پتانسیل‌های روسازی راه در تولید انرژی‌های پاک با ارزیابی انرژی خورشیدی

مقاله علمی – پژوهشی

زهرا رنجبر، دانش آموخته کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
غزال مهدوی، دانش آموخته کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
رشید تن‌زاده*، دانش آموخته پسا دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
فریدون مقدس‌نژاد، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی‌امیرکبیر، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rashidtanzadeh@aut.ac.ir

دریافت: ۱٤۰۳/۰۹/۱۱– پذیرش: ۱٤۰٤/۰۳/۰۱
صفحه ۱۸٤-۱٦۱

چکیده

تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و نیاز به تأمین پایدار انرژی الکتریسیته از موضوعات اصلی در بسیاری از کشورهای صنعتی و در حال پیشرفت است. شناخت پتانسیل‌های موجود در راستای برداشت، روش‌های انباشت و انتقال انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر از اهمیت بالایی برخوردار است. انرژی حاصل از حرکت مکانیکی ناشی از عبور و مرور وسایل‌نقلیه، انرژی باد به علت سرعت عبوری وسایل نقلیه، انرژی صوتی/ ارتعاشی به علت آلودگی‌های ترافیکی و انرژی تابشی نور خورشید از مهم‌ترین پتانسیل‌های انرژی قابل برداشت در سطح و ساختار روسازی راه‌هاست. در این تحقیق با بررسی جدیدترین مقالات علمی معتبر، پتانسیل‌های مختلف برداشت انرژی از سطح و ساختار روسازی‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته‌است. پدیده جزایر گرمایش شهری، روش‌های روسازی خنک شامل روسازی بازتابنده، روسازی تبخیری و روسازی دارای پتانسیل برداشت حرارت مورد بررسی قرار گرفت. محدودیت‌ها و پیشرفت‌های انواع فناوری‌های برداشت انرژی از راه‌ها مانند گردآورنده خورشیدی، فتوولتائیک، فتوولتائیک/حرارتی و ترموالکتریک مورد بررسی قرارگرفته است. روسازی برداشت کننده انرژی حرارتی نسبت به بقیه مدل‌های روسازی خنک، سودمند بوده زیرا هم دمای سطح روسازی را پایین نگه می‌دارد و هم می‌توان از آن انرژی پاک به دست آورد. سیستم‌های روسازی آسفالتی هیدرونیک، فتوولتائیک و ترموالکتریک به ترتیب برای افزایش راندمان حرارتی و تولید برق استفاده می‌شوند. سیستم‌های هیبریدی فتوولتائیک/حرارتی، بهینه‌ترین عملکرد را در تولید برق و حرارت از انرژی خورشیدی نشان می‌دهند، در حالی که سیستم‌های ترموالکتریک مناسب مناطق گرمسیری هستند. این تحقیق به بررسی مزایا و چالش‌های هر یک از این سیستم‌ها و پیشنهادات برای بهینه‌سازی آن‌ها پرداخته است.

واژه‌های کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، برداشت انرژی، جزایر گرمایش شهری، روسازی آسفالتی، روسازی خنک

۱- مقدمه

افزایش تولید پایدار انرژی به طور مستقیم با بهبود کیفیت زندگی جوامع بشری ارتباط دارد. در شرایط کنونی که تقاضای جهانی برای انرژی به سرعت در حال افزایش است، همراه با آگاهی بیشتر از نیاز به حفاظت از محیط زیست، فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی، به عنوان راه‌کاری نوآورانه برای تأمین این نیاز مطرح شده‌اند (Wu et al., 2020). این فناوری‌ها قادر به جمع‌آوری انرژی خورشیدی و تبدیل آن به برق هستند، که به نوبه خود می‌تواند وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش داده و چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از آن‌ها را برطرف کند (Patlins et al., 2018). با اینکه

سوخت‌های فسیلی از جمله زغال‌سنگ، نفت و گاز در پیشرفت‌های اقتصادی کشورها نقش عمده‌ای ایفا کرده‌اند، مشکلات زیست‌محیطی ناشی از استفاده آن‌ها قابل انکار نیست (Papadimitriou et al., 2019).

یکی از زیرساخت‌های حیاتی در شهرهای مدرن، روسازی جاده‌ها است که سهم قابل توجهی از سطوح شهری را به خود اختصاص داده و مقادیر زیادی از تشعشعات خورشیدی را جذب می‌کند. این سطوح روسازی پتانسیل عظیمی برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی دارند و می‌توانند به عنوان مولدهای انرژی توزیع‌شده در شهرهای هوشمند و پایدار عمل کنند. تجهیزات مختلفی برای برداشت انرژی از روسازی‌ها طراحی شده‌اند که شامل سیستم‌های الکترومغناطیسی، پیزوالکتریکی، گردآورنده‌های انرژی خورشیدی از طریق گردش آب یا جریان هوا، فوتوولتائیک و ترموالکتریکی می‌شوند (Gholikhani et al., 2020; Jiang & Huang, 2020).

یکی از روش‌های اصلی برداشت انرژی، استفاده از فناوری‌های پیزوالکتریک است که برای جمع‌آوری انرژی جنبشی ناشی از عبور عابرین پیاده و انرژی مکانیکی ناشی از حرکت وسایل نقلیه به کار می‌روند. این فناوری انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند (Cao et al., 2020). بررسی‌های عددی نشان می‌دهند که با افزایش بار و سرعت خودروها، مقدار انرژی تولیدی افزایش می‌یابد (Cao et al., 2021). از طرفی، سیستم‌های الکترومغناطیسی با استفاده از ژنراتورهای خاص خود قادرند انرژی مکانیکی ناشی از حرکت وسایل نقلیه را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند (Duarte et al., 2019).

در کنار این فناوری‌ها، روش‌های دیگر مانند گردآورندگان انرژی خورشیدی از طریق گردش آب یا جریان هوا، به طور مؤثر از انرژی خورشیدی برای گرم کردن آب یا هوا استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها می‌توانند انرژی حرارتی تولید کنند که در استفاده‌هایی همچون ذوب برف جاده‌ها و تولید برق مفید واقع شوند (Beddu et al., 2024). فناوری‌های فوتوولتائیک نیز با استفاده از سلول‌های خورشیدی تعبیه شده در سطح جاده‌ها، انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند (Ma et al., 2022; Mao & Ni, 2024).

یکی دیگر از روش‌های مؤثر برای برداشت انرژی، سیستم‌های ترموالکتریکی هستند که از اختلاف دمای بین سطح جاده و زیرساخت‌های زیرین برای تولید انرژی الکتریکی بهره می‌برند. این فناوری‌ها می‌توانند علاوه بر تأمین انرژی برای حسگرهای بی‌سیم یا چراغ‌های LED، به کاهش دمای سطح روسازی کمک کنند و عمر آن را افزایش دهند (Wei et al., 2022). همچنین، پتانسیل انرژی باد ناشی از حرکت وسایل نقلیه در بزرگراه‌ها، به عنوان یک منبع انرژی مهم، می‌تواند از طریق توربین‌های بادی بهره‌برداری شود (MANOHARAN, 2021; Morbiato et al., 2014). آلودگی صوتی ترافیکی نیز از دیگر پتانسیل‌هایی است که می‌توان آن را به انرژی الکتریکی تبدیل کرد با استفاده از مبدل‌های پیزوالکتریک (Salvador et al., 2017).

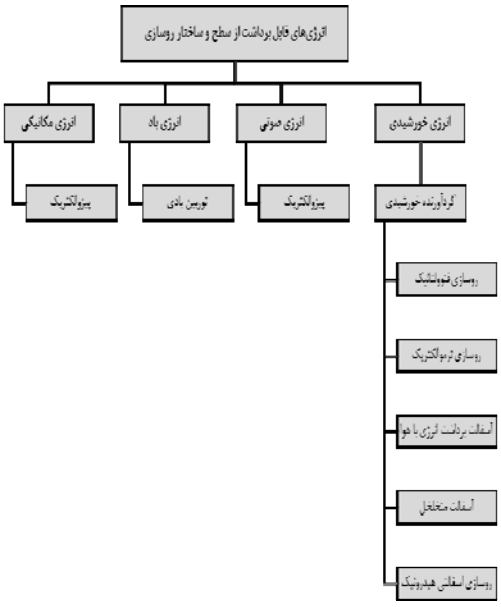
از سوی دیگر، پدیده جزایر گرمایش شهری یکی از مشکلات جدی است که باعث افزایش دمای مناطق شهری در مقایسه با مناطق روستایی می‌شود. این افزایش دما اثرات منفی بر سلامت انسان، محیط زیست و افزایش هزینه‌های انرژی دارد (Buchin et al., 2016; Mohajerani et al., 2017). در این راستا، فناوری‌های مختلفی مانند سیستم‌های فوتوولتائیک و ترموالکتریک می‌توانند به کاهش دمای سطح جاده‌ها و در نتیجه کاهش پدیده جزایر گرمایش شهری کمک کنند (Anupam et al., 2021). سیستم‌های روسازی آسفالتی هیدرونیک، فوتوولتائیک و ترموالکتریک از جمله فناوری‌های مؤثری هستند که در این زمینه کاربرد دارند و می‌توانند به تولید انرژی پایدار و بهبود وضعیت دمایی شهرها کمک کنند (L. Xu et al., 2021).

در این تحقیق، با بررسی مقالات علمی و تحقیقات اخیر (عمدتاً در ده سال گذشته)، به ارزیابی پتانسیل‌های مختلف برداشت انرژی از روسازی‌های آسفالتی پرداخته شده است. این پژوهش شامل بررسی پدیده جزایر گرمایش شهری، روش‌های مختلف روسازی خنک، محدودیت‌ها و پیشرفت‌های فناوری‌های برداشت انرژی و ارزیابی روش‌های برداشت انرژی‌های مکانیکی، باد، صوت و خورشید از سطح و ساختار روسازی‌ها است. همچنین این تحقیق به عنوان مرجعی برای بهبود فناوری‌های برداشت انرژی خورشیدی از روسازی‌ها و توسعه شهرهای پایدار و هوشمند در نظر گرفته می‌شود.

۲- پتانسیل راه‌ها در برداشت انرژی‌های پاک

امروزه با توجه به توسعه شهرنشینی و نیاز به پتانسیل‌های بیشتر خدماتی و ارتباطاتی، مصرف انرژی رو به افزایش است. اگرچه استفاده از منابع متعارف انرژی مانند نفت، زغال سنگ و گاز طبیعی در پیشرفت اقتصادی کشورها موثر بوده، اما استفاده از این منابع تجدیدناپذیر منجر به مشکلات زیست محیطی مانند آلودگی هوا، بارش اسیدی، تخریب لایه ازن، تخریب جنگل و انتشار مواد رادیواکتیو شده است. با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست محیطی و نیاز به تولید پایدار انرژی، شناخت و توسعهٔ منابع انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر در حال افزایش است. انرژی‌های تجدیدپذیر مستقیماً از نور خورشید (مانند حرارتی، فوتوشیمیایی و فوتوالکتریک) و یا به طور غیر مستقیم از نورخورشید (مانند باد، نیروگاه برق‌آبی و انرژی فتوسنتز ذخیره‌شده در زیست‌توده) و یا از سایر حرکات و مکانیسم‌های طبیعی محیط (مانند انرژی زمین گرمایی و جزر و مد) قابل استحصال است (Ellabban et al., 2014).

جاده‌ها با پتانسیل بالای اقتصادی، در کاهش پدیده مخرب جزایر گرمایش شهری و افزایش تولید انرژی‌های پاک، تاثیرگذار هستند. انرژی‌های قابل برداشت از ساختار روسازی راه‌ها در شکل ۱ مشخص شده است.



شکل ۱. انرژی‌های قابل برداشت از سطح و ساختار روسازی راه‌ها

۲-۱- انرژی مکانیکی قابل تبدیل به انرژی برق

انرژی مکانیکی ناشی از عبور وسایل‌نقلیه از سطح راه‌ها با استفاده از پیزوالکتریک ها قابل تبدیل به انرژی الکتریکی است (Cao et al., 2020). مطالعات زیادی در راستای تبدیل انرژی جنبشی ناشی از حرکت عابرین پیاده و عبور وسایل‌نقلیه به انرژی الکتریکی صورت گرفته است. مقصودی نیا و همکاران (Maghsoudi Nia et al., 2019)، یک سیستم روسازی شامل سنسورهای پیزوالکتریک ساخته شده از یک لایه رسانا مانند ورق فولادی برای برداشت بهینه انرژی و یک لایه لاستیک به عنوان محافظ ارایه کردند. تحقیقات نشان داده است که سنسورهای پیزوالکتریک باید با یک لایه رسانا پوشانده شده باشند تا انرژی بهینه‌ای از آن‌ها قابل برداشت باشد. اگر قطعات پیزوالکتریک بصورت متناوب آرایش شده و تعبیه گردند، در اثر قدم زدن عابرین پیاده و ارتعاش ورق، انرژی الکتریکی بیشتری تولید شده و بهتراست این نوع سیستم‌ها در مکان های پرتراکم اجرا گردد. مینگی و همکاران (M. Liu et al., 2018) در راستای برداشت انرژی از حرکت عابرین پیاده، روسازی جدیدی ارائه دادند که در آن، یک موتور مغناطیسی دائمی به عنوان ژنراتور الکتریکی استفاده شد. مشاهده شده است که میزان انرژی الکتریسیته قابل برداشت در اثر پیاده‌روی متعارف انسان به طور متوسط ۳/۶ وات و حداکثر ۱۲ وات است. ونگ و همکاران (C. Wang et al., 2018)، در راستای برداشت انرژی با استفاده از پیزوالکتریک ها از دستگاه جدیدی استفاده کردند که ابعاد خارجی آن براساس توزیع مسیر چرخ خودرو، الگوهای اثر چرخ لاستیک و شرایط تراکم غلتک خودرو، بهینه شده‌است.

ابعاد مطلوب دستگاه برای ترافیک سبک و سنگین به ترتیب ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌مترمربع و ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌مترمربع است. عملکرد دستگاه طراحی شده در این تحقیق از سایر دستگاه‌های موجود دیگر برتر بوده‌است. ضعف عمده سیستم پیزوالکتریک‌ها، مقاومت و دوام پایین و عدم تطابق مصالح به کار رفته در پیزوالکتریک‌ها با مصالح روسازی راه‌هاست (Kim et al., 2015).

