید نسبت به سیمان خاکستری انرژی بیشتری مصرف می‌شود. در این راستا میتوان از مواد جایگزینی مانند خاکستر کوره، تیتانیوم دی اکسید، اکسید روی و اکسید آلومینیوم استفاده کرد [۱۰۹، ۱۲۱]. در مخلوط بتنی با کامل شدن فرآیند هیدراتاسیون و تولید هیدروکسید کلسیم در هفته ششم، ضریب انعکاس به حداکثر مقدار خود خواهد رسید [۱۲۲].

بارال و همکاران در سال ۲۰۱۸ با بررسی روسازی‌های شامل سیمان خاکستری، سفید و افزودنی تیتانیوم دی اکسید دریافتند که استفاده از تیتانیوم دی اکسید در روکش بتنی روسازی باعث کاهش مصرف انرژی در راستای خنک سازی در تابستان و افزایش مصرف انرژی گرمایشی در زمستان شده است. این روسازی با افزایش مصرف انرژی در فصول سرد منجر به کاهش سرانه مصرف انرژی به میزان ۹٫۵ کیلووات ساعت در سال شده است. مطابق نتایج، روسازی محتوی سیمان سفید به همراه تیتانیوم دی اکسید دارای بیشترین و روسازی محتوی سیمان خاکستری به همراه تیتانیوم دی اکسید، دارای کمترین تاثیر در کاهش پدیده جزایر گرمایش شهری است [۱۲۳، ۱۲۴].

۶-۱-۳- عمل آوری بتن و استفاده از مواد جایگزین سیمان در مخلوط بتن
چن و همکارانش [۷] دریافتند که ضریب انعکاس بتن عمل آوری شده در شرایط مرطوب نسبت به بتن عمل آوری شده در ۵۰ درصد رطوبت و دمای ۲۲ درجه سانتی گراد، به مقدار ۰/۰۸ تا ۰/۱ بالاتر است. خاکستر بادی یک محصول زائد از نیروگاه‌های ذغال سنگ و کارخانجات ذوب آهن است که به آن سرباره کوره نیز گفته می‌شود. با جایگزینی سیمان با سرباره کوره ذوب آهن یا خاکستر پسماند ذغال سنگ حاصل از سوختن، به نسبت ۵ تا ۳۰ درصد سیمان، در نسبت آب به سیمان ۰٫۳۶، می‌توان به ضرایب انعکاس تا ۰/۱ بالاتر دست یافت. استفاده از این مواد علاوه بر افزایش ضریب انعکاس بتن، باعث افزایش مقاومت و دوام روسازی و کاهش نفوذپذیری آن شده است [۱۲۵].

روکش توانسته اند قابلیت بازتابی خود را به طور کامل بازبایی نمایند [۱۱۲]. همچنین در تحقیقی در سال ۲۰۱۱ مشخص شد که رنگ سفید دارای بازتابش خورشیدی بیشتری نسبت به روش‌هایی مانند روکش آلومینیوم و روکش با ضریب هدایت حرارتی بالا است [۱۳]. استفاده از رنگ سفید به علت بازتاب شدید نور خورشید با ایجاد اختلال در دید رانندگان، باعث کاهش ایمنی جاده شده است [۱۱۳]. به طور کلی مقدار شاخص انعکاس خورشیدی در مخلوط‌های آسفالتی پایین است اما با استفاده از سنگدانه‌های رنگی مقدار بازتابانندگی سطح را در یک بازه ۵ تا ۱۰ ساله می‌توان افزایش داد. مقدار بازتابانندگی در طول زمان به دلیل هوازگی قیر و نمایان شدن سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد. بر خلاف روسازی‌های آسفالتی که میزان شاخص انعکاس خورشیدی آن‌ها به مرور زمان افزایش چشمگیری پیدا می‌کند، قابلیت بازتابندگی روسازی‌های بتنی به مرور زمان کاهش می‌یابد. این شاخص در روسازی‌های بتنی تازه بیشتر از روسازی‌های آسفالتی تازه است و مقادیر این شاخص در سال ۷ام سرویس دهی به هم نزدیک می‌گردد [۷۳].

