

## جاده‌های خورشیدی و عوامل تاثیرگذار در عملکرد آنها

### مقاله علمی - پژوهشی

علی گرشاسبی\*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

امیر کاوسی، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

پرهام حیاتی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [aligarshasbii2001@gmail.com](mailto:aligarshasbii2001@gmail.com)

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰

صفحه ۱۷۰-۱۶۱

### چکیده

جاده‌های خورشیدی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان نوآوری‌های برجسته در زیرساخت‌های حمل و نقل، پتانسیل زیادی برای بهبود عملکرد جاده‌ها و تأمین انرژی پاک دارند. این مقاله جاده‌های خورشیدی، مکانیزم‌های انتقال حرارت و ساختارابعادی آنها را مورد بررسی قرار داده است. همچنین دو شاخص اصلی تأثیرگذار بر عملکرد جاده‌های خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است: ۱- شاخص زیست‌محیطی شامل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش اثر جزیره گرمایی شهری، استفاده بهینه از زیرساخت‌های موجود، کاهش استفاده از مواد شیمیایی برای ذوب یخ و برف و شرایط محیطی ۲- شاخص ایمنی است که به بررسی تأثیرات روش‌شنایی هوشمند، پیشگیری از تصادفات، تشخیص و هشدار خطرات و ظرفیت‌های نظارتی در جاده‌های خورشیدی پرداخته است. در این مقاله اهمیت توسعه و پیاده‌سازی این فناوری در زیرساخت‌های حمل و نقلی تشریح شده و نشان داده است که جاده‌های خورشیدی به عنوان یک راه حل نوآورانه می‌تواند به تحقق اهداف توسعه پایدار و بهبود کیفیت زندگی شهری کمک نماید.

واژه‌های کلیدی: جاده‌های خورشیدی، انرژی‌های تجدیدپذیر، محیط زیست، ایمنی راه

### ۱ - مقدمه

جاده‌های خورشیدی نه تنها قادر به تولید برق هستند، بلکه قابلیت‌هایی نظیر گرمایش جاده‌ها در زمستان برای جلوگیری از یخ‌زدگی و سیستم‌های روش‌شنایی هوشمند را نیز در بر گرفته که این امر می‌تواند نقش بسزایی در بهبود ایمنی جاده‌ها و کاهش تصادفات داشته باشد. این سیستم‌ها می‌تواند در مواجهه با شرایط اضطراری مانند ترافیک عبوری سنگین، به‌طور خودکار اطلاعات مهمی مانند علائم هشداردهنده یا علائم راهنمایی مسیر را ارائه داده که در نهایت به بهبود تجربه رانندگی و افزایش ایمنی کمک نماید (PreScouter, 2019).

پروژه‌های موفق از جاده‌های خورشیدی در کشورهای مختلف مانند هلند، فرانسه و ایالات متحده اجرا شده است. برای نمونه،

در سال‌های اخیر، بحران انرژی و اثرات مخرب ناشی از تغییرات اقلیمی، جامعه جهانی را به سوی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و فناوری‌های پاک سوق داده است. در این میان، جاده‌های خورشیدی<sup>۱</sup> به عنوان یکی از نوآورانه‌ترین و پیشرفته‌ترین راهکارها برای تولید انرژی پاک مطرح شده است. این فناوری که از پنل‌های خورشیدی مستحکم و مقاوم در برابر شرایط محیطی تشکیل شده است، امکان بهره‌برداری از سطوح جاده‌ها، پیاده‌روها و حتی باندهای فرودگاه‌ها را برای تولید انرژی الکتریکی فراهم کرده است. این تحول می‌تواند به نحو چشم‌گیری در کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود کیفیت زندگی موثر باشد (Hu et al., 2021) (Renoald et al., 2016)

یافته‌اند. این ایده، نخستین بار در اواخر دهه ۲۰۰۰ میلادی مطرح شد؛ زمانی که پژوهشگران به این فکر افتادند، که می‌توان از ظرفیت گسترده و دائماً در معرض نور خورشید جاده‌ها برای تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر استفاده کرد (Biello, 2009).