۲-۲- انرژی صوتی/ارتعاشی قابل تبدیل به انرژی برق

تحقیقات نشان داده‌اند که انرژی حاصل از صداهای ناشی از ترافیک، به ویژه از پمپ‌کردن هوای تایرها، پتانسیل بالایی برای تولید برق دارد (Tanzadeh et al., 2024). برداشت الکتریسیته از روسازی، به عنوان مثال از سر و صدای ترافیک، می‌تواند امید جدیدی را برای دستیابی به سیستم‌های سنجش خود کارآمد و پایدار برای جاده‌ها به ارمغان آورد. این فناوری نه تنها به کاهش آلودگی صوتی کمک می‌کند، بلکه به تأمین انرژی پاک و تجدیدپذیر نیز می‌انجامد. تحقیقات نشان داده‌اند که صداهای تولید شده توسط وسایل نقلیه و ترافیک می‌توانند با روش‌های مختلفی به انرژی الکتریکی تبدیل شوند. این روش‌ها شامل استفاده از دیافراگم‌ها و مواد پیزوالکتریک برای تبدیل ارتعاشات صوتی به انرژی الکتریکی هستند (Chaithanya et al., 2021). با بهینه‌سازی پارامترهای ساختاری و انتخاب موقعیت مناسب برای نصب این واحدها، می‌توان کارایی برداشت انرژی را به حداکثر رساند (Zhang et al., 2022).

در سال‌های اخیر، کاربرد نویز نیز در سراسر جهان مورد تحقیق قرار گرفته است. همچنین انرژی زیادی در سیستم حرکت قطارهای ریلی هدر رفته و سهم زیادی از این انرژی، ناشی از آلودگی‌های صوتی/ارتعاشی است. در سال ۲۰۱۴ میلادی، روشی در راستای تولید انرژی الکتریکی از آلودگی صوتی ناشی از حرکت چرخ‌های قطار ارائه شد. از این انرژی تولید شده در تجهیزات برقی کم مصرف قطار استفاده شد (Arnab et al., 2014). اخیراً ساخت راه‌آهن سریع‌السیر افزایش یافته که منجر به مشکل آلودگی صوتی به ویژه در مناطق مسکونی اطراف راه‌آهن شده است. ونگ و همکاران (Y. Wang et al., 2018)، تبدیل انرژی صوتی با فرکانس پایین ناشی از حرکت راه‌آهن سریع‌السیر به انرژی الکتریسیته را مورد بررسی قرار دادند. مطابق نتایج، برای یک واحد از این سیستم ساخته شده، حداکثر میزان ولتاژ خروجی آنی برابر است با ۷۴/۶ میلی ولت به ازای ۱۱۰ دسی بل نویز منتشر شده. برداشت، ذخیره سازی و تبدیل انرژی صوتی به انرژی الکتریکی هنوز در مراحل اولیه است (Tanzadeh et al., 2024).

۲-۳- انرژی باد ناشی از ترافیک قابل تبدیل به انرژی برق

انرژی باد ناشی از ترافیک می‌تواند به انرژی الکتریکی تبدیل شود. این فرآیند شامل استفاده از توربین‌های بادی و برداشت‌کننده‌های انرژی بادی است که انرژی جنبشی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. انواع برداشت‌کننده‌های انرژی بادی شامل توربین‌های بادی سنتی، برداشت‌کننده‌های انرژی بادی مبتنی بر ارتعاش و سیستم‌های هیبریدی است.

برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریک از اثر ارتعاش باد برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند. ارتعاشات ناشی از باد به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود (Li et al., 2024). برداشت‌کننده‌های مغناطیسی از مواد مغناطیسی برای تولید انرژی الکتریکی از ارتعاشات باد استفاده می‌کنند (Hasegawa et al., 2019). سیستم‌های هیبریدی خورشیدی-بادی از ترکیب انرژی خورشیدی و بادی برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند و می‌توانند در شرایط مختلف جوی کارایی بالایی داشته باشند (Yoomak & Ngaopitakkul, 2022).

در تحقیقی در سال ۲۰۱۶، توربین بادی با محور افقی در راستای جذب انرژی باد از وسایل‌نقلیه متحرک در بزرگراه طراحی و ساخته شد. در این تحقیق، انرژی باد به روشی خاص برداشت شد و تعداد خودروهای مورد نیاز برای شارژ باتری با نرم افزار متلب شبیه‌سازی شد. مواد کامپوزیت به‌دلیل وزن سبک، استحکام و دوام بالا برای جنس پره توربین پیشنهاد شد (Hegde et al., 2016). موکش و همکاران (Rathore et al., 2021)، با استفاده از وسایل نقلیه و توربین بادی با محور عمودی نصب شده در وسط بزرگراه، انرژی الکتریکی تولید کردند. توربین های بادی دارای دو نوع محور افقی و محور عمودی بوده که به‌دلیل طراحی و تعمیر آسان‌تر، توربین بادی با محور عمودی، مطلوب‌تر است. در این تحقیق، یک طرح مناسب و اقتصادی در راستای جمع‌آوری انرژی بادی تجدیدپذیر از توربین بادی با محور عمودی ارائه شد. این توربین با استفاده از مواد ارزان قیمت ساخته‌شد تا در مناطق روستایی که دسترسی به برق محدود است مورد استفاده قرارگیرد. کاربرد این سیستم در روستاها مقرون‌به‌صرفه است.

توربین بادی موثرترین دستگاه تولید برق است. با این حال، فقط در برنامه‌های کاربردی در مقیاس بزرگ کارآمد است. پیشرفت‌های تکنولوژیکی اخیر در انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید انرژی بر برداشت انرژی جنبشی از بادهای کم‌سرعت در

مناطق بسیار کوچک‌تر، مانند کانال‌های تهویه مطبوع تمرکز دارد. در مقاله‌ای در سال ۲۰۱۹، یک مولد برق ارتعاشی باد ساده پیشنهاد شده است که از مواد مغناطیسی برای برداشت انرژی الکتریکی از باد با سرعت کم استفاده می‌کند. مواد مغناطیسی با اعمال نیروی خارجی، مانند ارتعاشات ناشی از باد، تغییرات زیادی در شار مغناطیسی ایجاد می‌کنند که نیروی محرکه الکتریکی ایجاد می‌کند (Hasegawa et al., 2019).

۲-٤- انرژی گرمایی قابل تبدیل به انرژی برق

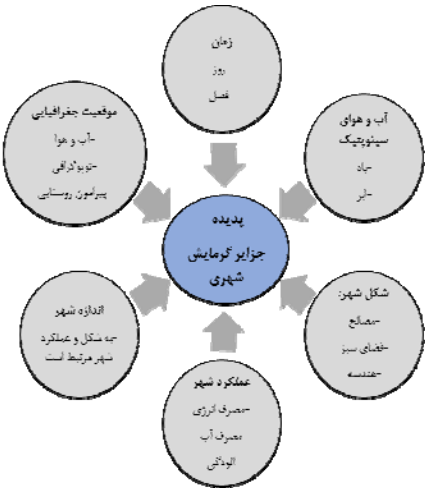
انرژی خورشیدی یکی از انواع انرژی های پاک است که به دو صورت انرژی نورانی و انرژی گرمایی، جذب محیط طبیعی شده‌است. برداشت انرژی خورشیدی از طریق زیرساخت‌های روسازی، مفهومی جذاب است که منجر به بررسی روش های جدید در راستای برداشت انرژی و بهره وری اقتصادی از آن شده است. از انرژی خورشیدی برداشت‌شده از راه‌ها می‌توان برای گرم کردن ساختمان، یخ زدایی جاده‌ها و تولید برق استفاده‌کرد. انرژی گرمایی موجود در روسازی راه می‌تواند به انرژی برق تبدیل شود. این فرآیند به ویژه با استفاده از سلول‌های ترموگالوانیک که قادر به تبدیل انرژی حرارتی به برق هستند، امکان‌پذیر است. این سلول‌ها می‌توانند از نوسانات دما در محیط استفاده کنند و در طول روز و شب به تولید برق ادامه دهند (Yu et al., 2019).

۳- پدیده جزایرگرمایش شهری و روسازی راه‌ها

جزایر گرمایش شهری پدیده‌ای است که به افزایش دما در مناطق شهری نسبت به مناطق روستایی اطلاق می‌شود. یکی از عوامل اصلی این پدیده، نوع و ویژگی‌های روسازی راه‌ها است. مواد معمولی مانند آسفالت و بتن به دلیل جذب و ذخیره‌سازی حرارت، دما را افزایش می‌دهند. تحقیقات نشان می‌دهد که آسفالت می‌تواند دما را تا چهار درجه سانتی‌گراد افزایش دهد، در حالی که بتن سه درجه و زمین‌های عادی دو درجه افزایش دما را به همراه دارند (Ikechukwu, 2015).

در قرن بیست و یکم، جزایر حرارتی شهری در نتیجه شهرنشینی و صنعتی شدن به یک مشکل بزرگ برای بشریت تبدیل شده‌اند. دلایل اصلی جزایر گرمایش شهری مقادیر زیادی گرمای تولید شده توسط سازه‌های شهری است که انرژی خورشیدی و منابع حرارتی انسانی را مصرف می‌کنند و دوباره تابش می‌کنند. این دو منبع گرما باعث می‌شوند دمای یک منطقه شهری بالاتر از محیط اطراف آن افزایش یابد، پدیده‌ای که به جزیره گرمایش شهری معروف است. رویکردها، روش‌ها، مدل‌ها و ابزارهای تحقیقی زیادی برای بررسی و تحلیل این پدیده به کار گرفته شده است. به طور کلی، تصور می‌شود که مناطق سبز در شهرها رویکردی موثر برای کاهش اثرات جزیره گرمایی شهری و ایجاد آسایش برای ساکنان باشد. بهبود شرایط ریزاقلیمی در محیط‌های شهری بیشتر تحت تأثیر تبخیر و تعرق است. بیشتر مطالعات روند رو به افزایش جزایر گرمایش شهری را نشان می‌دهد که با کاهش پوشش گیاهی و تغییرات کاربری زمین مرتبط است (Fadhil et al., 2023). عوامل تاثیرگذار بر پدیده جزایر گرمایش شهری در شکل ۲ مشخص شده است.

جهت کاهش اثرات جزایر گرمایش شهری، استفاده از روسازی‌های خنک پیشنهاد می‌شود. این نوع روسازی‌ها با افزایش سطح بازتابش و کاهش جذب حرارت، می‌توانند به بهبود شرایط میکرو اقلیمی کمک کنند. به عنوان مثال، روسازی‌های قابل نفوذ و پوشش‌های سبز می‌توانند به کاهش دما و بهبود کیفیت هوا کمک کنند (Fadhil et al., 2023). بنابراین، طراحی و انتخاب مواد مناسب برای روسازی می‌تواند نقش مهمی در کاهش جزایر گرمایش شهری ایفا کند.



شکل ۲. عوامل تاثیرگذار بر پدیده جزایر گرمایش شهری (Voogt, 2007)

۳-۱- روسازی خنک

اصطلاح "روسازی خنک" به طور کلی به روسازی‌هایی اشاره دارد که برای محدود کردن دمای سطح آن‌ها و در نتیجه سهم آن‌ها در اثر جزایر گرمایش شهری در مقایسه با مواد استاندارد، مهندسی شده‌اند. در حال حاضر، اصطلاح روسازی‌های خنک‌کننده به مواد روسازی اشاره می‌کند که تبخیر آب را افزایش می‌دهند، بازتاب انرژی خورشیدی بیشتری را تحریک می‌کنند یا برای ارتقای سطح خنک‌تر نسبت به روسازی‌های معمولی اصلاح می‌شوند. به طور قابل‌توجه، جنبه خنک‌تر باقی‌ماندن، به معنای روسازی‌های خنک است که انتشار گرمای کمتر به هوا را در مقابل انواع روسازی‌های سنتی تسهیل می‌کند.

با رشد جمعیت شهری، روش‌های کاهش اثر جزیره گرمایی شهری اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است. روسازی‌های خنک که ذخیره گرمای مواد مورد استفاده در روسازی را تغییر می‌دهند، می‌توانند منجر به کاهش دمای سطح و کاهش تشعشعات حرارتی ساطع شده به جو شوند. فن‌آوری‌های روسازی خنک از استراتژی‌های مختلفی برای کاهش دمای روسازی‌های جدید و موجود، از جمله افزایش آلبیدو، خنک‌سازی تبخیری و کاهش رسانش گرما استفاده می‌کنند. فرآیند نیروهای تابش منفی به جبران اثرات افزایش دمای جو کمک می کند. این نوع روسازی‌ها می‌توانند شامل مصالحی با ویژگی‌های خاص مانند قابلیت تبخیر و انتقال حرارت پایین باشند که به کاهش دماهای سطحی و هوای اطراف کمک می‌کنند (Kappou et al., 2022). استفاده از روسازی خنک به ویژه در مناطق شهری که با مشکلات گرمایی مواجه هستند، می‌تواند به بهبود شرایط راحتی حرارتی انسان و کاهش مصرف انرژی برای تهویه مطبوع منجر شود (Croce et al., 2021).

۳-۱-۱- روسازی تبخیری

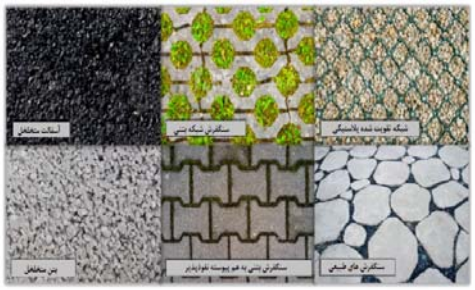
سیستم‌های سنگفرش مانند پارکینگ‌ها، مسیرهای پیاده‌روی و جاده‌ها را می‌توان برای مهار آب و در نتیجه تسهیل خنک‌سازی تبخیری طراحی کرد. روسازی‌هایی که آب را تا حد معینی نگه می‌دارند، خنک می‌شوند. انرژی گرمایی در تبخیر آب مورد نیاز است که منجر به تبدیل آب به گاز می‌شود. برای انجام این فرآیند، انرژی گرمایی باید از محیط جذب شود و متعاقباً خنک شود. بنابراین خنک‌کننده تبخیری دمای روسازی و همچنین دمای هوا را کاهش می‌دهد (Qin, 2015).

روسازی تبخیری به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش دما و بهبود شرایط میکرو اقلیمی در مناطق شهری شناخته می‌شود. این نوع روسازی با استفاده از مواد متخلخل طراحی شده است که می‌توانند آب را جذب و تبخیر کنند، در نتیجه دما و اثر جزیره گرمایی شهری را کاهش می‌دهند (Y. Liu et al., 2018). تحقیقات نشان داده‌اند که افزایش تبخیر از روسازی می‌تواند به طور قابل توجهی دماهای سطحی را کاهش دهد و راحتی حرارتی انسان را در شرایط گرم بهبود بخشد. همچنین، استفاده از لایه‌های نگهدارنده آب در زیر روسازی‌های متخلخل می‌تواند به افزایش نرخ تبخیر و کاهش دما کمک کند (Buyung et al., 2022). در نهایت، پروتکل‌های هوشمند برای مرطوب‌سازی این روسازی‌ها می‌توانند اثرات تبخیری را در طول موج‌های گرما به حداکثر برسانند (Kubilay et al., 2021). روسازی‌هایی که آب را داخل سیستم خود نگه می‌دارند را می‌توان به ۳ دسته تقسیم‌کرد: روسازی متخلخل، روسازی نفوذپذیر و روسازی متخلخل با درصد فضای خالی بیشتر از حد متعارف.