۶-۱-۱- روش‌های افزایش شاخص انعکاس خورشیدی

روش‌های مختلفی برای افزایش میزان شاخص انعکاس خورشیدی وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از سنگدانه‌های روشن در مخلوط آسفالتی و مصالح آب بندی، سیمان سفید و جایگزینی سیمان با مصالح دیگر اشاره کرد. در روکش دوباره روسازی با استفاده از سنگدانه‌های روشن، پتانسیل بازتابی روسازی افزایش یافته است [۷، ۱۱۴].

۶-۱-۱- استفاده از سنگدانه‌های رنگ روشن روی سطح روسازی آسفالتی
در این روش بر روی روکش آسفالتی تازه، سنگدانه‌ها را پخش کرده و با استفاده از غلتک، آن‌ها را بر روی روکش آسفالتی فشرده می‌سازند. به دلیل پوشاندن فضاهای خالی ریز رویه روسازی، نفوذپذیری کاهش یافته است. این روش باعث افزایش اصطکاک سطح شده و ایمنی راه افزایش یافته است [۷۳، ۱۱۵]. همچنین با استفاده از روش چپ سیل (پاشیدن قیر بر سطح روسازی و پس از آن پخش سنگدانه‌های رنگ روشن) علاوه بر بالا بردن عمر روسازی میتوان مقدار شاخص انعکاس خورشیدی را نیز افزایش داد [۷۳، ۱۰۰، ۱۱۶]. چپ سیل یکی از روش‌های تعمیر و نگهداری روسازی است که پس از پاشیدن قیر و سنگدانه با استفاده از غلتک‌های پنوماتیک سطح را فشرده می‌سازند. با اینکه این روش می‌تواند ضریب انعکاس سطح را افزایش دهد اما با گذر زمان و بارگذاری ترافیکی روی سطح روسازی، ذرات وارد منافذ خالی روسازی شده و ضریب انعکاس به مرور کاهش می‌یابد [۱۱۷].

۷- نتیجه گیری

با توسعه شهرها، افزایش جمعیت و افزایش مصرف انرژی، دمای بخش های مختلف شهرها تغییر یافته است. این اختلاف دمایی شهرها با دمای حومه شهرها، باعث ایجاد پدیده مخرب جزایر گرمایی شهری شده است. یکی از دلایل مهم گرمایش زمین و ایجاد جزایر گرمایی شهری، استفاده از مواد مصنوعی ساخت بشر با خصوصیات گرمایی و بازتابش متفاوت با مواد موجود در طبیعت است. اتلاف انرژی، مصرف منابع مالی، تغییرات اقلیمی و اکوسیستمی از مهمترین پیامدهای ناگوار این پدیده مخرب است. در راستای ارزیابی جزایر گرمایش شهری از روش های ثابت، پیمایشی و از راه دور استفاده شده است. در روش ثابت از سنسورهای مستقر در سطح زمین در ارتفاع مشخص، نصب شده در برج ها و در بالن های هواشناسی استفاده می شود. در روش پیمایشی از خودرو یا هواپیما برای اندازه گیری دما در نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه استفاده شده است که به علت یکسان نبودن زمان برداشت داده ها در نقاط مختلف، نیاز به اصلاح دما-زمان است. همچنین در استفاده از سنسورها، دور بودن سنسور از منابع گرما در افزایش دقت داده ها با اهمیت است. در روش سنجش از راه دور، با استفاده از دوربین های حرارتی، میزان بازتابندگی سطوح قابل تشخیص است.

با استفاده از سطوح بازتابنده، افزایش ضریب دید به آسمان، تغییر نسبت ارتفاع به مساحت کف ساختمان ها (حجم ساختمان)، افزایش پوشش گیاهی و حداکثر نمودن تهویه هوا در شهرها میتوان این پدیده مخرب را کاهش داد. در این راستا، استفاده از مواد بازتابنده و کاربرد روسازی های خنک در جاده ها از مهم ترین روش های کاهش این پدیده مخرب بوده است. نتایج نشان داده است که با کاربرد روسازی های خنک، دمای محیط تا ۲ درجه سانتی گراد و دمای سطح رویه روسازی تا ۱۳ درجه سانتی گراد، کاهش یافته است. استفاده از سیمان و سنگدانه با رنگ روشن و افزودنی هایی مانند تیتانیوم دی اکسید و اکسید روی باعث کاهش قابل توجه مصرف انرژی و کاهش تاثیرات مخرب پدیده جزایر گرمایش شهری شده است.