ساختار این جاده‌ها از پنل‌های خورشیدی بسیار مقاوم و بادوام تشکیل شده است که به‌طور مستقیم در سطح جاده‌ها تعبیه می‌شوند. این پنل‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که علاوه بر مقاومت در برابر وزن سنگین و سایل نقلیه و شرایط محیطی دشوار، توانایی تبدیل کارآمد انرژی خورشیدی به برق را داشته باشند. انرژی تولید شده از این طریق می‌تواند نه تنها برای روشنایی خیابان‌ها و تامین برق زیرساخت‌های شهری، بلکه برای گرم کردن سطح جاده‌ها در زمستان و جلوگیری از یخ‌زدگی آنها نیز استفاده شود. شکل (۱) برخی از مزایای جاده‌های خورشیدی را بیان می‌کند.

این فناوری، با توجه به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، توجه زیادی به خود جلب کرده و در کشورهای مختلف به عنوان راه‌کاری پایدار و بخشی از زیرساخت‌های هوشمند و سبز شهری مورد بررسی قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، پروژه‌های متعددی در این زمینه اجرا شده‌اند، که هر یک با هدف آزمایش و بهبود عملکرد این فناوری به مرحله بهره‌برداری رسیده‌اند و کمک کرده‌اند تا این راهکار نوآورانه به مرحله اجرا نزدیک‌تر شود (PreScouter, 2019).



ب) تهیه انرژی

پروژه "SolaRoad" در هلند، توانسته است انرژی خورشیدی را به برق برای روشنایی خیابان‌ها و تابلوهای راهنمایی تبدیل کند. همچنین در فرانسه، جاده‌های مجهز به پنل‌های خورشیدی، ضمن تولید انرژی، به کاهش هزینه‌های شهرداری‌ها و بهینه‌سازی زیرساخت‌های شهری کمک کرده است. این پروژه‌ها نشان داده‌اند که جاده‌های خورشیدی، علاوه بر قابلیت‌های نوآورانه خود، می‌تواند در مقیاس گسترده برای تامین انرژی پایدار به کار گرفته شود (Shekhar et al., 2018).

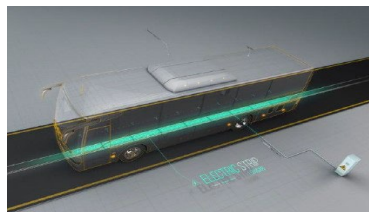
با وجود این موفقیت‌ها، چالش‌های زیادی پیش روی این فناوری قرار دارد. هزینه‌های بالای نصب و نگهداری، پیچیدگی‌های فنی و نیاز به زیرساخت‌های خاص از جمله مسائلی هستند که می‌بایست برای اجرای گسترده جاده‌های خورشیدی برطرف شود. همچنین، بازدهی پنل‌های خورشیدی در شرایط آب‌وهوایی مختلف و دوام این سیستم‌ها در مقابل فشارهای فیزیکی ناشی از تردد وسایل نقلیه سنگین، از جمله موضوعاتی است که نیازمند تحقیقات بیشتر است. آینده این فناوری به تحقیقات پیشرفته‌تر و بهبود طراحی‌ها وابسته است تا از آن به عنوان یکی از راهکارهای اصلی تامین انرژی در زیرساخت‌های مدرن استفاده شود.

## ۲ - جاده‌های خورشیدی

جاده‌های خورشیدی به عنوان یکی از نوآوری‌های پیشرفته در زمینه انرژی و حمل‌ونقل، با هدف تبدیل سطح جاده‌ها به منبعی برای تولید انرژی خورشیدی و بهبود زیرساخت‌های جاده‌ای، طراحی و توسعه



الف) ایمنی و امنیت با تامین برق تابلوهای هشدار



ج) امکان بهره‌گیری در شهرهای هوشمند

شکل ۱. مزایای جاده‌های خورشیدی (PreScouter, 2019)

## ۱-۲- مکانیزم انتقال حرارت در آسفالت و جاده‌های

### خورشیدی

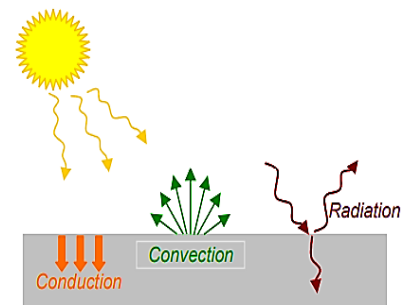
بر اساس قانون اول ترمودینامیک (تئوری تعادل انرژی یا بقای انرژی<sup>۲</sup>)، انرژی نمی‌تواند از بین برود یا ایجاد شود، بلکه تنها می‌تواند از شکلی به شکل دیگر تغییر کند. کاربرد این قانون در پنل‌های خورشیدی آسفالتی به بخش جامد؛ شامل مواد روسازی و لوله‌ها و یک بخش سیال؛ شامل هوای سطحی و مایعات جاری در لوله‌ها تقسیم می‌شود.