۳-۲-روسازی متخلخل یا Pervious Asphalt

روسازی متخلخل، که به عنوان بتن متخلخل نیز شناخته می‌شود، نوعی بتن با تخلخل بالا است که اجازه می‌دهد آب از بارش و منابع دیگر به راحتی از آن عبور کند. این ویژگی به کاهش رواناب و افزایش تغذیه آب‌های زیرزمینی کمک می‌کند (Guntakal & Selvan, 2017). بتن متخلخل معمولاً با استفاده از دانه‌های درشت و بدون دانه‌های ریز ساخته می‌شود و در کاربردهایی مانند پارکینگ‌ها، معابر پیاده‌رو و خیابان‌های مسکونی استفاده می‌شود (Selvaraj & Amirthavarshini, 2016). این نوع بتن به عنوان یک راهکار مؤثر برای کنترل آب‌های سطحی و بهبود کیفیت آب شناخته می‌شود (Soundararajan & Vaiyapuri, 2021). این نوع روسازی به عنوان یک تکنیک توسعه پایدار و کم‌اثر در مدیریت آب‌های باران در مناطق شهری مطرح است (Sprouse III et al., 2020). انواع روسازی‌های متخلخل شامل آسفالت و بتن متخلخل، سنگفرش‌های درز باز، سنگفرش‌های بتنی یا نفوذپذیر و سیستم‌های شبکه پلاستیکی یا بتنی با حفره‌های پر از شن

است. اگرچه این نوع روسازی باعث کاهش پدیده مخرب جزایر گرمایش شهری شده است، اما محققان استفاده از آن را به دلیل قابلیت سرویس‌دهی ضعیف در زیر بارهای سنگین برای شبکه‌های جاده‌ای با ترافیک کم توصیه کرده‌اند (Debnath & Sarkar, 2020). انواع رایج روسازی‌های متخلخل در شکل ۳ نشان داده شده است.

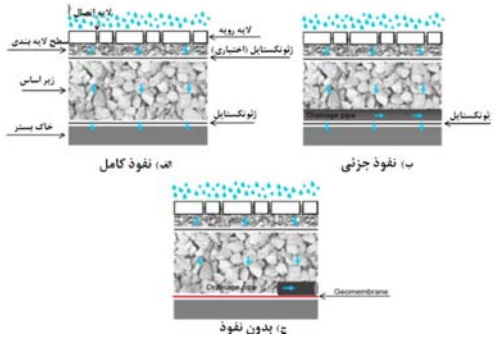


شکل ۳. انواع رایج روسازی‌های متخلخل (Sprouse III et al., 2020)

روسازی نفوذپذیر

روسازی نفوذپذیر به عنوان یک راهکار پایدار در مدیریت آب‌های سطحی و بهبود کیفیت آب شناخته می‌شود. این نوع روسازی به آب اجازه می‌دهد تا به زیرساخت نفوذ کند و از این طریق به کاهش رواناب و آلودگی کمک می‌کند. در مطالعات مختلف، نشان داده شده است که روسازی نفوذپذیر می‌تواند به طور قابل توجهی غلظت آلاینده‌ها مانند فسفر و روی را کاهش دهد. همچنین، این سیستم‌ها می‌توانند به افزایش سطح آب‌های زیرزمینی و بهبود ایمنی ترافیک از طریق افزایش مقاومت در برابر لغزش کمک کنند (HASSOUNA et al., 2024).

این روسازی از ماده یا پوششی تشکیل شده است که سیالات را جذب می‌کند یا اجازه عبور به آنها می‌دهد. سیستم روکش نفوذ پذیر در ابتدا ظرفیت نفوذ بالایی داشته و علاوه بر کاهش پدیده جزایر گرمایش شهری برای مدیریت رواناب‌های طوفانی نیز مورد توجه قرار گرفته است. با گذشت زمان، تجمع رسوبات باعث مسدود شدن منافذ و کاهش ظرفیت شده است. در راستای رفع این مشکل، اهمیت تمیزی این روسازی‌ها مورد توجه قرار گرفته است (Liu et al., 2020; Støvring et al., 2018). انواع روسازی نفوذپذیر در شکل ٤ نشان داده شده است (Tziampou et al., 2020).



شکل ٤. انواع روسازی نفوذپذیر

روسازی متخلخل با درصد فضای خالی بیشتر از حد متعارف

روسازی متخلخل به عنوان یک فناوری نوین در مدیریت آب‌های سطحی شناخته می‌شود که دارای نسبت فضای خالی بالایی است. این نوع روسازی معمولاً دارای نسبت فضای خالی بیش از ۲۰ درصد است و می‌تواند به ۲۹ درصد نیز برسد (Jendia & Krezem, 2019). این ویژگی اجازه می‌دهد تا آب باران را به راحتی جذب کرده و از ایجاد سیلاب جلوگیری کند. همچنین، روسازی متخلخل می‌تواند به عنوان یک گزینه مناسب برای کاهش اثرات منفی توسعه شهری و بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. در مقایسه با روسازی‌های سنتی، این نوع روسازی به دلیل ساختار خاص خود، انعطاف‌پذیری بیشتری دارد و می‌تواند در شرایط مختلف جوی عملکرد بهتری داشته باشد (Zoorob et al., 2017).

آسفالت متخلخل از اختلاط مخلوطی از سنگدانه‌های بزرگ‌تر با دانه‌بندی باز و مواد قیری تشکیل شده‌است که روی یک لایه غیرقابل نفوذ از سنگ خرد شده قرار دارد و زیر این لایه سنگ خرد شده برای نفوذ رواناب وجود دارد. این سیستم با زهکشی مناسب می‌تواند از چرخه‌های یخبندان و ذوب در زمستان جلوگیری کند. شکل شماتیک مقطع این نوع روسازی در شکل ۵ نشان داده شده است. تاثیر این روسازی‌ها بر دمای روسازی و جزایر گرمایش شهری بررسی شده و آشکار شد که مخلوط گرم آسفالت متخلخل به‌دلیل حفره‌های زیاد هوا مانند عایق عمل می‌کند و منجر به کاهش انتقال انرژی حرارتی از سطح به لایه‌های زیرین می‌شود. این موضوع باعث شده است که دمای مخلوط گرم آسفالت متخلخل نسبت به مخلوط آسفالت گرم و بتن سیمانی پرتلند، در طول روز بیشتر و در طول

شب کمتر باشد. مخلوط گرم آسفالت متخلخل، دمای بالای کسب شده در روز را در شب‌ها به سرعت از دست می‌دهد. بنابراین گزینه‌ای مناسب برای کاهش پدیده مخرب جزایر گرمایش شهری است (Stempihar et al., 2012).

شکل ۵. مقطع عرضی روسازی متخلخل

۳-۲-۱- روسازی بازتابنده

روسازی‌های بازتابنده به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش اثر جزیره حرارتی شهری شناخته می‌شوند. این نوع روسازی‌ها با استفاده از پوشش‌های بازتابنده، تابش نور خورشید را منعکس کرده و از افزایش دما در سطح روسازی جلوگیری می‌کنند، که به نوبه خود به بهبود راحتی حرارتی انسان کمک می‌کند (Zheng et al., 2019). تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از این پوشش‌ها می‌تواند دمای سطح روسازی را به میزان ٤ تا ٦ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد و همچنین تأثیر مثبتی بر روی دماهای محیطی داشته باشد (Middel et al., 2020).

روسازی خنک بازتابنده با استفاده از پوشش های سفید بسیار بازتابنده یا رنگدانه های رنگی انعکاسی مادون قرمز (فروسرخ)، آلبدو را افزایش و دمای روسازی را کاهش می دهند. با توجه به مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی، این نوع روسازی‌ها به عنوان یک راهکار پایدار برای مدیریت دما در مناطق شهری پیشنهاد می‌شوند.

۳-۲-۲- روسازی مهارکننده گرما

روسازی‌های مهارکننده گرما به عنوان راهکارهایی مؤثر برای کاهش اثر جزیره حرارتی شهری و بهبود راحتی حرارتی در مناطق شهری شناخته می‌شوند. این نوع روسازی‌ها با افزایش آلبیدو و کاهش دماهای سطحی، می‌توانند دماهای محیطی را به طور قابل توجهی کاهش دهند (Kappou et al., 2022). این استراتژی‌ها نه تنها به کاهش دما کمک می‌کنند، بلکه به بهبود مدیریت آب‌های سطحی و کیفیت هوا نیز می‌انجامند (Larsen, 2015). از انواع این روسازی‌ها می‌توان به روسازی آغشته به مواد تغییرفاز دهنده PCM، روسازی با رسانایی بالا و روسازی برداشت حرارت اشاره کرد.

روسازی آغشته به مواد تغییرفاز دهنده PCM

روسازی های بازتابنده باعث کاهش دمای سطح روسازی شده است. اما باعث افزایش مسائل مربوط به تابش خیره‌کننده و افزایش دمای ساختمان‌های اطراف شده است. در این راستا ساخت روسازی خنک کننده با حداقل تأثیر بر محیط پیرامونی، لازم است. ترکیب مواد تغییرفاز دهنده در روسازی ها می‌تواند دمای روسازی را کاهش دهد (Anupam et al., 2020). روسازی‌های آغشته به مواد تغییر فاز به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود عملکرد حرارتی ساختمان‌ها شناخته می‌شوند. این نوع روسازی‌ها می‌توانند به عنوان یک سیستم تهویه حرارتی غیرفعال عمل کنند و به ویژه در مناطق آفتابی، کارایی انرژی را افزایش دهند. استفاده از PCM در روسازی‌ها به کاهش نوسانات دما و بهبود راحتی حرارتی کمک می‌کند (Konuklu et al., 2015).

وقتی دمای روسازی از دمای ماده تغییرفاز دهنده سبقت گرفت، این ماده با جذب انرژی گرمایی از روسازی در دمای ذوب خود از جامد به مایع تغییر فاز پیدا می کند و منجر به کاهش دمای روسازی می‌شود (Manning et al., 2015). اگر دمای روسازی کاهش یابد این ماده با تغییر فاز خود از مایع به جامد، انرژی گرمایی ذخیره شده در خود را آزاد می کند. از گرمای نهان آزاد شده در طی تغییر فاز مایع به جامد می‌توان برای افزایش دمای روسازی و کنترل اثر یخ‌زدگی روسازی استفاده‌کرد (Anupam et al., 2020; Mahedi et al., 2019). بطور کلی، افزودن PCM باعث شده است که دمای روسازی در طول روز کندتر افزایش یابد و هنگام شب نیز دما کندتر کاهش یابد بنابراین این نوع روسازی‌ها در طول روز دمای کمتر و در طول شب دمای بیشتری نسبت به روسازی های استاندارد دارند (Hendel, 2020).

همچنین، این مواد می‌توانند در ترکیب با دیگر سیستم‌های حرارتی، مانند بام‌ها و دیوارها، به بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها کمک کنند (Li et al., 2020). در نتیجه،

روسازی‌های آغشته به PCM نه تنها به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کنند، بلکه می‌توانند به عنوان یک راهکار پایدار در طراحی ساختمان‌های مدرن مورد استفاده قرار گیرند (Imafidon & Ting, 2023).

روسازی با رسانایی بالا

روسازی با رسانایی بالا به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش اثرات جزیره حرارتی شهری و بهبود عملکرد حرارتی جاده‌ها شناخته می‌شود. این نوع روسازی می‌تواند دماهای بالای سطح جاده را کاهش دهد و در نتیجه از آسیب‌های ناشی از گرما مانند ترک‌خوردگی و فرسایش جلوگیری کند (Pan et al., 2022). استفاده از مصالح با رسانایی حرارتی بالا، مانند بتن‌های پایه سیمانی با خواص ترموالکتریکی، می‌تواند به تبدیل حرارت به انرژی الکتریکی مفید کمک کند. همچنین، ترکیب لایه‌های عایق و سطح با بازتابندگی بالا می‌تواند به کاهش دما در عمق روسازی کمک کند و عمر مفید آن را افزایش دهد (Wei et al., 2021).

اگر هدایت حرارتی روسازی زیاد باشد، حرارت سطح روسازی به سرعت به لایه‌های زیرین انتقال می‌یابد. خاک بستر به دلیل منافذ ریز و رطوبت، ظرفیت گرمایی نهان بالاتری داشته که با انتقال حرارت به این لایه، دمای سطح روسازی کاهش می‌یابد. موادی مانند گرافیت، الیاف کربن، الیاف فولاد، کربن سیاه، سنگدانه‌هایی مانند سرباره فولاد و یا میله‌های فلزی با رسانایی حرارتی بالا، منجر به افزایش رسانایی حرارتی روسازی آسفالتی می‌شود (Jiao et al., 2020). همچنین، استفاده از بتن‌های نفوذپذیر با دانه‌های سرباره کوره بلند، به دلیل ساختار باز و مقاومت بالا، می‌تواند به بهبود کیفیت و عملکرد روسازی کمک کند (Sicakova & Kovac, 2024). این فناوری‌ها نه تنها به بهبود شرایط جاده‌ها کمک می‌کنند، بلکه به توسعه پایدار و تولید انرژی تجدیدپذیر نیز منجر می‌شوند.

روسازی برداشت حرارت

روسازی‌های برداشت‌کننده انرژی شامل روسازی‌های فتوولتائیک، ترموالکتریک و پیزوالکتریک هستند که به ترتیب با نور خورشید، حرارت و ارتعاشات مکانیکی ناشی از ترافیک برق تولید می‌کنند. روسازی برداشت حرارت به طور مستقیم، حرارت را از ساختار روسازی برداشت می‌کند. روسازی‌های برداشت حرارت و فتوولتائیک را می توان روسازی خورشیدی یا روسازی جمع‌کننده خورشیدی نامگذاری کرد (Papadimitriou et al., 2019; H. Wang et al., 2018). روسازی جمع کننده خورشیدی شامل لوله‌هایی حاوی سیال است که در لایه های بالای روسازی قرار گرفته اند. تابش خورشید باعث گرم شدن روسازی می شود و این گرما به سیال در گردش منتقل می‌شود. از مزایای روسازی گردآورنده خورشیدی کاهش دمای روسازی است که منجر به کاهش پدیده جزایر گرمایش شهری می‌شود (El-Maaty, 2017; Nasir et al., 2017).