اگر بازتاب گرمای خورشید باعث محبوس شدن گرما و تشدید گرمایش شود، میتوان از روسازی های دارای سلول های خورشیدی در راستای جذب گرما و تولید برق استفاده کرد. همچنین از روسازی های دارای ضریب انعکاس کم و ضریب هدایت حرارتی بالا در راستای جذب گرما و گرم کردن آب استفاده می شود. عملکرد این رویه ها در برابر بارهای ترافیکی، دوام و تغییرات اصطکاک این رویه ها در شرایط مختلف آب و هوایی باید در نظر گرفته شود. همچنین برای افزایش مقاومت و دوام این رویه ها در

برابر بارهای ترافیکی و محیطی از مواد افزودنی، ایاف و پلیمرهای مختلف استفاده شده است. هزینه بالاتر اجرای این روسازی ها نسبت به روسازی های متداول آسفالتی و بتنی، عامل بازدارنده مهمی است که با کاهش هزینه ها و استفاده گسترده این دانش، میتوان از این رویه ها در راستای کاهش جزایر گرمایش شهری استفاده کرد. همچنین با افزایش نفوذ پذیری رویه راه، افزایش ضریب انعکاس سطح، افزایش ضریب حرارتی و کاهش ضخامت روسازی میتوان دمای سطح روسازی را کاهش داد و مانع ایجاد پدیده نامطلوب جزایر گرمایش شهری شد.

منابع

- [1] D.W. Jones, How urbanization affects energy-use in developing countries, *Energy policy*, 19(7) (1991) 621-630.
- [2] C.I. Portela, K.G. Massi, T. Rodrigues, E. Alcântara, Impact of urban and industrial features on land surface temperature: Evidences from satellite thermal indices, *Sustainable Cities and Society*, 56 (2020) 102100.
- [3] X.-L. Chen, H.-M. Zhao, P.-X. Li, Z.-Y. Yin, Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes, *Remote sensing of environment*, 104(2) (2006) 133-146.
- [4] M.P. McCarthy, M.J. Best, R.A. Betts, Climate change in cities due to global warming and urban effects, *Geophysical research letters*, 37(9) (2010).
- [5] S. Grimmond, Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming, *The Geographical Journal*, 173(1) (2007) 83-88.
- [6] D.J. Sailor, N. Dietsch, The urban heat island mitigation impact screening tool (MIST), *Environmental Modelling & Software*, 22(10) (2007) 1529-1541.
- [7] Y. Qin, A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect, *Renewable and sustainable energy reviews*, 52 (2015) 445-459.
- [8] J. Voogt, How researchers measure urban heat islands, in: United States Environmental Protection Agency (EPA), State and Local Climate and Energy Program, Heat Island Effect, Urban Heat Island Webcasts and Conference Calls, 2007.