مکانیزم انتقال حرارت به شرح مراحل زیر عمل می‌کند:

۱- تابش خورشیدی: ابتدا تعادل بین تابش خورشیدی واردشده به آسفالت و تابش گرمایی خارج‌شده از آن رخ می‌دهد.

۲- هدایت حرارتی: سپس انتقال حرارت از لایه سطحی روسازی به لایه‌های داخلی آسفالت که در عمق لوله‌های تعبیه‌شده قرار دارند صورت می‌گیرد.

۳- انتقال حرارتی: در نهایت به دلیل اختلاف دمای بین سطح داخلی لوله و سیال درون آن، انتقال حرارت حادث شده که منجر به افزایش دمای سیال می‌شود. مراحل فوق در شکل (۲) نمایش داده شده است. (Beddu, Ahmad, Mohd Kamal, et al., 2024).



شکل ۲. مکانیزم انتقال حرارت

(Beddu, Ahmad, Kamal, et al., 2024)

## ۳- مشخصات ابعادی و ساختار جاده‌های خورشیدی

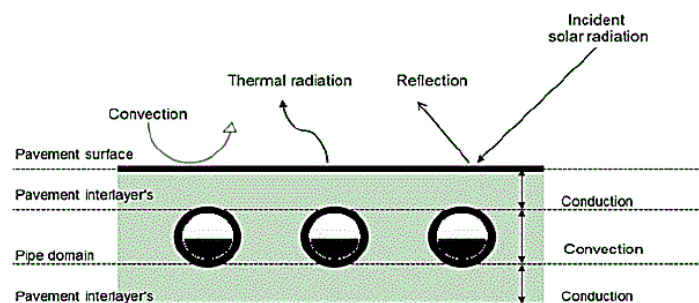
جاده‌های خورشیدی معمولاً از سه لایه اصلی به شرح موارد زیر تشکیل می‌شوند که هر کدام وظایف خاصی در جمع‌آوری، مدیریت و انتقال انرژی خورشیدی دارند (شکل ۳) (Renoald et al., 2016).

### ۱-۳- لایه سطحی جاده

سطح روسازی به‌عنوان بخش بالایی مجموعه، مستقیماً در معرض تابش نور خورشید قرار دارد و وظیفه انتقال اشعه‌های خورشیدی به سلول‌های خورشیدی زیرین را بر عهده دارد. این لایه از شیشه‌ای شفاف با استحکام بالا ساخته شده است، که بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر ضخامت دارد. برای اطمینان از ایمنی و عملکرد مناسب، سطح این شیشه دارای برجستگی‌های ریز است تا اصطکاک لازم برای تماس با لاستیک چرخ و حرکت و سایل نقلیه را فراهم کند، در عین حال می‌بایست شفافیت کافی را برای عبور نور خورشید حفظ کند.

### ۲-۳- لایه الکترونیکی

لایه الکترونیکی شامل یک برد کنترل هوشمند و مدارهای پشتیبان است، که وظایف متعددی را انجام می‌دهد که معمولاً بین ۲ تا ۵ میلی‌متر ضخامت دارد و در حس کردن بارهای سطحی، کنترل عناصر گرمایشی برای ذوب برف و یخ، و جلوگیری از انسداد جاده‌ها در شرایط آب‌وهوایی نامساعد نیز کاربرد دارد. همچنین، این لایه مجهز به سیستم‌هایی برای تامین انرژی و کنترل روشنایی، برقراری ارتباطات و نظارت بر وضعیت جاده است که در ایجاد یک "راه هوشمند" نقش اساسی دارد. این لایه به‌طور منظم در طول جاده نصب شده و به افزایش کارایی و ایمنی آن کمک می‌کند (Zhou et al., 2021).