روسازی فتوولتائیک از پانل‌های فتوولتائیک نصب شده بر سطح روسازی آسفالتی ساخته شده است که از آن در راستای برداشت انرژی خورشیدی در شرایط ترافیکی کم استفاده شده است. مقایسهٔ روسازی فتوولتائیک با روسازی آسفالتی متعارف نشان داد که روسازی فتوولتائیک، دمای سطح را در تابستان، ۳ تا ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش داده است و در شرایط آب و هوایی مختلف، ۱۱ تا ۱۲ درصد، حرارت کمتری تولید می‌کند (Xie & Wang, 2021). برداشت انرژی حرارتی از سطح روسازی نسبت به بقیه مدل‌های روسازی خنک، کاربردی‌تر است زیرا نه تنها روسازی خنک می‌ماند بلکه انرژی تجدیدپذیر مهار می‌گردد (Qin, 2015).

٤- پتانسیل روسازی در برداشت انرژی‌های حرارتی

استفاده مداوم از سوخت‌های فسیلی به عنوان منبع اصلی تولید برق یکی از عوامل اصلی گرمایش جهانی است. در طول سال‌های گذشته، تلاش‌های زیادی جهت یافتن جایگزین‌های انرژی پایدار، سازگار با محیط‌زیست و پاک انجام شده است. روسازی می‌تواند به عنوان یک منبع مهم برای برداشت انرژی‌های حرارتی در نظر گرفته شود. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که برداشت انرژی حرارتی از روسازی آسفالت می‌تواند به عنوان یک راهکار پایدار و دوستدار محیط زیست برای تولید انرژی مورد استفاده قرار گیرد (Al-Qadami et al., 2022). این فناوری به ویژه در مناطق با تابش خورشیدی بالا، می‌تواند به طور مؤثری انرژی حرارتی را از تابش خورشید جمع‌آوری کند (Rejab et al., 2023). همچنین، سیستم‌های مختلفی برای بهینه‌سازی برداشت انرژی از روسازی توسعه یافته‌اند که شامل استفاده از مواد و پیکربندی‌های خاص برای افزایش

کارایی است (Rejab & Johar, 2022). این پیشرفت‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای روسازی در تبدیل حرارت به انرژی الکتریکی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است.

امروزه برداشت انرژی خورشیدی از جاده ها با هدف تولید انرژی گرمایی یا الکتریسیته مورد بررسی قرارگرفته‌است. انرژی حرارتی با هدف ذوب برف و یخ جاده‌ها و گرمایش ساختمان‌ها از طریق گردآورنده‌های خورشیدی، برداشت می‌شود. انرژی الکتریسته نیز از طریق سیستم های ترموالکتریک و فتوولتائیک تولید می‌شود (Zhou et al., 2019).

٤-١- سیستم گردآورنده خورشیدی

اثر جزیره گرمایی شهری زمانی مشاهده می‌شود که دمای سطح آسفالت تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد در طول تابستان افزایش می‌یابد. در نتیجه افزایش استفاده از تهویه مطبوع، مصرف انرژی در شهرها افزایش می‌یابد و کیفیت هوا بدتر می‌شود. گردآورنده‌های خورشیدی آسفالتی از لوله‌های مدفون تشکیل شده‌اند که سیال در گردش را حمل می‌کنند. تابش خورشید باعث افزایش دمای روسازی می‌شود. گرما از روسازی به سیال منتقل می‌شود و باعث افت دمای آسفالت و افزایش دمای سیال می‌شود. چیزی که گردآورنده‌های خورشیدی آسفالت را بسیار قابل توجه می‌کند، توانایی آن‌ها در تولید انرژی از افزایش دمای سیال است (Abbas & Alhamdo, 2023).

در روسازی‌ها، سیستم‌های برداشت انرژی خورشیدی می‌توانند به طور متوسط ۲۳/۷ وات در هر متر مربع انرژی تولید کنند، که این مقدار تحت شرایط آفتابی و در طول ٦ ساعت در روز قابل دستیابی است (Hossain et al., 2021). در مقایسه، یک سیستم برداشت انرژی خورشیدی برای دستگاه‌های پوشیدنی می‌تواند بسته به شرایط نوری، بین ۲۷/۸ تا ۱۵۹/۱ میلی‌وات انرژی تولید کند (Páez-Montoro et al., 2022). این مقادیر نشان‌دهنده پتانسیل بالای برداشت انرژی از طریق روسازی‌ها است، که می‌تواند به بهبود کارایی و کاهش نیاز به شارژ مکرر باتری‌ها کمک کند. طراحی مناسب مخلوط‌های آسفالتی و توجه به پتانسیل تغییر شکل دائمی آن‌ها در دماهای بالا از جمله چالش‌های اصلی در این سیستم‌ها به شمار می‌رود (Pasetto et al., 2022).

گردآورنده‌های خورشیدی آسفالت به عنوان یک منبع انرژی تجدید پذیر امیدوارکننده ظاهر شده‌اند که یک راه حل عملی برای تولید انرژی‌های تجدید پذیر ارائه داده و در نتیجه اتکا به سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهند (Abbas & Alhamdo, 2024).

٤-١-١- روسازی آسفالتی هیدرونیک

روسازی آسفالتی هیدرونیک به عنوان یک فناوری نوین برای جمع‌آوری انرژی حرارتی از سطح آسفالت توسعه یافته است. این سیستم‌ها با استفاده از لوله‌های حاوی مایعات در زیر سطح آسفالت، حرارت را از تابش خورشید جذب و ذخیره می‌کنند. هدف اصلی این فناوری، جلوگیری از یخ‌زدگی و برف‌زدایی سطح آسفالت در فصل‌های سرد است (Beddu et al., 2024). تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از این فناوری می‌تواند عمر مفید روسازی را تا ۳ تا ۵ سال افزایش دهد و از بروز آسیب‌های ساختاری مانند ترک‌خوردگی و فرسودگی جلوگیری کند (Ghalandari et al., 2023).

سیستم گردآورنده خورشیدی که شامل یک لایه روسازی و لوله است توسط بونت و جانسون در سال ۲۰۰٦ پیشنهاد شد (De Bondt & Jansen, 2006). این سیستم شامل یک شبکه سه بعدی برای حفاظت از لوله ها هنگام فشرده شدن و دو مخزن آب گرم و سرد است. عملکرد این سیستم بدین گونه است که در تابستان آب سرد داخل لوله ها جریان می یابد و انرژی حرارتی از بتن آسفالتی به لوله ها انتقال می یابد و دمای آب زیاد می شود و آب به مخزن آب گرم منتقل می شود سپس می تواند در ساختمان‌های مسکونی، تجاری و صنعتی استفاده شود. همچنین با کاهش دمای روسازی از شیارافتادگی جلوگیری شده و عمر روسازی افزایش می یابد. برعکس در زمستان، آب گرم در داخل لوله ها جریان می یابد و سطح رویهٔ روسازی گرم می شود. دمای آب کاهش یافته، به منبع آب سرد منتقل شده و برای خنک کردن ساختمان‌های مسکونی، تجاری، صنعتی استفاده می‌شود. این سیستم دوست‌دار محیط‌زیست است زیرا گرم کردن روسازی در زمستان باعث کاهش استفاده از نمک می‌شود. همچنین گرم کردن ساختمان‌ها به معنی کاهش مصرف سوخت فسیلی و کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن است.

از معایب گردآورنده خورشیدی با لوله می‌توان به مشکلات هنگام نصب یا خوردگی لوله‌های فلزی اشاره‌کرد. اگر یک نقص

کوچک در لوله به وجود آید، برای تعمیر آن باید خط لوله برداشته شده و آن ناحیه مجددا آسفالت گردد. همچنین، نشت آب می‌تواند در اتصالات لوله‌ها تحت بار ترافیکی، ایجاد شود (Chiarelli et al., 2015a).

٤-١-٢- آسفالت متخلخل

آسفالت متخلخل به عنوان یک جزء کلیدی در سیستم‌های آسفالت هیدرونیک شناخته می‌شود. این نوع آسفالت به دلیل ساختار باز و قابلیت نفوذ آب، به بهبود عملکرد سیستم‌های هیدرونیک کمک می‌کند و می‌تواند به کاهش دما در عمق آسفالت کمک کند (Saleh et al., 2020). با این حال، عملکرد آن تحت تأثیر دما و شرایط مختلف قرار دارد و نیاز به بهینه‌سازی دارد تا از حداکثر پتانسیل خود بهره‌برداری شود (Luxman et al., 2019).

فناوری روسازی چند لایه با لایه میانی بسیار متخلخل به جای گردآورنده‌های خورشیدی با شبکه لوله ایجاد شده است. درصد فضای خالی تا ۲۷ درصد در نظر گرفته شده است تا سیال بتواند در آن به گردش درآید. این نوع روسازی به آسانی نصب شده و تعمیر نگهداری مناسب‌تری دارد. از نظر کارایی حرارتی این آسفالت متخلخل، بازده انتقال حرارتی بالایی داشته و افزودن گرافیت برای افزایش خواص حرارتی آسفالت، ضروری نیست. اسفور و همکاران در سال ۲۰۱٦ (Asfour et al., 2016)، یک سیستم گرمایش هیدرونیک را برای جلوگیری از تشکیل یخ در سیستم جاده ارائه دادند که در آن یک مایع گرم شده از طریق یک لایه آسفالت متخلخل به گردش در می‌آید. در این تحقیق برای بررسی تبادل گرما بین سیال و سطح راه از یک مدل ترموهیدرولیکی استفاده شد. مطالعه حساسیت توزیع دما در سطح جاده نشان داده است که پارامترهای موثر در این راستا عبارتند از هدایت هیدرولیکی لایه آسفالت متخلخل، دمای تزریق مایع و ظرفیت گرمایی. در نهایت، استفاده از آسفالت متخلخل در سیستم‌های هیدرونیک می‌تواند به افزایش پایداری و کارایی این سیستم‌ها کمک کند (Pan et al., 2015).

٤-١-٣- روسازی برداشت انرژی با هوا

در راستای برداشت انرژی خورشیدی در روسازی، نقص اصلی سیستم لوله حاوی مایع، اتصال تمامی لوله ها به یکدیگر است. اگر یکی از آن‌ها شکسته شود، مایع خارج شده و موجب خرابی بتن آسفالتی شده است. بدین منظور، محققان استفاده از مجاری هوا را پیشنهاد دادند که در آن جریان هوا از طریق یک لایه هدایت‌کننده هوا مانند لایه متخلخل عبور داده می شود. با اتصال این مجاری هوا می‌توان از اختلاف دمای بین روسازی و محیط در راستای ایجاد جریان هوا استفاده‌کرد که این جریان هوا به توربین‌های بادی، اجازه تولید انرژی داده است. همچنین دمای سطح روسازی را در تابستان خنک و در زمستان گرم نگه می‌دارد.

در نمونهٔ اولیه روسازی برداشت انرژی با هوا، انرژی حرارتی موجود در روسازی به‌دلیل جریان طبیعی همرفتی از طریق لوله‌های تعبیه شده در ساختار روسازی جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد میزان برداشت انرژی به ارتفاع و قطر دودکش بستگی دارد و ترکیب بهینه ی آن ها باید مورد استفاده قرار گیرد (Chiarelli et al., 2015b). نتایج نشان داد که با افزایش دمای آسفالت و افزایش ارتفاع دودکش، جریان هوای دودکش افزایش یافته است و این جریان هوا، دمای روسازی آسفالتی را تقریبا ۱۰ درصد کاهش داده است (García & Partl, 2014). چارلی و همکاران (Chiarelli et al., 2015a) در سال ۲۰۱۵ نمونه‌ای از یک روسازی دولایه توسعه دادند که در آن لوله‌های فولادی ضدزنگ سوراخ‌دار درون لایه‌ای از سنگ‌ریزه آهکی مدفون شده و بر روی آن، یک لایه آسفالت متراکم قرار گرفته‌است. این لوله‌ها به یک دودکش متصل شده‌اند. با تابش نور مادون قرمز، گرما از میان لایه‌های روسازی عبور کرده و به هوای درون لوله‌ها منتقل می‌شود. سپس، هوا به واسطه جریان طبیعی همرفتی درون دودکش به حرکت درمی‌آید. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی این سیستم نشان داد که می‌تواند دمای سطح روسازی را تا ٦ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد و در نتیجه، در کاهش اثر جزیره گرمایش شهری مؤثر باشد (Chiarelli et al., 2017).

٤-٢- روسازی فتوولتائیک

با پیشرفت فناوری و کاهش هزینه سلول‌های فتوولتائیک، نوع جدیدی از جاده‌های خورشیدی یا جاده‌های فتوولتائیک در راستای کاهش پدیده جزایرگرمایش شهری مورد توجه قرارگرفته است. آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها، کاهش دمای سطح روسازی فتوولتائیک و همچنین دمای محیط اطراف روسازی

فتوولتائیک را نسبت به روسازی‌های معمول نشان داده است (Efthymiou et al., 2016). در این نوع روسازی، پنل‌های خورشیدی جایگزین لایه‌های روسازی شده است. هدف از روسازی فتوولتائیک، تبدیل نور خورشید به انرژی الکتریکی با پنل های خورشیدی است. ایده استفاده از این نوع روسازی‌ها به جای روسازی‌های معمول، اولین بار توسط بروساو و همکاران (Brusaw & Brusaw, 2014) مطرح‌شد. آن‌ها یک پنل شش ضلعی را اختراع کردند که قادر به تحمل ۱۲۵ تن بود که می‌توان از آن در راه‌ها برای عبور خودروها استفاده کرد. در سال ۲۰۱٤ هلند اولین جاده خورشیدی را که توسط صفحات خورشیدی با روکش شیشه‌ای پوشیده شده بود را مخصوص دوچرخه‌سواران ساخت (MacDonald, 2015). سه سال بعد در مطالعه دیگری براساس داده‌هایی که در سال اول از مسیر دوچرخه سواری ۷۰ متری در هلند برداشت شده بود، بازده انرژی نظری را با بازده انرژی اندازه‌گیری شده مقایسه کردند. نتایج پیش‌بینی شده به نتایج واقعی نزدیک بود. بازده انرژی سالیانه ۸۵ تا ۹۰ کیلووات ساعت بر مترمربع بر اساس بهترین ماژول عملکرد مد نظر است که این مقدار در نقاط مختلف جهان متفاوت است اما در مطالعات نظری بازده انرژی سالیانه تا ۱۵۰ کیلووات ساعت بر متر مربع را هم برای روسازی فوتوولتائیک واقع‌بینانه دانستند (Shekhar et al., 2018).