- health: impacts of climate variability and change in the United States, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, (2009) 13-25.
- [20] K.A. Borden, S.L. Cutter, Spatial patterns of natural hazards mortality in the United States, *International journal of health geographics*, 7 (2008) 1-13.
- [21] H. Taha, Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat, *Energy and buildings*, 25(2) (1997) 99-103.
- [22] C. Sarrat, A. Lemonsu, V. Masson, D. Guédalia, Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution, *Atmospheric environment*, 40(10) (2006) 1743-1758.
- [23] P. Rajagopalan, K.C. Lim, E. Jamei, Urban heat island and wind flow characteristics of a tropical city, *Solar Energy*, 107 (2014) 159-170.
- [24] R. Giridharan, S. Ganesan, S. Lau, Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong, *Energy and buildings*, 36(6) (2004) 525-534.
- [25] J. Unger, Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database, *International Journal of Environment and Pollution*, 36(1-3) (2009) 59-80.
- [26] C. Yuan, L. Chen, Mitigating urban heat island effects in high-density cities based on sky view factor and urban morphological understanding: a study of Hong Kong, *Architectural Science Review*, 54(4) (2011) 305-315.
- [27] E. Alexandri, P. Jones, Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates, *Building and environment*, 43(4) (2008) 480-493.
- [28] K.W. Oleson, G.B. Bonan, J. Feddema, Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model, *Geophysical Research Letters*, 37(3) (2010).
- [29] P. Shahmohamadi, A. Che-Ani, A. Ramly, K. Maulud, M. Mohd-Nor, Reducing urban heat island effects: A systematic review to achieve energy consumption balance, *International Journal of Physical Sciences*, 5(6) (2010) 626-636.
- [9] C.M. Nwakaire, C.C. Onn, S.P. Yap, C.W. Yuen, P.D. Onodagu, Urban Heat Island Studies with emphasis on urban pavements: A review, *Sustainable Cities and Society*, 63 (2020) 102476.
- [10] M. Davies, P. Steadman, T. Oreszczyn, Strategies for the modification of the urban climate and the consequent impact on building energy use, *Energy Policy*, 36(12) (2008) 4548-4551.
- [11] V. Machairas, A. Tsangrassoulis, K. Axarli, Algorithms for optimization of building design: A review, *Renewable and sustainable energy reviews*, 31 (2014) 101-112.
- [12] M. Santamouris, C. Cartalis, A. Synnefa, D. Kolokotsa, On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review, *Energy and buildings*, 98 (2015) 119-124.
- [13] M. Santamouris, A. Synnefa, T. Karlessi, Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions, *Solar energy*, 85(12) (2011) 3085-3102.
- [14] H. Chen, R. Ooka, H. Huang, T. Tsuchiya, Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation, *Building and Environment*, 44(11) (2009) 2290-2299.
- [15] C. Smith, G. Levermore, Designing urban spaces and buildings to improve sustainability and quality of life in a warmer world, *Energy policy*, 36(12) (2008) 4558-4562.
- [16] C. Heaviside, H. Macintyre, S. Vardoulakis, The urban heat island: implications for health in a changing environment, *Current environmental health reports*, 4 (2017) 296-305.
- [17] S. Hajat, R.S. Kovats, K. Lachowycz, Heat-related and cold-related deaths in England and Wales: who is at risk?, *Occupational and environmental medicine*, 64(2) (2007) 93-100.
- [18] S. Hajat, B. Armstrong, M. Baccini, A. Biggeri, L. Bisanti, A. Russo, A. Paldy, B. Menne, T. Kosatsky, Impact of high temperatures on mortality: is there an added heat wave effect?, *Epidemiology*, (2006) 632-638.
- [19] M.S. O'Neill, K.L. Ebi, Temperature extremes and

- mitigation potentials, *Journal of the Human-environment System*, 11(2) (2008) 85-101.
- [41] B. Guan, B. Ma, F. Qin, Application of asphalt pavement with phase change materials to mitigate urban heat island effect, in: 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection, IEEE, 2011, pp. 2389-2392.
- [42] H. Takebayashi, M. Moriyama, Study on surface heat budget of various pavements for urban heat island mitigation, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012 (2012).
- [43] R. Okwen, R. Pu, J. Cunningham, Remote sensing of temperature variations around major power plants as point sources of heat, *International journal of remote sensing*, 32(13) (2011) 3791-3805.
- [44] R. Priyadarsini, W.N. Hien, C.K.W. David, Microclimatic modeling of the urban thermal environment of Singapore to mitigate urban heat island, *Solar energy*, 82(8) (2008) 727-745.
- [45] S. Taslim, D.M. Parapari, A. Shafaghat, Urban design guidelines to mitigate urban heat island (UHI) effects in hot-dry cities, *Jurnal teknologi*, 74(4) (2015) 119-124.
- [46] A. Soltani, E. Sharifi, Daily variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide, *Frontiers of Architectural Research*, 6(4) (2017) 529-538.
- [47] M. Nuruzzaman, Urban heat island: causes, effects and mitigation measures-a review, *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3(2) (2015) 67-73.
- [48] T.R. Oke, The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects, *Wind climate in cities*, (1995) 81-107.
- [49] P.D. Howe, J.R. Marlon, X. Wang, A. Leiserowitz, Public perceptions of the health risks of extreme heat across US states, counties, and neighborhoods, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(14) (2019) 6743-6748.
- [50] H. Akbari, D. Kolokotsa, Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research, *Energy and*
- [30] B. Ferguson, K. Fisher, J. Golden, L. Hair, L. Haselbach, D. Hitchcock, K. Kaloush, M. Pomerantz, N. Tran, D. Wayne, *Reducing urban heat islands: compendium of strategies-cool pavements*, (2008).
- [31] M. Santamouris, Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26 (2013) 224-240.
- [32] H. Li, J.T. Harvey, T. Holland, M. Kayhanian, The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management, *Environmental Research Letters*, 8(1) (2013) 015023.
- [33] S. Sen, J. Roesler, B. Ruddell, A. Middel, Cool pavement strategies for urban heat island mitigation in suburban Phoenix, Arizona, *Sustainability*, 11(16) (2019) 4452.
- [34] A. Mohajerani, J. Bakaric, T. Jeffrey-Bailey, The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete, *Journal of environmental management*, 197 (2017) 522-538.
- [35] H. Akbari, M. Pomerantz, H. Taha, Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas, *Solar energy*, 70(3) (2001) 295-310.
- [36] F. Rossi, A.L. Pisello, A. Nicolini, M. Filippini, M. Palombo, Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: A new analytical model, *Applied energy*, 114 (2014) 621-631.
- [37] K. Deilami, M. Kamruzzaman, J.F. Hayes, Correlation or causality between land cover patterns and the urban heat island effect? Evidence from Brisbane, Australia, *Remote Sensing*, 8(9) (2016) 716.
- [38] M. Hulley, The urban heat island effect: Causes and potential solutions, in: *Metropolitan sustainability*, Elsevier, 2012, pp. 79-98.
- [39] D.R. Streutker, A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas, *International Journal of Remote Sensing*, 23(13) (2002) 2595-2608.
- [40] H. Akbari, L.S. Rose, Urban surfaces and heat island