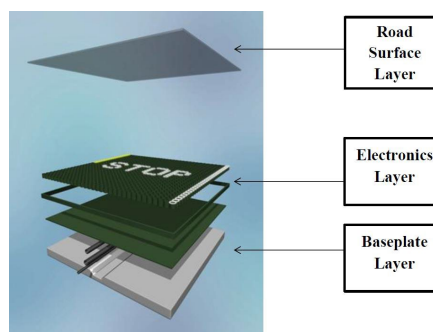
شکل ۳. مقطع نمونه‌ای از جاده‌های خورشیدی و محل جایگذاری سلول‌های خورشیدی (Beddu, Ahmad, Kamal, et al., 2024)

جدول ۱. مشخصات الکتریکی پنل‌های خورشیدی پروژه‌ی Wattway (Wattway Datasheet, 2019)

مقدار	مشخصه
۰/۶۹ متر مربع	مساحت سطح تولید انرژی در هر ماژول
۲۸ عدد	تعداد سلول‌های فتوولتائیک فعال
۱۲۵ ولت پیک	توان اسمی
۱۸/۲٪	راندمان متوسط ماژول
۱۵/۱ ولت	ولتاژ در نقطه حداکثر توان
۸/۲۷ آمپر	جریان در نقطه حداکثر توان
۱۸/۵ ولت	ولتاژ مدارباز
۸/۷ آمپر	جریان اتصال کوتاه
۶۰ ولت	حداکثر ولتاژ
±۰/۵	تلورانس توان خروجی ماژول
استاندارد IP68	نوع کانکتور
۱۵ آمپر	حداکثر جریان معکوس مجاز

### ۳-۳- لایه پایه

این لایه یا لایه زیرین که ضخامت آن معمولاً بین ۱۵ تا ۲۸ سانتی‌متر است، وظیفه توزیع انرژی جمع‌آوری‌شده توسط لایه الکترونیکی و انتقال سیگنال‌های تاسیساتی مانند مخابرات، اینترنت و تلویزیون را به عهده دارد. این لایه با طراحی ضدآب خود، از تجهیزات حساس الکترونیکی در برابر شرایط محیطی محافظت کرده و زیرساختی پایدار برای عملکرد بهینه سیستم فراهم می‌کند. شکل (۴) نمونه‌ای از لایه‌های یک جاده‌ی خورشیدی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمونه‌ای از اجزای تشکیل دهنده جاده‌های خورشیدی

(Renoald et al., 2016)

### ۴- نمونه‌ای از مشخصات مکانیکی و الکتریکی جاده‌های

#### خورشیدی

یک نمونه از فناوری‌های نوآورانه‌ای که در جاده‌های خورشیدی برای تولید برق از سطح مسیرهای عبور و مرور مورد استفاده قرار می‌گیرد، Wattway است که توسط شرکت Colas و با همکاری مؤسسه ملی انرژی خورشیدی فرانسه توسعه یافته و در پروژه‌های مختلفی از جمله جاده‌های خورشیدی در هلند به کار گرفته شده است (PreScouter, 2019).

این سیستم که مشخصات الکتریکی و فیزیکی آن به ترتیب در جداول (۱) و (۲) آورده شده است و به منظور تأمین انرژی پایدار برای زیرساخت‌های شهری، از جمله ایستگاه‌های شارژ وسایل نقلیه برقی، روشنایی عمومی و تابلوهای پیام متغیر طراحی شده است. در این سیستم از پنل‌های فتوولتائیک استفاده می‌شود.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی پتل‌های خورشیدی پروژه Wattway (Wattway Datasheet, 2019)

مشخصه	مقدار/توضیحات
ابعاد هر ماژول	۱۲۵۷*۶۹۰ میلی‌متر
ضخامت ماژول	۶ میلی‌متر
وزن هر ماژول	۵/۵ کیلوگرم
مقاومت در برابر ضربه	IK07
نوع سلول‌های فتوولتائیک	مونوکریستالی
مقاومت در برابر بارعبوری	یک میلیون عبور محور با وزن ۱۳ تن
آزمون اصطکاک سطحی	مطابق دستور العمل رسمی فرانسه (DGTIM/DIT 2015-19)

شهری استفاده شود. این امر به‌ویژه در کاهش آلودگی هوا در مناطق شهری مؤثر است (Rahman et al., 2023).