مدل‌های نظری در راستای محاسبه بازده انرژی سالانه جاده خورشیدی در سال ۲۰۱۵ در هلند توسعه داده شد. مقدار انرژی برابر با ۸٤ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال با بازده کلی ۸/٦ درصد بدست‌آمد (Shekhar et al., 2015). اولین جاده خورشیدی مخصوص خودرو با طول یک کیلومتر از ۲۸۰۰ متر مربع صفحه خورشیدی در سال ۲۰۱٦ ساخته شده است. نتایج نشان داده است که برق تولید شده از این جاده برای روشن کردن چراغ های خیابان در شهرک نرماندی کافی است. استفاده از سلول‌های فتوولتائیک در یک چهارم جاده‌های فرانسه، می‌تواند کشور فرانسه را از انرژی بی‌نیاز نماید (Pultarova, 2017). ژا و همکاران (Zha et al., 2016)، یک نوع روسازی خورشیدی با صفحه توخالی پیشنهاد دادند. ابعاد صفحه توخالی بعد از بهینه‌سازی با نرم‌افزار انسیس، ۵۰×۵۰ سانتی‌مترمربع تعیین‌شد که ضخامت صفحه‌ی محافظ شفاف سطحی ۲ سانتی متر و ضخامت پایه توخالی بتنی پیش ساخته ۲۳ سانتی‌متر بدست‌آمد. در سال ۲۰۱۷ در بزرگراه جینان چین، اولین بزرگراه فتوولتائیک ساخته شد. طول این بزرگراه ۱۰۸۰ متر است که برای هر مترمربع از آن حدود ۷۰۰۰ یوان هزینه شد.

دزفولی و همکاران (Dezfooli et al., 2017) در سال ۲۰۱۷، دو نمونه پنل خورشیدی و روسازی خورشیدی ساختند. نمونه پنل خورشیدی، سلول خورشیدی جاسازی شده در لاستیک و پلکسی گلاس و نمونه روسازی خورشیدی، سلول خورشیدی جاسازی شده بین دو لایه لاستیکی متخلخل بوده است. مشاهده شده است که با اضافه کردن یک لایه سلول خورشیدی و روسازی خورشیدی لاستیکی، پارامتر مقاومت و تولید برق افزایش یافته است. افزایش تمرکز تابش خورشید روی سلول‌های خورشیدی بوسیله عدسی‌های فرنل و بازتابنده‌های سهموی، تولید انرژی الکتریکی را افزایش می‌دهد که منجر به بهبود عملکرد اقتصادی سیستم می شود. دو نقص اساسی در استفاده از این سیستم وجود دارد. مورد اول متمرکزکننده‌های خورشیدی باعث می‌شود تابش خورشید بصورت غیریکنواخت به سلول های خورشیدی وارد شود که منجر به مقاومت الکتریکی غیر یکنواخت و کاهش راندمان می‌شود. مورد دوم تمرکز تابش خورشید و دمای بالای محیط منجر به گرمای بیش از حد سلول خورشیدی می شود که راندمان سیستم را کاهش می دهد. خنک‌سازی توسط جریان طبیعی همرفتی نمی‌تواند دمای سلول را به مقدار قابل قبولی برساند. به همین دلیل روش هایی برای خنک‌سازی پیشنهاد شده‌است. سیستم خورشیدی هیبریدی فتوولتائیک/حرارتی یکی از آن روش ها است. برخلاف روش فتوولتائیک که فقط بخشی از انرژی خورشیدی را به برق تبدیل می‌نماید، گردآورنده های فتوولتائیک/حرارتی، بهترین بازدهی را در راستای تولید برق و حرارت از انرژی خورشیدی ارائه داده است (Yuan et al., 2018). سیستم هیبریدی از پنل‌های فتوولتائیک و سیستم خنک‌کننده‌ای که با گردش آب یا هوا منجر به خنک کردن سلول‌های خورشیدی می‌شود تشکیل شده است.

یوان و همکاران (Yuan et al., 2018) عملکرد سیستم فتوولتائیک/حرارتی مبتنی بر لوله آب، سیستم فتوولتائیک/حرارتی با آرایش لوله حرارتی میکرو کانال و سیستم ماژول فتوولتائیک معمولی را در دمای بالا مورد بررسی قرار دادند. راندمان الکتریکی در این سیستم ها به ترتیب ۱۰ تا ۱۱/۲ درصد، ۷/۷ تا ۹/٦ درصد و ۷ تا ۸/٦ درصد بدست‌آمد.

چیانگ و همکاران (Xiang et al., 2020) در سال ۲۰۲۰، جاده فتوولتائیک/حرارتی جدیدی را پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که بهره‌وری این سیستم، ۳/۹۵ برابر بهره‌وری جاده خورشیدی است. ژو و همکاران (Zhou et al., 2021) در سال ۲۰۲۱ ، به‌دلیل عمر کوتاه و راندمان پایین سیستم سلول‌های فتوولتائیک بدون اتلاف گرما، سیستم روسازی یکپارچه فتوولتائیک/حرارتی را ارائه دادند که از ترکیب دو سیستم فتوولتائیک و برداشت انرژی گرمایی است. نتیجه این طراحی، بهبود بهره‌وری استفاده از انرژی خورشیدی بصورت کامل و افزایش عمر سلول‌های فتوولتائیک بوده است.

در مطالعه‌ای توسط لی و همکاران (Li et al., 2022) در سال ۲۰۲۲، فناوری حرارتی فتوولتائیک یکپارچه روسازی برای تولید انرژی الکتریکی و حرارتی به طور همزمان استفاده شد. با استفاده از مدل ریاضی، عملکرد سیستم با استفاده از شبیه‌سازی در سه شرایط آب و هوایی معمولی یعنی آفتابی، نیمه‌ابری و ابری بررسی شد. بازده انرژی کلی روزهای آفتابی، نیمه ابری و ابری به ترتیب ۳۳/۱۰، ۳٤/۷٤ و ۱۸/٦۰ درصد است که نشان می‌دهد سیستم فتوولتائیک/حرارتی در روزهای آفتابی و روزهای نیمه‌ابری عملکرد خوبی دارد، در حالی که عملکرد کلی در روزهای ابری رضایت‌بخش نیست.

در مطالعه‌ای توسط ژو و همکاران (Zhou et al., 2020) پتانسیل یک سیستم یکپارچه فتوولتائیک/حرارتی، مورد ارزیابی قرار گرفت. یک بلوک واحد از ساختار توخالی پرینت سه بعدی با استفاده از مواد پلاستیکی با شیشه سکوریت به عنوان لایه محافظ و پلاستیک ABS در این مقاله استفاده شده است. یک آزمایش برای بررسی تأثیر روش اتلاف گرما شامل لوله‌های پر از آب بر راندمان تولید برق سلول‌های فتوولتائیک انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که لوله‌های گردش آب معرفی‌شده تأثیر ناچیزی بر پاسخ مکانیکی بلوک‌های واحد روسازی فتوولتائیک داشتند. سیستم فتوولتائیک/حرارتی می‌تواند دمای پنل خورشیدی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد و افت دما می‌تواند تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد باشد.

مطالعه‌ای توسط زی و وانگ (Xie & Wang, 2021) با هدف ارزیابی مزایای بالقوه روسازی فتوولتائیک برای کاهش اثر جزیره گرمایی شهری انجام شد. ابتدا مدل‌های انتقال حرارت برای روسازی‌های عادی و فتوولتائیک توسعه یافتند. سپس دمای سطح روسازی و خروجی حرارت از سطح روسازی به محیط نزدیک به سطح محاسبه شد که به عنوان شاخص سهم روسازی در اثر جزیره گرمایی شهری مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه روسازی فتوولتائیک و روسازی معمولی نشان می‌دهد که روسازی فتوولتائیک می‌تواند دمای سطح را ۳ تا ۵ درجه سانتی‌گراد در تابستان کاهش دهد و ۱۱ تا ۱۲ درصد خروجی حرارت کمتری را در شرایط مختلف آب و هوایی ایجاد کند.

در مطالعه‌ای توسط رحمان (M. Rahman et al., 2023) در سال ۲۰۲۳، یک طرح نوآورانه برای نمونه اولیه سیستم برداشت انرژی بر اساس صفحات خورشیدی فتوولتائیک لایه نازک پیشنهاد شد. علاوه بر این، امکان استفاده از توان تولیدی سیستم پیشنهادی برای روشن کردن گذرگاه عابر پیاده برای افزایش ایمنی یک تقاطع در سطح نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نمونه اولیه طراحی شده از یک صفحه خورشیدی لایه نازک، یک پوشش شفاف برای محافظت از پنل خورشیدی و یک قاب چوبی برای پشتیبانی از پانل و توزیع بار تشکیل شده است. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی می‌تواند بارهای ساختاری یک چرخ متحرک را بدون شکست تحمل کند. نتایج تجربی این مطالعه نشان داد که با در نظر گرفتن هفت ساعت کارکرد در یک روز آفتابی معمولی، سیستم پیشنهادی می‌تواند در طول ۷ ساعت کارکرد (۹ صبح تا ٤ بعد از ظهر) از ۳۰٤/۸ میلی‌متر در ۳۰٤/۸ میلی‌متر پانل خورشیدی روسازی، تقریباً ٦۹۹ وات ساعت برق تولید کند.

در مطالعه‌ای توسط رام و همکاران (Ram & Verma, 2024) در ۲۰۲٤، جدیدترین نوآوری‌ها و روش‌های ساخت و همچنین کارایی به‌دست‌آمده در چندین نسل از سلول‌های فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد اگرچه انواع جدیدی از سلول‌های خورشیدی ظهور کرده‌اند، سلول‌های سیلیکونی همچنان بر بازار تسلط دارند.

با توجه به مطالعات انجام شده، می‌توان نتایج زیر را از پیشرفت‌ها و تحقیقات مختلف در زمینه انرژی خورشیدی و روسازی‌های فتوولتائیک استنباط کرد:

– افزایش بهره‌وری و عملکرد سیستم‌های خورشیدی در طی سال‌ها و توسعه سیستم‌های جدید مانند سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی

– پیشرفت در طراحی و ساخت پنل‌ها و روسازی‌ها

– نوآوری‌های جدید در مواد و تکنولوژی، نوآوری‌هایی مانند سلول‌های خورشیدی

– مزایای محیطی و کاهش اثرات زیست‌محیطی، مانند کاهش اثرات جزیره گرمایی شهری و کاهش دما

٤-۳- سیستم مولد ترموالکتریک

اثر ترموالکتریک شامل سه پدیده مهم اثر سیبک، اثر پلتیر و اثر تامسون می‌باشد. اختلاف دما، باعث ایجاد پتانسیلی الکتریکی می‌شود که قادر است در یک مدار بسته، جریان الکتریکی ایجاد کند. این پدیده، امروزه به عنوان اثر سیبک معروف است.

فناوری های ترموالکتریک برای هدایت گرما به دو دسته با سیستم مایع و سیستم جامد تقسیم می‌شوند. در سیستم مایع، گرمای روسازی توسط لوله‌ها جمع‌آوری می‌شود و مایع درون لوله ها گرم می شود و از اختلاف دمای مایع گرم و مایع سرد، برق تولید می‌شود. در سیستم جامد، گرما از روسازی توسط یک جامد همچون صفحه آلومینیومی به مولد ترموالکتریک هدایت می شود و از اختلاف دمای آلومینیوم و قسمت های سرد عمیق تر روسازی، برق تولید خواهد شد (Zhu et al., 2019).

اکثر تحقیقات به افزایش راندمان روسازی با لوله گذاری و ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی اختصاص یافته بود تا اینکه هصب (Hasebe et al., 2006) در سال ۲۰۰٦، مطالعه‌ای در زمینه برداشت انرژی الکتریکی از این لوله ها انجام داد. در این روش لوله های جمع‌آوری حرارت در زیر روسازی قرار می گیرد و گرمای روسازی به آب درون لوله ها انتقال می یابد. آب سرد از رودخانه نزدیک جاده پمپاژ می شود و درنهایت از اختلاف دمای آب گرم و سرد در مولد ترموالکتریک، برق تولید می‌شود. لوله با نرخ جریان ۰/۷ لیتر در دقیقه، تحت اختلاف دمای ۲٦ درجه سانتی‌گراد، ۳/٦ وات الکتریسیته تولید خواهد کرد که راندمان سیستم را می توان با افزایش نرخ جریان آب گرم و افزایش اختلاف دمای بین آب گرم و آب سرد بهبود داد.

از معایب سیستم مولد ترموالکتریک در روسازی با روش لوله گذاری، تاثیر منفی بر استحکام سازه روسازی، هزینه‌ی بالای تعمیر و نگهداری، شکستگی لوله و تراوش مایعات و درنهایت کاهش عمر جاده است. ایده استفاده از لوله های هوا و استفاده از ماژول انتقال حرارت همانند ورق آلومینیوم در سیستم ترموالکتریک برای رفع این نواقص ارائه شده است (Guo & Lu, 2017; Zhu et al., 2019).

در فناوری‌های ترموالکتریک، به‌جای استفاده از لوله، ماژول های ترموالکتریک را مستقیماً در لایه های روسازی نصب می‌کنند. رو (Rowe, 2018) در کتاب راهنمای ترموالکتریک نشان داد که وجود ۵ درجه‌سانتی‌گراد گرادیان دما در بین لایه‌های روسازی، ۲۵۰ مگاوات برق تولید خواهدکرد. پارک و همکاران (Park et al., 2014) در سال ۲۰۱٤، یک سیستم متشکل از مبدل حرارتی و مولد ترموالکتریک را مورد بررسی قرار دادند. در حالتی‌که مولد ترموالکتریک دارای بهترین پیکربندی است، به میزان ٤۲ میلی‌وات برق تولید می‌کند. همچنین کنترل جریان گرما و انتقال مناسب حرارت از روسازی به مولد ترموالکتریک تاثیر زیادی بر راندمان سیستم دارد. هو و همکاران (Zhu et al., 2019) در سال ۲۰۱٤، یک سیستم برداشت انرژی ترموالکتریک از روسازی آسفالتی شامل روسازی آسفالتی رسانای گرما، ورق‌های آلومینیومی برای انتقال حرارت، سیستم تولید برق مانند مولد ترموالکتریک و یک سیستم ذخیره و تبدیل انرژی الکتریکی مانند مبدل تقویت کننده و باتری، طراحی کردند. شبیه سازی دینامیکی و آزمایش میدانی، تاثیر مثبت انتقال گرما از طریق ورق های آلومینیومی را نشان داده است. ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد اختلاف دما در این سیستم، ۱/۱ ولت برق تولید خواهدکرد.