- [60] T. Ojima, Changing Tokyo metropolitan area and its heat island model, *Energy and Buildings*, 15(1-2) (1990) 191-203.
- [61] T. Ichinose, F. Matsumoto, K. Kataoka, Counteracting urban heat islands in Japan, in: *Urban Energy Transition*, Elsevier, 2008, pp. 365-380.
- [62] M. Morabito, A. Crisci, G. Guerri, A. Messeri, L. Congedo, M. Munafò, Surface urban heat islands in Italian metropolitan cities: Tree cover and impervious surface influences, *Science of the Total Environment*, 751 (2021) 142334.
- [63] M. Farbudi, Z. Zamani, Studying the solutions of urban heat island mitigation through greenery and permeable surface in Tehran, *Journal of Environmental Science and Technology*, 24(2) (2022) 31-45.
- [64] G.-J. Steeneveld, S. Koopmans, B. Heusinkveld, L. Van Hove, A. Holtslag, Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D20) (2011).
- [65] Y. Sakakibara, K. Owa, Urban-rural temperature differences in coastal cities: Influence of rural sites, *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25(6) (2005) 811-820.
- [66] M. Pichierri, S. Bonafoni, R. Biondi, Satellite air temperature estimation for monitoring the canopy layer heat island of Milan, *Remote Sensing of Environment*, 127 (2012) 130-138.
- [67] H. Widyasamratri, K. Souma, T. Suetsugi, H. Ishidaira, Y. Ichikawa, H. Kobayashi, I. Inagaki, Air temperature estimation from satellite remote sensing to detect the effect of urbanization in Jakarta, Indonesia, *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, 4(6) (2013) 800-805.
- [68] E. Cedillo-González, M. Governatori, C. Ferrari, C. Siligardi, Solar reflective ink-jet printed porcelain stoneware tiles as an alternative for Urban Heat Island mitigation, *Journal of the European Ceramic Society*, 42(2) (2022) 707-715.
- [69] S. Zhu, X. Mai, A review of using reflective pavement buildings, 133 (2016) 834-842.
- [51] T. Susca, F. Pomponi, Heat island effects in urban life cycle assessment: Novel insights to include the effects of the urban heat island and UHI-mitigation measures in LCA for effective policy making, *Journal of Industrial Ecology*, 24(2) (2020) 410-423.
- [52] Y. Sun, G. Augenbroe, Urban heat island effect on energy application studies of office buildings, *Energy and Buildings*, 77 (2014) 171-179.
- [53] R. Tanzadeh, G. Shafabakhsh, Surface free energy and adhesion energy evaluation of modified bitumen with recycled carbon black (micro-nano) from gases and petrochemical waste, *Construction and Building Materials*, 245 (2020) 118361.
- [54] L. Tian, Y. Li, J. Lu, J. Wang, Review on urban heat island in China: Methods, its impact on buildings energy demand and mitigation strategies, *Sustainability*, 13(2) (2021) 762.
- [55] M. Zinzi, E. Carnielo, Impact of urban temperatures on energy performance and thermal comfort in residential buildings. The case of Rome, Italy, *Energy and Buildings*, 157 (2017) 20-29.
- [56] B. Feizizadeh, T. Blaschke, Examining urban heat island relations to land use and air pollution: Multiple endmember spectral mixture analysis for thermal remote sensing, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(3) (2013) 1749-1756.
- [57] M. Agarwal, A. Tandon, Modeling of the urban heat island in the form of mesoscale wind and of its effect on air pollution dispersal, *Applied mathematical modelling*, 34(9) (2010) 2520-2530.
- [58] L. Zhou, R.E. Dickinson, Y. Tian, J. Fang, Q. Li, R.K. Kaufmann, C.J. Tucker, R.B. Myneni, Evidence for a significant urbanization effect on climate in China, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(26) (2004) 9540-9544.
- [59] Y. Hirano, T. Fujita, Evaluation of the impact of the urban heat island on residential and commercial energy consumption in Tokyo, *Energy*, 37(1) (2012) 371-383.