#### ۴-۱-۳- کاهش اثر جزیره گرمایی شهری

پدیده جزیره گرمایی شهری<sup>۳</sup> به افزایش غیرطبیعی دمای مناطق شهری در مقایسه با نواحی روستایی و طبیعی اطراف آن اشاره دارد (شکل ۵). این افزایش دما عمدتاً به دلیل جذب و نگهداری گرما توسط سطوح غیرقابل نفوذی مانند آسفالت و بتن رخ می‌دهد که در طول روز انرژی خورشیدی را جذب کرده و در طول شب به تدریج آزاد می‌کند.

جاده‌های خورشیدی به عنوان یک راهکار نوین، می‌توانند با جایگزینی آسفالت‌های متعارف با مواد شفاف و بازتابنده، تأثیر این پدیده را کاهش دهد. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از این فناوری می‌تواند دمای سطح جاده‌ها را حدود ۲ تا ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد، که این امر در بهبود کیفیت هوا و کاهش مصرف انرژی برای خنک‌سازی ساختمان‌های مجاور نقش بسزایی دارد (Zhou, Pei, Nasir, et al. 2021).

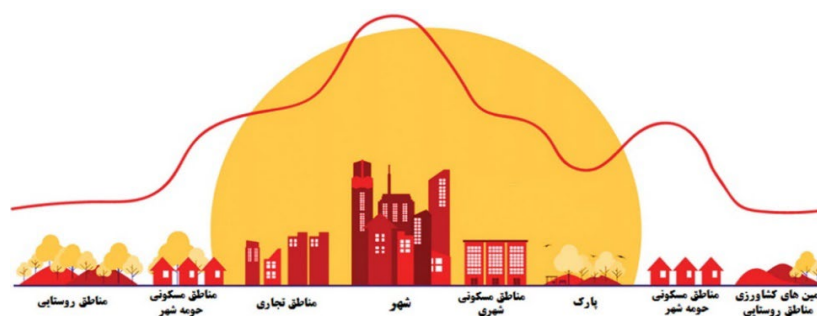
#### ۴-۱-۱- شاخص‌های مهم در ارزیابی جاده‌های خورشیدی

##### ۴-۱-۱-۱- زیست محیطی

جاده‌های خورشیدی با استفاده از فناوری‌های نوین تولید انرژی تجدیدپذیر، مزایای زیست‌محیطی چشمگیری را به همراه دارد. این سازه‌ها که از ماژول‌های فتوولتائیک (PV) برای تولید برق در سطح جاده‌ها استفاده می‌کنند، راهکاری پایدار برای مقابله با مشکلات زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی ارائه می‌دهد (Zhou et al., 2021).

##### ۴-۱-۱-۲- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای

یکی از برجسته‌ترین اثرات زیست‌محیطی جاده‌های خورشیدی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این جاده‌ها با تولید انرژی پاک و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، به کاهش گاز کربن دی‌اکسید و سایر گازهای مضر کمک می‌کند. طبق یک مطالعه، جاده‌های خورشیدی می‌توانند بین ۲۰ تا ۳۰ درصد از نیاز انرژی شارژ خودروهای الکتریکی در مناطق شهری پرجمعیت را تأمین کنند. این انرژی تجدیدپذیر می‌تواند به‌طور مستقیم برای روشنایی خیابان‌ها، شارژ خودروهای الکتریکی و تأمین برق زیرساخت‌های



شکل ۵. جزیره گرمایی شهری (Nasiri, 2020)

#### ۴-۱-۴- استفاده بهینه از زیرساخت‌های موجود

یکی از مزایای جاده‌های خورشیدی، استفاده بهینه از زیرساخت‌های موجود است. این جاده‌ها با استفاده از سطوح جاده‌ای برای تولید انرژی، نیاز به زمین‌های اضافی برای ساخت نیروگاه‌های خورشیدی را کاهش می‌دهد. همچنین آن‌ها به حفظ زیستگاه‌های طبیعی و کاهش تخریب زمین کمک می‌کند.

شکل شماره (۶) نمونه‌ای از یک جاده خورشیدی در مسیر عبور دوچرخه را نشان می‌دهد. ادغام این فناوری با سیستم‌های شارژ بی‌سیم و روشنایی هوشمند، بهره‌وری انرژی را بهبود بخشیده و زیرساخت‌های شهری پایدار ایجاد می‌کند (Shekhar et al., 2018).