گو و همکارش در سال ۲۰۱۷ (Guo & Lu, 2017) یک مطالعه مروری در راستای برداشت انرژی با فناوری‌های پیزوالکتریک و ترموالکتریک انجام دادند. نتایج حاصل از این مطالعات را بر روی شبکه جاده‌ای فلوریدا تعمیم دادند و پتانسیل تولید انرژی الکتریکی را برای این جاده با کمک هر دو فناوری بررسی کردند. با توجه به شرایط آب‌وهوایی و ترافیک فلوریدا، اگر کل شبکه جاده های آن با سیستم روسازی لوله/مولد ترموالکتریک پوشیده شود روزانه می تواند، ۵۵ گیگاوات ساعت انرژی الکتریکی تولید کند. یک سیستم مبدل پیزوالکتریک، ٤/۰٤ مگاوات ساعت انرژی الکتریکی در روز تولید می کند. با در نظر گرفتن هزینه‌های دو سیستم، سیستم مبدل پیزوالکتریک فقط در جاده های با حجم ترافیک بسیار زیاد توجیه پذیر است در غیر اینصورت سیستم روسازی لوله/مولد ترموالکتریک اقتصادی‌تر است.

دتا و همکاران (Datta et al., 2017) در سال ۲۰۱۷، مطالعه‌ای در شرایط آب‌وهوایی جنوب تگزاس انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داده است که مولد ترموالکتریک با ابعاد ٦٤ در ٦٤ میلی‌مترمربع که در خاک بستر شانه راه قرارگرفته است، ۱۰ مگاوات برق تولید خواهدکرد.

ژینگ و همکاران (Jiang et al., 2017) در سال ۲۰۱۷، مجموعه جدیدی از سیستم مولد ترموالکتریک جاده‌ای را پیشنهاد دادند که در زمستان دال مخلوط آسفالتی با ابعاد ۳۰۰ در ۳۰۰ میلی‌مترمربع برای اختلاف دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد، قادر به تولید ۰/٤ ولت انرژی بود درحالی‌که در تابستان با اختلاف دمای ۲۵ الی ۳۰ درجه سانتی‌گراد، ولتاژ خروجی ۰/٦ تا ۰/۷ ولت حاصل شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت یک جاده با عرض ۱۰ متر و طول ۱ کیلومتر، طی ۸ ساعت، ۱٦۰ کیلووات ساعت انرژی تولید می‌کند.

ژینگ و همکاران (Jiang et al., 2018) در سال ۲۰۱۸، نمونه‌ای شامل محفظه‌های بخار آلومینیوم در راستای انتقال حرارت روسازی، مولد ترموالکتریک برای تولید برق و یک مخزن آب در سمت سرد ژنراتور ترموالکتریک به جهت کاهش دما، ساختند. نتایج نشان داد این سیستم در فصول گرم، ۸ الی ۹ درجه‌ی سانتی‌گراد، دمای روسازی را کاهش داده است و از روسازی با ابعاد ۳۰۰ × ۳۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر مکعب، به میزان ۰/٥٦٤ ولت برق تولید شد. با این پتانسیل برای ۱۰۰۰۰ مترمربع روسازی، می‌توان در حدود ۳۳ کیلووات ساعت انرژی الکتریکی در یک روز تابستان تولید کرد.

تهامی و همکاران (Tahami et al., 2019) در سال ۲۰۱۹ یک نمونه متشکل از سیستم‌های گردآورنده گرما، مولد برق حرارتی و یک ماژول خنک‌کننده ساختند. نتایج نشان داد کارایی سیستم با بهبود ماژول خنک کننده با استفاده از مخزن حرارتی تغییر دهنده فاز، افزایش یافت. نمونه اولیه بهینه شده بطور میانگین به میزان ۲۹ مگاوات برق با توجه به شرایط جنوب تگزاس تولید می‌کند که می‌تواند یک منبع الکتریسیته برای سنسورهای بی‌سیم کنار جاده باشد. همیچنین، تهامی و همکاران (Tahami et al., 2020) در سال ۲۰۲۰، یک سیستم برداشت‌کننده انرژی ترموالکتریک جدید معرفی کردند. این سیستم شامل مولد ترموالکتریک، صفحه رسانای حرارتی ال شکل، گرماگیر پر شده با مواد تغییر فازدهنده و یک جعبه عایق است. آن‌ها تاثیر نوع و تعداد ماژول مولد ترموالکتریک، دمای دال آسفالتی و تنظیمات مولد ترموالکتریک را بر توان خروجی سیستم، مورد بررسی قرار دادند. حداکثر و حداقل توان خروجی برای دال آسفالتی در دمای ٦۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ٤۷/۱٤ میلی‌وات و ۱۸/۹ میلی‌وات بدست‌آمد. در نتیجه استفاده از سیستم برداشت‌کننده انرژی ترموالکتریک در مناطق گرمسیری یا نسبتا گرمسیری توجیه‌پذیر است و می‌تواند انرژی لازم در راستای روشنایی تجهیزات الکتریکی کم‌مصرف در راه‌ها را فراهم کند.

در مطالعه‌ای توسط یوان و همکاران (Yuan et al., 2022) در سال ۲۰۲۲، یک سیستم ژنراتور ترموالکتریک بر اساس اثر سیبک پیشنهاد شد که حرارت روسازی آسفالت را به برق تبدیل می‌کند. سیستم ژنراتور ترموالکتریک جاده شامل روسازی آسفالت، یک ژنراتور ترموالکتریک و یک ماژول سمت سرد بود. شبیه سازی المان محدود برای بررسی منطقی بودن ساختار اصلی روسازی آسفالتی استفاده شد. تولید برق و عملکرد جاده از طریق ترکیبی از آزمایش‌های داخلی و خارجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که سیستم ژنراتور ترموالکتریک جاده پیشنهادی که مساحت ۹۰۰ سانتی‌متر مربع را پوشش می‌دهد، می‌تواند حداکثر ولتاژ ٦/۲۰۷ ولت و حداکثر توان ۷۰۰/٤۹ میلی‌وات تولید کند. حداکثر چگالی توان آن ۵/۱۳٦ است که ۷۰/۰٦ درصد بیشتر از بهترین سیستم ژنراتور ترموالکتریک جاده موجود است.

در مطالعه دیگری توسط یوان و همکاران (Yuan et al., 2023) در سال ۲۰۲۲، توسعه یک نوع جدید از سیستم ژنراتور ترموالکتریک جاده پیشنهاد شد و ویژگی‌های تولید نیرو و تنظیم دما در تابستان و زمستان با استفاده از آزمایش‌های خارج از منزل به طور سیستماتیک مورد بررسی قرار گرفت. در تابستان، دمای سطح روسازی با استفاده از دمای حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان آب ۲,۰ لیتر در دقیقه تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. در زمستان، با استفاده از دمای حمام آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان آب ۲/۵ لیتر در دقیقه، برف می‌تواند ظرف ٤٤ دقیقه ذوب شود. علاوه بر این، اوج توان خروجی سیستم ژنراتور ترموالکتریک جاده به ترتیب در تابستان و زمستان ۱٦۲/۳۳ میلی‌وات و ۳٤/٦۳ میلی‌وات بود. از این رو، این نوع سیستم ژنراتور ترموالکتریک جاده می‌تواند مزایای اقلیمی و ایمنی را فراهم کند، در حالی که گرما می‌تواند به انرژی مفید تبدیل شود.

در مطالعه‌ای توسط راندریانتسوآ و همکاران (Randriantsoa et al., 2024) در سال ۲۰۲٤، یک مدل جدید روسازی پیزو ترموالکتریک با کوپلینگ پیزو ترموالکتریک پیشنهاد شد. با توجه به فقدان آزمایش‌های معمولی در ادبیات علمی، یک نمونه آزمایشی آزمایشگاهی جدید پیشنهاد شد که

به طور مصنوعی و همزمان برداشت گرما روی سطح جاده مصنوعی و ارتعاش مکانیکی ناشی از وسایل نقلیه عبوری را تولید کند. این مطالعه نشان داد که یک سیستم پیزوترموالکتریک هیبریدی برای کاربردهای روسازی جاده مناسب‌تر از یک سیستم کوپلینگ پیزوترموالکتریک است. یک سیستم ترکیبی می‌تواند به تولید انرژی ادامه دهد، حتی اگر یکی از منابع انرژی در دسترس نباشد یا عملکرد نادرست داشته باشد، در حالی که یک سیستم ترکیبی کوپلینگ قادر به انجام این کار نیست. برداشت‌گر ترکیبی پیزوترموالکتریک پیشنهادی می‌تواند تا ۱/۷۵ میکروووات برق تولید کند.

با توجه به مطالعات بررسی شده در ده سال اخیر، می‌توان استنباط کرد که پیشرفت‌های قابل توجهی در طراحی و کارایی سیستم‌های ترموالکتریک صورت گرفته است. در ابتدا، سیستم‌های ساده‌ای با ولتاژ و توان پایین وجود داشتند، اما با گذشت زمان و بهبود طراحی‌ها، از جمله استفاده از مواد بهتر و طراحی‌های بهینه‌تر، توان خروجی این سیستم‌ها به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. سیستم‌های مختلفی با کاربردهای متفاوت توسعه یافته‌اند، از جمله سیستم‌های مبتنی بر لوله‌های جریان، ورق‌های آلومینیومی و مبدل‌های حرارتی. برخی سیستم‌ها توانسته‌اند به انرژی‌های قابل توجهی دست یابند. به علاوه، به نظر می‌رسد تکنولوژی‌های جدید قابلیت استفاده در مقیاس‌های بزرگ و در شبکه‌های گسترده را دارند.

شهر هوشمند

رشد جمعیت مشکلات زیادی به همراه داشته که باعث ناپایداری اقتصادی و خطرات زیست‌محیطی شده است. در این راستا، روش‌های جدید برنامه‌ریزی شهری و فناوری‌های جدید ایجاد شده است تا رونق اقتصادی در مناطق شهری توسعه یابد. بنابراین مفهوم شهر هوشمند، یک رویکرد جدید در راستای کاهش و رفع مشکلات شهری است که از طریق کاربرد فناوری های اطلاعات و ارتباطات، استفاده بهتر از منابع در شهرها را امکان پذیر خواهد ساخت. مفهوم شهرهای هوشمند حول محور استفاده از فناوری‌های مدرن برای مدیریت و بهینه‌سازی عملیات شهری از جمله زیرساخت‌های انرژی است. یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی که شهرهای هوشمند باید با آن دست و پنجه نرم کنند، اطمینان از استفاده کارآمد از زیرساخت‌های انرژی برای کاهش مصرف انرژی، هزینه و اثرات زیست محیطی است (Rajaan et al., 2024). مفاهیم شهر هوشمند را می‌توان برای پیاده‌سازی انرژی که می‌تواند به طور طبیعی تجدید شود، مانند خورشید، باد و انرژی زمین گرمایی، به عنوان وسیله‌ای برای کاهش انتشار کربن و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی استفاده کرد.

پتانسیل‌های روسازی راه در تولید انرژی‌های پاک و ارزیابی انرژی خورشیدی به‌طور مستقیم با مفهوم شهرهای هوشمند مرتبط هستند (Abdulmouti et al., 2022). روسازی‌های خورشیدی می‌توانند به‌عنوان یک منبع انرژی پاک در کنار زیرساخت‌های شهری عمل کنند و به تأمین انرژی مورد نیاز برای تجهیزات و خدمات شهری کمک کنند (J. Xu et al., 2021). برداشت انرژی از روسازی به عنوان یک فناوری نوین در شهرهای هوشمند، نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ایفا می‌کند. این فناوری می‌تواند از منابع مختلفی مانند انرژی مکانیکی ناشی از حرکت وسایل نقلیه و عابران پیاده، انرژی خورشیدی و حتی انرژی گرمایی استفاده کند (Ahmad et al., 2019). با توجه به نیاز به بهبود کارایی انرژی در شهرهای هوشمند، این نوع برداشت انرژی می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت زندگی ساکنان کمک کند (Rajaan et al., 2024). همچنین، ادغام این فناوری با شبکه‌های هوشمند و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند به بهینه‌سازی مدیریت انرژی و افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر منجر شود. در نتیجه، برداشت انرژی از روسازی نه تنها به بهبود زیرساخت‌های شهری کمک می‌کند، بلکه به تحقق اهداف پایداری و کاهش انتشار کربن نیز یاری می‌رساند (Li & Niu, 2024). در نتیجه، هم‌افزایی بین پتانسیل‌های روسازی و انرژی خورشیدی می‌تواند به ایجاد شهرهای هوشمند و پایدار کمک کند (S. Rahman et al., 2023).

۵- نتیجه‌گیری

رشد روزافزون جمعیت، نیاز به انرژی، محدودیت منابع انرژی، آلودگی‌های زیست‌محیطی و تشکیل پدیده مخرب جزایر گرمایش شهری، استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر را اجتناب‌ناپذیر کرده است. راه‌ها بخش قابل‌توجهی از پیکربندی فضای شهری را تشکیل می‌دهند. شناخت پتانسیل‌های راه‌ها در تولید انرژی پاک با اهمیت است. در این مقاله، به بررسی جامع پتانسیل‌های برداشت انرژی‌های تجدیدپذیر از سطح و ساختار روسازی‌ها پرداخته شد. نتایج نشان داد که روسازی‌های جاده‌ها به دلیل گستردگی و سطح وسیعی که در مناطق شهری و بین‌شهری دارند، می‌توانند به عنوان یکی از منابع مهم تولید انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، باد، حرارتی و صوتی مورد استفاده قرار گیرند. فناوری‌های نوینی مانند سیستم‌های برداشت انرژی خورشیدی مانند روسازی‌های فتوولتائیک و آسفالتی هیدرونیک، می‌تواند به تولید انرژی پایدار و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی کمک کند. در رابطه با انواع روسازی بررسی شده در این مقاله، می‌توان گفت روسازی تبخیری متخلخل به علت پتانسیل پایین سرویس‌دهی، برای شبکه‌های جاده‌ای با ترافیک پایین توصیه می‌شود. روسازی تبخیری نفوذپذیر در مدیریت رواناب‌های شهری توصیه شده است. روسازی‌های برداشت‌کننده حرارت شامل روسازی‌های فتوولتائیک، ترموالکتریک و پیزوالکتریک بوده که به ترتیب با نور خورشید، حرارت و ارتعاشات مکانیکی ناشی از ترافیک، قادر به تولید برق هستند. روسازی برداشت کننده انرژی حرارتی نسبت به بقیه مدل‌های روسازی خنک، کاربردی‌تر است زیرا نه تنها دمای سطح روسازی پایین می‌ماند بلکه می‌توان از آن انرژی پاک به دست آورد. در راستای رسیدن به بیشترین راندمان سیستم روسازی آسفالتی هیدرونیک، باید جریان داخل لوله‌ها آشفته باشد و آرایش مارپیچی، بهینه‌ترین آرایش قرارگیری لوله‌ها در این سیستم است. هر چقدر قطر لوله‌ها بیشتر، عمق نصب کمتر و فاصله از هم نزدیک‌تر باشد، رسانایی حرارتی روسازی‌های آسفالتی هیدرونیک افزایش خواهد یافت. مشکلات اجرایی در هنگام نصب و تعمیرات، خوردگی لوله‌ها، نشت آب و تاثیرات منفی بر مقاومت روسازی از معایب این روسازی‌هاست. سیستم‌های هیبریدی فتوولتائیک/حرارتی، بهترین بازده را در راستای تولید برق و حرارت از انرژی خورشیدی ارائه داده است. در فناوری‌های ترموالکتریک، ماژول‌های ترموالکتریک در لایه‌های روسازی نصب شده است و از اختلاف دما تولید برق می‌کند. کاربرد این سیستم در مناطق گرمسیری یا نسبتاً گرمسیری توجیه‌پذیر است.