- and Transportation Engineering (English Edition), 8(3) (2021) 356-373.
- [80] E. Wong, US Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs, Reducing Urban Heat Island: Compendium of Strategies, in, EPA.
- [81] A. Kavussi, R. Tanzadeh, Application of slow curing bitumen as a rejuvenating agent in aged bituminous mixes, *Advanced Materials Research*, 587 (2012) 62-66.
- [82] V. Di Maria, M. Rahman, P. Collins, G. Dondi, C. Sangiorgi, Urban Heat Island Effect: thermal response from different types of exposed paved surfaces, *International Journal of Pavement Research & Technology*, 6(4) (2013).
- [83] L. Doulos, M. Santamouris, I. Livada, Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials, *Solar energy*, 77(2) (2004) 231-249.
- [84] A. Synnefa, T. Karlessi, N. Gaitani, M. Santamouris, D. Assimakopoulos, C. Papakatsikas, On the optical and thermal performance of cool colored thin layer asphalt used to improve urban microclimate and reduce the energy consumption of buildings, *Building and Environment*, 46(1) (2011) 38-44.
- [85] J.S. Golden, K.E. Kaloush, Mesoscale and microscale evaluation of surface pavement impacts on the urban heat island effects, *The international journal of pavement engineering*, 7(1) (2006) 37-52.
- [86] D. Wijeyesekera, N.A. Mohamad Nazari, S. Lim, M. Masirin, A. Zainorabidin, J. Walsh, Investigation into the urban heat island effects from asphalt pavements, *OIDA International Journal of Sustainable Development*, 5(6) (2012) 97-118.
- [87] A. Rosheidat, H. Bryan, Optimizing the effect of vegetation for pedestrian thermal comfort and urban heat island mitigation in a hot arid urban environment, *Proceedings of SimBuild*, 4(1) (2010) 230-237.
- [88] H. Li, J. Harvey, D. Jones, Cooling effect of permeable asphalt pavement under dry and wet conditions, *Transportation research record*, 2372(1) (2013) 97-107.
- [89] M.F. Shahidan, P.J. Jones, J. Gwilliam, E. Salleh, An materials as mitigation tactics to counter the effects of urban heat island, *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2 (2019) 381-388.
- [70] D. Aelenei, L. Aelenei, R. Loonen, M. Perino, V. Serra, Adaptive facades, in: *Handbook of Energy Efficiency in buildings*, Elsevier, 2019, pp. 384-411.
- [71] G. Wypych, *Handbook of material weathering*, Elsevier, 2018.
- [72] A. Muscio, The solar reflectance index as a tool to forecast the heat released to the urban environment: Potentiality and assessment issues, *Climate*, 6(1) (2018) 12.
- [73] N. Tran, B. Powell, H. Marks, R. West, A. Kvasnak, Strategies for design and construction of high-reflectance asphalt pavements, *Transportation Research Record*, 2098(1) (2009) 124-130.
- [74] A. Standard, Standard practice for calculating solar reflectance index of horizontal and lowsloped opaque surfaces, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2001).
- [75] L. Haselbach, M. Boyer, J.T. Kevern, V.R. Schaefer, Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems, *Transportation research record*, 2240(1) (2011) 107-115.
- [76] L. Haselbach, *Engineering Guide to LEED-New Construction: Sustainable Construction for Engineers*, McGraw-Hill Education, 2008.
- [77] A. Ferrari, A. Kubilay, D. Derome, J. Carmeliet, The use of permeable and reflective pavements as a potential strategy for urban heat island mitigation, *Urban Climate*, 31 (2020) 100534.
- [78] N. Anting, M.F.M. Din, K. Iwao, M. Ponraj, K. Jungan, L.Y. Yong, A.J.L.M. Siang, Experimental evaluation of thermal performance of cool pavement material using waste tiles in tropical climate, *Energy and Buildings*, 142 (2017) 211-219.
- [79] S.R.O. Aletba, N.A. Hassan, R.P. Jaya, E. Aminudin, M.Z.H. Mahmud, A. Mohamed, A.A. Hussein, Thermal performance of cooling strategies for asphalt pavement: a state-of-the-art review, *Journal of Traffic*