به طور کلی، استفاده از این فناوری‌ها نه تنها منجر به کاهش پدیده جزایر گرمایی شهری و بهبود کیفیت هوای شهری می‌شود، بلکه می‌تواند به توسعه پایدار شهری کمک کند و راه را برای شهرهای هوشمند هموار نماید. این رویکردهای نوآورانه می‌توانند به کاهش هزینه‌های انرژی، بهبود بازدهی انرژی و افزایش ایمنی جاده‌ها در شرایط مختلف آب و هوایی منجر شوند. از این رو، لازم است تحقیقات بیشتری در زمینه بهینه‌سازی طراحی و استفاده از این فناوری‌ها صورت گیرد تا ضمن افزایش بهره‌وری انرژی، از چالش‌های مربوط به نصب، نگهداری و دوام این سیستم‌ها کاسته شود.

٦-مراجع

-Abbas, F. A., & Alhamdo, M. H. (2023). Thermal performance of asphalt solar collector by improving tube and slab characteristics. *International Journal of Thermofluids*, *17*, 100293.

-Abbas, F. A., & Alhamdo, M. H. (2024). Experimental and numerical analysis of an asphalt solar collector with a conductive asphalt mixture. *Energy Reports*, *11*, 327-341.

-Abdulmouti, H., Skaf, Z., & Alblooshi, S. (2022). Smart Green Campus: The Campus of Tomorrow. *2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*.

-Ahmad, S., Abdul Mujeebu, M., & Farooqi, M. A. (2019). Energy harvesting from pavements and roadways: A comprehensive review of technologies, materials, and challenges. *International Journal of Energy Research*, *43*(6), 1974-2015.

-Atroush, M. E. (2022). Evaluation of the pavement geothermal energy harvesting technologies towards sustainability and renewable energy. *Energies*, *15*(3), 1201.

-Anupam, B., Sahoo, U. C., Chandrappa, A. K., & Rath, P. (2021). Emerging technologies in cool pavements: A review. *Construction and Building Materials*, *299*, 123892.

-Chiarelli, A., Dawson, A., & Garcia, A. (2015a). Analysis of the performance of an air-powered energy-harvesting pavement. *Transportation Research Record*, *2523*(1), 156-163.
-Chiarelli, A., Dawson, A., & Garcia, A. (2015b). Parametric analysis of energy harvesting pavements operated by air convection. *Applied energy*, *154*, 951-958.
-Croce, S., D'Agnolo, E., Caini, M., & Paparella, R. (2021). The use of cool pavements for the regeneration of industrial districts. *Sustainability*, *13*(11), 6322.
-Datta, U., Dessouky, S., & Papagiannakis, A. (2017). Harvesting thermoelectric energy from asphalt pavements. *Transportation Research Record*, *2628*(1), 12-22.
-De Bondt, A., & Jansen, R. (2006). Generation and saving of energy via asphalt pavement surfaces. *Fachbeitrag in OIB—de Bondt*.
-Debnath, B., & Sarkar, P. P. (2020). Pervious concrete as an alternative pavement strategy: A state-of-the-art review. *International Journal of Pavement Engineering*, *21*(12), 1516-1531.
-Dezfooli, A. S., Nejad, F. M., Zakeri, H., & Kazemifard, S. (2017). Solar pavement: A new emerging technology. *Solar Energy*, *149*, 272-284.
-Duarte, F., Ferreira, A., & Champalimaud, J. P. (2019). Waynergy vehicles: System prototype demonstration in an operational environment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer*.
-Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. John Wiley & Sons.
-Efthymiou, C., Santamouris, M., Kolokotsa, D., & Koras, A. (2016). Development and testing of photovoltaic pavement for heat island mitigation. *Solar energy*, *130*, 148-160.
-El-Maaty, A. E. A. (2017). Temperature change implications for flexible pavement performance and life. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, *3*(1), 1-11.
-Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *39*, 748-764.
-Fadhil, M., Hamoodi, M. N., & Ziboon, A. R. T. (2023). Mitigating urban heat island effects in urban environments: strategies and tools.
-Anupam, B., Sahoo, U. C., & Rath, P. (2020). Phase change materials for pavement applications: A review. *Construction and Building Materials*, *247*, 118553.
-Arnab, M. M. B., Ullah, S. M. R., Alam, M. A., Nondy, R. K., Alam, A. F., & Mishu, A. P. (2014). Generation of electrical energy using piezoelectric material from train wheels: Bangladesh perspective. *2014 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*.
-Asfour, S., Bernardin, F., Toussaint, E., & Piau, J.-M. (2016). Hydrothermal modeling of porous pavement for its surface de-freezing. *Applied Thermal Engineering*, *107*, 493-500.
-Beddu, S., Ahmad, M., Kamal, N. L. M., Mohamad, D., Itam, Z., Min, Y. H., & Zailani, W. W. A. (2024). A State-of-the-Art Review of Hydronic Asphalt Solar Collector Technology for Solar Energy Harvesting on Road Pavement. *MATEC Web of Conferences*.
-Brusaw, S. D., & Brusaw, J. A. (2014). Solar roadway panel. In: Google Patents.
-Buchin, O., Hoelscher, M.-T., Meier, F., Nehls, T., & Ziegler, F. (2016). Evaluation of the health-risk reduction potential of countermeasures to urban heat islands. *Energy and Buildings*, *114*, 27-37.
-Buyung, N. R., Ghani, A. N. A., & Abdullah, N. H. (2022). Surface Temperature Reduction of Porous Concrete Pavers Using a Water Retention Layer. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, *100*(3), 106-114.
-Cao, Y., Sha, A., Liu, Z., Li, J., & Jiang, W. (2021). Energy output of piezoelectric transducers and pavements under simulated traffic load. *Journal of Cleaner Production*, *279*, 123508.
-Cao, Y., Sha, A., Liu, Z., Luan, B., Li, J., & Jiang, W. (2020). Electric energy output model of a piezoelectric transducer for pavement application under vehicle load excitation. *Energy*, *211*, 118595.
-Chaithanya, D., Anitha, S., Ramya, B., & Aisiri, A. (2021). Power generation using sound by piezo electric material. *Journal of Physics: Conference Series*.
-Chiarelli, A., Al-Mohammedawi, A., Dawson, A., & Garcia, A. (2017). Construction and configuration of convection-powered asphalt solar collectors for the reduction of urban temperatures. *International Journal of Thermal Sciences*, *112*, 242-251.

-Ikechukwu, E. E. (2015). The effects of road and other pavement materials on urban heat island (a case study of Port Harcourt city). *Journal of Environmental Protection*, *6*(4), 328-340.
-Imafidon, O. J., & Ting, D. S. (2023). Retrofitting buildings with phase change materials (PCM)–the effects of PCM location and climatic condition. *Building and Environment*, *236*, 110224.
-Jendia, S., & Krezem, M. (2019). Producing Porous Asphalt in Palestine According to ASTM D7064. *Journal of Engineering Research & Technology*, *6*(1).
-Jiang, W., & Huang, Y. (2020). Thermoelectric technologies for harvesting energy from pavements. In *Eco-efficient Pavement Construction Materials* (pp. 339-366). Elsevier.
-Jiang, W., Xiao, J., Yuan, D., Lu, H., Xu, S., & Huang, Y. (2018). Design and experiment of thermoelectric asphalt pavements with power-generation and temperature-reduction functions. *Energy and Buildings*, *169*, 39-47.
-Jiang, W., Yuan, D., Xu, S., Hu, H., Xiao, J., Sha, A., & Huang, Y. (2017). Energy harvesting from asphalt pavement using thermoelectric technology. *Applied Energy*, *205*, 941-950.
-Jiao, W., Sha, A., Liu, Z., Jiang, W., Hu, L., & Li, X. (2020). Utilization of steel slags to produce thermal conductive asphalt concretes for snow melting pavements. *Journal of Cleaner Production*, *261*, 121197.
-Kappou, S., Souliotis, M., Papaefthimiou, S., Panaras, G., Paravantis, J. A., Michalena, E., Hills, J. M., Vouros, A. P., Ntymenou, A., & Mihalakakou, G. (2022). Cool pavements: State of the art and new technologies. *Sustainability*, *14*(9), 5159.
-Kim, J., Lee, S.-T., Yang, S., & Lee, J. (2017). Implementation of thermal-energy-harvesting technology on pavement. *Journal of Testing and Evaluation*, *45*(2), 582-590.
-Kim, S., Shen, J., & Ahad, M. (2015). Piezoelectric-based energy harvesting technology for roadway sustainability. *International Journal of Applied Science and Technology*, *5*(1).
-Konuklu, Y., Ostry, M., Paksoy, H. O., & Charvat, P. (2015). Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications. *Energy and Buildings*, *106*, 134-155.
IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
-García, A., & Partl, M. N. (2014). How to transform an asphalt concrete pavement into a solar turbine. *Applied Energy*, *119*, 431-437.
-Ghalandari, T., Kia, A., Taborda, D. M., & Vuye, C. (2023). Thermal and structural response of a pavement solar collector prototype. Symposium on Energy Geotechnics: Accelerating the Energy Transition, 3-5 October, 2023, Delft, the Netherlands,
-Gholikhani, M., Roshani, H., Dessouky, S., & Papagiannakis, A. (2020). A critical review of roadway energy harvesting technologies. *Applied Energy*, *261*, 114388.
-Guntakal, S. N., & Selvan, S. (2017). Application of pervious concrete for pavements: A review. *Rasayan J. Chem*, *10*(1), 32-26.
-Guo, L., & Lu, Q. (2017). Potentials of piezoelectric and thermoelectric technologies for harvesting energy from pavements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *72*, 761-773.
-Hasebe, M., Kamikawa, Y., & Meiarashi, S. (2006). Thermoelectric generators using solar thermal energy in heated road pavement. *2006 25th international conference on thermoelectrics*.
-Hasegawa, K., Ueno, T., & Kiwata, T. (2019). Proposal of wind vibrational power generator using magnetostrictive material. *IEEE Transactions on magnetics*, *55*(7), 1-4.
-Hassouna, F., Bdair, R., Ali, M., Mosa, M., Kayed, M., & Daraghmeh, F. (2024). Economic Feasibility And Environmental Implications Of Permeable Pavement In Palestine. *Transport Problems: an International Scientific Journal*, *19*(2).
-Hegde, S. S., Thamban, A., Bhai, S. P. M., Ahmed, A., Upadhyay, M., Joishy, A., & Mahalingam, A. (2016). Highway mounted horizontal axial flow turbines for wind energy harvesting from cruising vehicles. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*.
-Hendel, M. (2020). Cool pavements. In *Eco-efficient Pavement Construction Materials Elsevier*. 97-125.
-Hossain, M. F. T., Dessouky, S., Biten, A. B., Montoya, A., & Fernandez, D. (2021). Harvesting solar energy from asphalt pavement. *Sustainability*, *13*(22), 12807.

-MacDonald, F. (2015). The solar road in the Netherlands is working even better than expected. *Science Alert*, *11*.
-Maghsoudi Nia, E., Wan Abdullah Zawawi, N., & Mahinder Singh, B. (2019). Design of a pavement using piezoelectric materials. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, *50*(3), 320-328.
-Mahedi, M., Cetin, B., & Cetin, K. S. (2019). Freeze-thaw performance of phase change material (PCM) incorporated pavement subgrade soil. *Construction and Building Materials*, *202*, 449-464.
-Manning, B. J., Bender, P. R., Cote, S. A., Lewis, R. A., Sakulich, A. R., & Mallick, R. B. (2015). Assessing the feasibility of incorporating phase change material in hot mix asphalt. *Sustainable Cities and Society*, *19*, 11-16.
-Manoharan, A. (2021). Aerodynamic design of Highway Vertical Axis Wind Turbine.
-Mao, M., & Ni, X. (2024). A Comprehensive Review of Physical Models and Performance Evaluations for Pavement Photovoltaic Modules. *Energies*, *17*(11), 2561.
-Middel, A., Turner, V. K., Schneider, F. A., Zhang, Y., & Stiller, M. (2020). Solar reflective pavements—A policy panacea to heat mitigation? *Environmental Research Letters*, *15*(6), 064016.
-Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental management*, *197*, 522-538.
-Morbiato, T., Borri, C., & Vitaliani, R. (2014). Wind energy harvesting from transport systems: A resource estimation assessment. *Applied Energy*, *133*, 152-168.
-Nasir, D. S., Hughes, B. R., & Calautit, J. K. (2017). Influence of urban form on the performance of road pavement solar collector system: Symmetrical and asymmetrical heights. *Energy conversion and management*, *149*, 904-917.
-Páez-Montoro, A., García-Valderas, M., Olías-Ruíz, E., & López-Ongil, C. (2022). Solar energy harvesting to improve capabilities of wearable devices. *Sensors*, *22*(10), 3950.
-Pan, F., Pei, J., Zhang, G., Wen, Y., Zhang, J., & Li, R. (2022). Building the cooling roads with high thermal conductivity pavements to relieve urban heat island effect. *Construction and Building Materials*, *346*, 128276.
-Kubilay, A., Ferrari, A., Derome, D., & Carmeliet, J. (2021). Smart wetting of permeable pavements as an evaporative-cooling measure for improving the urban climate during heat waves. *Journal of Building Physics*, *45*(1), 36-66.
-Larsen, L. (2015). Urban climate and adaptation strategies. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *13*(9), 486-492.
-Li, S., Gu, W., Liu, X., Zhou, Y., Chen, Z., Zhang, X., & Ma, T. (2022). Pavement integrated photovoltaic thermal (PIPVT) system: A temporal and spatial analysis of energy and exergy performance. *Journal of Cleaner Production*, *340*, 130782.
-Li, Y., & Niu, L. (2024). Prospects of Smart Cities in Energy Saving and Transportation Data Visualization under the Background of Dual Carbon. SHS Web of Conferences,
-Li, Y., Nord, N., Xiao, Q., & Tereshchenko, T. (2020). Building heating applications with phase change material: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, *31*, 101634.
-Li, Z., Zhang, Y., Yang, L., & Chen, H. (2024). Overview of piezoelectric energy harvester based on wind-induced vibration effect. *Journal of Vibroengineering*, *26*(3), 615-628.
-Liu, M., Lin, R., Zhou, S., Yu, Y., Ishida, A., McGrath, M., Kennedy, B., Hajj, M., & Zuo, L. (2018). Design, simulation and experiment of a novel high efficiency energy harvesting paver. *Applied energy*, *212*, 966-975.
-Liu, Y., Li, T., & Peng, H. (2018). A new structure of permeable pavement for mitigating urban heat island. *Science of the Total Environment*, *634*, 1119-1125.
-Liu, Y., Li, T., & Yu, L. (2020). Urban heat island mitigation and hydrology performance of innovative permeable pavement: A pilot-scale study. *Journal of Cleaner Production*, *244*, 118938.
-Luxman, N., Hassan, N., Jaya, R., Warid, M. M., Azahar, N. M., Mahmud, M., & Ismail, S. (2019). Effect of compaction temperature on porous asphalt performance. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*,
Ma, T., Li, S., Gu, W., Weng, S., Peng, J., & Xiao, G. (2022). Solar energy harvesting pavements on the road: comparative study and performance assessment. *Sustainable Cities and Society*, *81*, 103868.

harvester systems from roadways. *Engineering Research Express*, *6*(1), 015112.
-Rathore, M. K., Agrawal, M., & Baredar, P. (2021). Energy production potential from the wake of moving traffic vehicles on a highway by the array of low economic VAWT. *Materials Today: Proceedings*, *46*, 5272-5277.
-Rejab, M. N., & Johar, M. A. (2022). Evaluation of thermoelectric generator array configuration for thermal energy harvesting at the rooftop and attic area due to solar radiation in Malaysia. 2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON),
-Rejab, M. N., Marwah, O. M. F., Johar, M. A., & Ribuan, M. N. (2023). Real-time Thermal Energy Harvesting from Solar Radiation in Malaysia at Low-Temperature Difference. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, *107*(2), 117-132.
-Rowe, D. M. (2018). *Thermoelectrics handbook: macro to nano*. CRC press.
-Saleh, N. F., Zalghout, A. A., Sari Ad Din, S. A., Chehab, G. R., & Saad, G. A. (2020). Design, construction, and evaluation of energy-harvesting asphalt pavement systems. *Road Materials and Pavement Design*, *21*(6), 1647-1674.
-Salvador, C. S., Abas, M. C. A., Teresa, J. A., Castillo, M. E., Dimaano, K., Sangalang, J., & Velasco, C. L. (2017). Development of a traffic noise energy harvesting standalone system using piezoelectric transducers and super-capacitor. 2017 25th International Conference on Systems Engineering (ICSEng),
-Selvaraj, R., & Amirthavarshini, M. (2016). Some aspects on pervious concrete. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, *3*(1), 257752.
-Shekhar, A., Klerks, S., Bauer, P., & Prasanth, V. (2015). Solar road operating efficiency and energy yield–an integrated approach towards inductive power transfer. *European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC).*
-Shekhar, A., Kumaravel, V. K., Klerks, S., de Wit, S., Venugopal, P., Narayan, N., Bauer, P., Isabella, O., & Zeman, M. (2018). Harvesting roadway solar energy—performance of the installed infrastructure integrated PV bike path. *IEEE Journal of Photovoltaics*, *8*(4), 1066-1073.
-Pan, P., Wu, S., Xiao, Y., & Liu, G. (2015). A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow melting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *48*, 624-634.
-Papadimitriou, C., Psomopoulos, C., & Kehagia, F. (2019). A review on the latest trend of Solar Pavements in Urban Environment. *Energy Procedia*, *157*, 945-952.
-Park, P., Choi, G. S., Rohani, E., & Song, I. (2014). Optimization of thermoelectric system for pavement energy harvesting. *Asph. Pavements*, *2*, 1827-1838.
-Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., & Pasquini, E. (2022). Rutting behavior of asphalt surface layers designed for solar harvesting systems. *Materials*, *16*(1), 277.
-Patlins, A., Hnatov, A., Kunicina, N., Arhun, S., Zabasta, A., & Ribickis, L. (2018). Sustainable pavement enable to produce electricity for road lighting using green energy. 2018 Energy and Sustainability for Small Developing Economies (ES2DE),
-Pultarova, T. (2017). News briefing: energy-welcome to the world's first solar road. *Engineering & Technology*, *12*(1), 10-10.
-Qin, Y. (2015). A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *52*, 445-459.
-Rahman, M., Mabrouk, G., & Dessouky, S. (2023). Development of a photovoltaic-based module for harvesting solar energy from pavement: a lab and field assessment. *Energies*, *16*(8), 3338.
-Rahman, S., Maulud, K., & Hassan, H. (2023). Leveraging LiDAR for smart cities climate change resilient: A solar potential case study in a developing area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
-Rajaan, R., Baishya, B. K., Rao, T. V., Pattanaik, B., Tripathi, M. A., & Anitha, R. (2024). Efficient Usage of Energy Infrastructure in Smart City Using Machine Learning. *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, *10*.
-Ram, B., & Verma, S. (2024). Recent Advancements in Solar Cell Technology: An Overview. *Journal of Electrical Systems*, *20*(10s), 1553-1563.
-Randriantsoa, A. N. A., Fakra, D. A. H., Rakotondrajaona, L., & Benelmir, R. (2024). Research and development of a new combination of piezo-thermoelectric energy

Climate and Energy Program, Heat Island Effect, Urban Heat Island Webcasts and Conference Calls.

-Wang, C., Zhao, J., Li, Q., & Li, Y. (2018). Optimization design and experimental investigation of piezoelectric energy harvesting devices for pavement. *Applied Energy*, *229*, 18-30.

-Wang, H., Jasim, A., & Chen, X. (2018). Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications–A comprehensive review. *Applied Energy*, *212*, 1083-1094.

-Wang, Y., Zhu, X., Zhang, T., Bano, S., Pan, H., Qi, L., Zhang, Z., & Yuan, Y. (2018). A renewable low-frequency acoustic energy harvesting noise barrier for high-speed railways using a Helmholtz resonator and a PVDF film. *Applied Energy*, *230*, 52-61.

-Wei, J., Wang, Y., Li, X., Jia, Z., Qiao, S., Jiang, Y., Zhou, Y., Miao, Z., Gao, D., & Zhang, H. (2021). Dramatically improved thermoelectric properties by defect engineering in cement-based composites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *13*(3), 3919-3929.

-Wei, J., Zhou, Y., Wang, Y., Miao, Z., Guo, Y., Gao, D., Zhang, H., & Li, X. (2022). Recent advances in thermoelectric technology to harvest energy from the pavement. *International Journal of Energy Research*, *46*(8), 10453-10474.

-Wu, L., Yuan, Y., & Wu, H. (2020). Solar road power generation assessment based on coupled transportation and power distribution systems. Journal of Physics: Conference Series.

-Xiang, B., Yuan, Y., Ji, Y., Cao, X., & Zhou, J. (2020). Thermal and electrical performance of a novel photovoltaic-thermal road. *Solar Energy*, *199*, 1-18.

-Xie, P., & Wang, H. (2021). Potential benefit of photovoltaic pavement for mitigation of urban heat island effect. *Applied Thermal Engineering*, *191*, 116883.

-Xu, J., Liu, Z., & Jiang, H. (2021). Study on Application of Solar Energy in Highway. *E3S Web of Conferences*.

-Xu, L., Wang, J., Xiao, F., Sherif, E.-B., & Awed, A. (2021). Potential strategies to mitigate the heat island impacts of highway pavement on megacities with considerations of energy uses. *Applied Energy*, *281*, 116077.

-Yoomak, S., & Ngaopitakkul, A. (2022). Feasibility Study of Using Energy Harvesting Systems in Terms of Energy production and

-Sicakova, A., & Kovac, M. (2024). Contribution to the Optimization of Quantitative and Qualitative Parameters of the Composition of Slag Aggregate Permeable Concrete. *Advances in Science and Technology*, *145*, 55-67.

-Soundararajan, E. K., & Vaiyapuri, R. (2021). Geopolymer binder for pervious concrete. *J. Croat. Assoc. Civ. Eng*, *73*, 209-218.

-Sprouse III, C. E., Hoover, C., Obritsch, O., & Thomazin, H. (2020). Advancing pervious pavements through nomenclature, standards, and holistic green design. *Sustainability*, *12*(18), 7422.

-Stempihar, J. J., Pourshams-Manzouri, T., Kaloush, K. E., & Rodezno, M. C. (2012). Porous asphalt pavement temperature effects for urban heat island analysis. *Transportation Research Record*, *2293*(1), 123-130.

-Støvring, J., Dam, T., & Bergen Jensen, M. (2018). Surface sedimentation at permeable pavement systems: Implications for planning and design. *Urban Water Journal*, *15*(2), 124-131.

-Tahami, S. A., Gholikhani, M., & Dessouky, S. (2020). Thermoelectric energy harvesting system for roadway sustainability. *Transportation Research Record*, *2674*(2), 135-145.

-Tahami, S. A., Gholikhani, M., Nasouri, R., Dessouky, S., & Papagiannakis, A. (2019). Developing a new thermoelectric approach for energy harvesting from asphalt pavements. *Applied Energy*, *238*, 786-795.

-Tanzadeh, R., Eskandari Torbaghan, M., Venetsaneas, N., & Moghadas Nejad, F. (2024). Harvesting electricity from road traffic noise energy–a literature review. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport,

-Tziampou, N., Coupe, S. J., Sañudo-Fontaneda, L. A., Newman, A. P., & Castro-Fresno, D. (2020). Fluid transport within permeable pavement systems: A review of evaporation processes, moisture loss measurement and the current state of knowledge. *Construction and Building Materials*, *243*, 118179.

-Vizzari, D., Gennesseaux, E., Lavaud, S., Bouron, S., & Chailleux, E. (2021). Pavement energy harvesting technologies: a critical review. *RILEM Technical Letters*, *6*, 93-104.

-Voogt, J. (2007). How researchers measure urban heat islands. United States Environmental Protection Agency (EPA), State and Local

-Zhang, Y., Lai, Q., Wang, J., & Lü, C. (2022). Piezoelectric energy harvesting from roadways under open-traffic conditions: Analysis and optimization with scaling law method. *Energies*, *15*(9), 3395.
-Zheng, M., Tian, Y., & He, L. (2019). Analysis on environmental thermal effect of functionally graded nanocomposite heat reflective coatings for asphalt pavement. *Coatings*, *9*(3), 178.
-Zhou, B., Pei, J., Hughes, B. R., Nasir, D. S., & Zhang, J. (2020). Analysis of mechanical properties for two different structures of photovoltaic pavement unit block. *Construction and Building Materials*, *239*, 117864.
-Zhou, B., Pei, J., Nasir, D. M., & Zhang, J. (2021). A review on solar pavement and photovoltaic/thermal (PV/T) system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *93*, 102753.
-Zhou, B., Pei, J., Xue, B., Guo, F., Wen, Y., Zhang, J., & Li, R. (2019). Solar/road from 'forced coexistence'to 'harmonious symbiosis'. *Applied energy*, *255*, 113808.
-Zhu, X., Yu, Y., & Li, F. (2019). A review on thermoelectric energy harvesting from asphalt pavement: Configuration, performance and future. *Construction and Building Materials*, *228*, 116818.
-Zoorob, S., Hassan, K., & Setyawan, A. (2017). Cold mix, cold laid semi-flexible grouted macadams, mix design and properties. In *Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements*, Routledge, 105-112.
Economic Evaluation for a Nanogrid Road Lighting System. *2022 IEEE/IAS 58th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*.
-Yu, B., Duan, J., Li, J., Xie, W., Jin, H., Liu, R., Wang, H., Huang, L., Hu, B., & Zhou, J. (2019). All-day thermogalvanic cells for environmental thermal energy harvesting. *Research*.
-Yuan, D., Jiang, W., Sha, A., Xiao, J., Shan, J., & Wang, D. (2022). Energy output and pavement performance of road thermoelectric generator system. *Renewable Energy*, *201*, 22-33.
-Yuan, D., Jiang, W., Xiao, J., Ling, X., Zhang, Y., & Lu, R. (2023). Experimental study on the temperature-regulating function of road thermoelectric generator system. *Journal of Cleaner Production*, *384*, 135586.
-Yuan, W., Ji, J., Li, Z., Zhou, F., Ren, X., Zhao, X., & Liu, S. (2018). Comparison study of the performance of two kinds of photovoltaic/thermal (PV/T) systems and a PV module at high ambient temperature. *Energy*, *148*, 1153-1161.
-Zha, X., Zhang, C., Wu, Z., & Zhang, Q. (2016). Mechanical analysis and model preparation for hollow slab element of solar pavement. *Acta Energiae Solaris Sinica*, *37*(1), 136-141.

The Potentials of Road Paving in the Production of Clean Energy by Evaluating Solar Energy

Zahra Ranjbar, M.Sc., Grad., Faculty of Civil Engineering of Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Ghazaal Mahdavi, M.Sc., Grad., Faculty of Civil Engineering of Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Rashid Tanzadeh, Post Doc., Grad., Faculty of Civil Engineering of Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Ferydon Moghaddas Nejad, Professor, Faculty of Civil Engineering of Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

E-mail: rashidtanzadeh@aut.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

The production of clean and renewable energy, the mitigation of environmental pollution, and the establishment of a sustainable electricity supply are pressing global challenges for both industrialized and developing nations. A comprehensive understanding of the potentials for harvesting, storing, and transferring renewable energy is essential to addressing these challenges. Mechanical energy generated by vehicular motion, wind energy induced by vehicle speed, acoustic and vibrational energy resulting from traffic, and solar radiant energy represent significant opportunities for energy harvesting from pavement surfaces and structures. In this study, recent advancements in energy harvesting technologies integrated within asphalt pavements are systematically reviewed. The phenomenon of urban heat islands is analyzed, and mitigation strategies—including reflective, evaporative, and heat-harvesting pavements—are critically evaluated. Technological developments and limitations associated with solar collectors, photovoltaic (PV) systems, photovoltaic-thermal (PVT) systems, and thermoelectric modules are also assessed. Thermal energy harvesting pavements are demonstrated to offer dual benefits by reducing surface temperatures while simultaneously generating clean energy. Hydronic asphalt systems, photovoltaic pavements, and thermoelectric paving solutions have been reported to enhance thermal efficiency and energy output. Moreover, PVT hybrid systems exhibit superior performance by concurrently generating electricity and thermal energy from solar radiation, whereas thermoelectric technologies are particularly suitable for deployment in tropical regions. The findings underscore the advantages and challenges of each approach and propose strategic pathways for optimizing the integration of energy harvesting systems into sustainable pavement infrastructure.

Keywords: Renewable Energy, Energy Harvesting, Urban Heat Islands, Asphalt Pavement, Cool Pavement