- [100] P. Rosado, H. Gilbert, M. Pomerantz, B. Mandel, R. Levinson, Cool pavement demonstration and study, in: Third International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island, 2014, pp. 815-826.
- [101] H. Li, A. Saboori, X. Cao, Information synthesis and preliminary case study for life cycle assessment of reflective coatings for cool pavements, *International Journal of Transportation Science and Technology*, 5(1) (2016) 38-46.
- [102] J. Chen, H. Wang, H. Zhu, Analytical approach for evaluating temperature field of thermal modified asphalt pavement and urban heat island effect, *Applied Thermal Engineering*, 113 (2017) 739-748.
- [103] R.B. Mallick, B.-L. Chen, S. Bhowmick, M. Hulen, Capturing solar energy from asphalt pavements, in: International symposium on asphalt pavements and environment, international society for asphalt pavements, Zurich, Switzerland, 2008, pp. 161-172.
- [104] Z. Zhou, S. Hu, X. Zhang, J. Zuo, Characteristics and application of road absorbing solar energy, *Frontiers in Energy*, 7 (2013) 525-534.
- [105] M.R. Hall, P.K. Dehdezi, A.R. Dawson, J. Grenfell, R. Isola, Influence of the thermophysical properties of pavement materials on the evolution of temperature depth profiles in different climatic regions, *Journal of materials in civil engineering*, 24(1) (2012) 32-47.
- [106] A.S. Dezfooli, F.M. Nejad, H. Zakeri, S. Kazemifard, Solar pavement: A new emerging technology, *Solar Energy*, 149 (2017) 272-284.
- [107] A. Middel, V.K. Turner, F.A. Schneider, Y. Zhang, M. Stiller, Solar reflective pavements—A policy panacea to heat mitigation?, *Environmental Research Letters*, 15(6) (2020) 064016.
- [108] M. Pomerantz, Durability and visibility benefits of cooler reflective pavements, (2000).
- [109] M. Hendel, Cool pavements, in: *Eco-efficient pavement construction materials*, Elsevier, 2020, pp. 97-125.
- [110] J. Tanzadeh, R. Tanzadeh, H. Nazari, N. Kamvar, evaluation of outdoor and building environment cooling achieved through combination modification of trees with ground materials, *Building and Environment*, 58 (2012) 245-257.
- [90] N.H. Wong, S.K. Jusuf, A.A. La Win, H.K. Thu, T.S. Negara, W. Xuchao, Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics, *Building and environment*, 42(8) (2007) 2949-2970.
- [91] V.S. Cheela, M. John, W. Biswas, P. Sarker, Combating urban heat island effect—A review of reflective pavements and tree shading strategies, *Buildings*, 11(3) (2021) 93.
- [92] H. Akbari, H.D. Matthews, Global cooling updates: Reflective roofs and pavements, *Energy and Buildings*, 55 (2012) 2-6.
- [93] Y. Qin, Urban canyon albedo and its implication on the use of reflective cool pavements, *Energy and Buildings*, 96 (2015) 86-94.
- [94] Y. Qin, J.E. Hiller, Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development, *Energy and Buildings*, 85 (2014) 389-399.
- [95] H.E. Gilbert, P.J. Rosado, G. Ban-Weiss, J.T. Harvey, H. Li, B.H. Mandel, D. Millstein, A. Mohegh, A. Saboori, R.M. Levinson, Energy and environmental consequences of a cool pavement campaign, *Energy and buildings*, 157 (2017) 53-77.
- [96] H. Taha, Meso-urban meteorological and photochemical modeling of heat island mitigation, *Atmospheric Environment*, 42(38) (2008) 8795-8809.
- [97] A. Mohegh, P. Rosado, L. Jin, D. Millstein, R. Levinson, G. Ban-Weiss, Modeling the climate impacts of deploying solar reflective cool pavements in California cities, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(13) (2017) 6798-6817.
- [98] A.H. Rosenfeld, H. Akbari, J.J. Romm, M. Pomerantz, Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction, *Energy and buildings*, 28(1) (1998) 51-62.
- [99] S.E. Bretz, H. Akbari, Long-term performance of high-albedo roof coatings, *Energy and buildings*, 25(2) (1997) 159-167.

- [118] M. Pomerantz, H. Akbari, S.-C. Chang, R. Levinson, B. Pon, Examples of cooler reflective streets for urban heat-island mitigation: Portland cement concrete and chip seals, (2003).
- [119] M. Pomerantz, The effect of pavements' temperatures on air temperatures in large cities, (2000).
- [120] M. Pomerantz, H. Akbari, J.T. Harvey, Cooler reflective pavements give benefits beyond energy savings: Durability and illumination, (2000).
- [121] N. Xie, H. Li, A. Abdelhady, J. Harvey, Laboratorial investigation on optical and thermal properties of cool pavement nano-coatings for urban heat island mitigation, *Building and Environment*, 147 (2019) 231-240.
- [122] R. Levinson, H. Akbari, Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete, *Cement and concrete research*, 32(11) (2002) 1679-1698.
- [123] T. Cackler, J. Alleman, J. Kevern, J. Sikkema, Technology demonstrations project: environmental impact benefits with "TX active" concrete pavement in Missouri DOT two-lift highway construction demonstration, Final Report I, Iowa State University, (2012).
- [124] A. Baral, S. Sen, J.R. Roesler, Use phase assessment of photocatalytic cool pavements, *Journal of Cleaner Production*, 190 (2018) 722-728.
- [125] K. Boriboonsomsin, F. Reza, Mix design and benefit evaluation of high solar reflectance concrete for pavements, *Transportation Research Record*, 2011(1) (2007) 11-20.
- Fatigue evaluation of hot mix asphalt (HMA) mixtures modified by optimum percent of TiO₂ nanoparticles, in: *Advanced Engineering Forum*, Trans Tech Publ, 2017, pp. 55-62.
- [111] D. Senevirathne, V. Jayasooriya, S.M. Dassanayake, S. Muthukumar, Effects of pavement texture and colour on Urban Heat Islands: An experimental study in tropical climate, *Urban Climate*, 40 (2021) 101024.
- [112] G. Kyriakodis, M. Santamouris, Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates-Results from a large scale urban mitigation project, *Urban Climate*, 24 (2018) 326-339.
- [113] H. Taha, D.J. Sailor, H. Akbari, High-albedo materials for reducing building cooling energy use, (1992).
- [114] R. Levinson, H. Akbari, P. Berdahl, K. Wood, W. Skilton, J. Petersheim, A novel technique for the production of cool colored concrete tile and asphalt shingle roofing products, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(6) (2010) 946-954.
- [115] M. Fossum, E.O. Ryeng, The walking speed of pedestrians on various pavement surface conditions during winter, *Transportation research part D: transport and environment*, 97 (2021) 102934.
- [116] R. Tanzadeh, G. Shafabakhsh, Relationship between the surface free energy and stiffness modulus of bitumen modified with micro-nano-carbon black from end-of-life tires, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 100 (2020) 102606.
- [117] S. Sen, J. Roesler, Heat Island Impact of Chip Seals, in: *Airfield and Highway Pavements 2021*, 2021, pp. 320-331.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Tofghi, R. Tanzadeh, F. Moghadas Nejad, *Urban Heat Island Destructive Phenomenon and Its Reduction with the Approach of Road Pavement Evaluation*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(9) (2023) 1733-1752.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21359.7694