#### ۴-۱-۵- کاهش استفاده از مواد شیمیایی برای ذوب یخ و برف

در جاده‌های خورشیدی، سیستم‌های گرمایش یکپارچه می‌توانند برای ذوب برف و یخ استفاده شود. این جایگزینی، نیاز به مواد شیمیایی یخ‌زدا را کاهش داده و از ورود این مواد به محیط‌زیست جلوگیری می‌کند (Axton, 2024).

#### ۴-۱-۶- تأثیر گرد و غبار

گرد و غبار و آلاینده‌های دیگر نظیر خزان ریزان پائیزی و گل آلودگی‌های پس از بارش از جمله چالش‌های اصلی پنل‌های خورشیدی است. تجمع آلاینده‌ها بر روی سطح پنل‌ها باعث کاهش شدت نور خورشیدی و کاهش تابش دریافتی می‌شود که منجر به افت تولید انرژی می‌گردد. برای مثال مطالعات نشان داده‌اند که چگالی گرد و غبار حتی به مقدار  $5/44$  گرم در متر مربع می‌تواند تا  $12/7$  درصد بازدهی پنل را کاهش دهد (Hachicha et al., 2019). همچنین، در صورت عدم پاک‌سازی منظم، افت بازدهی می‌تواند طی شش ماه به  $50$  درصد کاهش یابد (Darwish et al., 2015). زاویه نصب پنل‌ها نیز در نشست آلاینده‌ها روی پنل‌ها موثر است و پنل‌های با زاویه کم‌تر، گرد و غبار بیشتری را جذب می‌کنند.

#### ۴-۱-۷- تأثیر دما

دمای بالا، به‌ویژه در تابستان و در مناطق گرمسیری، مقاومت داخلی پنل‌ها را افزایش داده و ولتاژ خروجی آن‌ها را کاهش می‌دهد. این کاهش ولتاژ می‌تواند به طور مستقیم در بازدهی سیستم موثر باشد و نیاز به طراحی سیستم‌های خنک‌کننده را ضروری می‌سازد (Amelia et al., 2016)، (Aly et al., 2019).



شکل ۶. نمونه یک جاده خورشیدی اجرا شده در مسیر عبور دوچرخه (Timmers, 2023)



شکل ۷. نمونه‌ای از جاده خورشیدی مجهز به سیستم‌های روشنایی هوشمند، هشداردهنده و نشانگر خطر برای راننده‌ها (Renoald et al., 2016)

#### ۸-۱-۴- تأثیر رطوبت

رطوبت بالا اغلب به افزایش تشکیل شبنم روی پنل‌ها منجر می‌شود که به نوبه خود ذرات گرد و غبار بیشتری را جذب می‌کند. این تأثیر منفی در طول زمان باعث کاهش توان تولیدی پنل‌ها می‌شود. با این حال، اثر مستقیم رطوبت کمتر از زمانی است که با دیگر عوامل مانند گرد و غبار یا باد ترکیب شود. مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب رطوبت با گرد و غبار می‌تواند حدود ۱۰ درصد افت توان طی پنج هفته ایجاد کند (Hachicha et al., 2019)، (Darwish et al., 2013).

#### ۴-۱-۹- تأثیر سایه‌اندازی و دیگر عوامل محیطی

سایه‌اندازی، حتی اگر به طور جزئی باشد، می‌تواند تأثیر چشمگیری بر عملکرد پنل‌ها داشته باشد. در این راستا، سایه‌اندازی در یک‌چهارم سطح پنل می‌تواند تا ۳۳ درصد بازدهی را کاهش دهد و چنانچه سطح سایه به سه‌چهارم سطح پنل برسد، این کاهش به بیش از ۹۲ درصد خواهد رسید (Darwish et al., 2013).

علاوه بر این، عواملی مانند بارش و باد می‌تواند به صورت مثبت عمل کند. بارش باران می‌تواند به شستشوی طبیعی سطح پنل‌ها کمک کند و گرد و غبار را کاهش دهد، در حالی که باد می‌تواند ذرات گرد و غبار را از سطح پنل پاک کند، اما اگر شدت باد زیاد باشد، ممکن است باعث آسیب به ساختار پنل شود (Darwish et al., 2013).

#### ۳-۴- شاخص ایمنی

جاده‌های خورشیدی نه تنها به عنوان منبعی از انرژی تجدیدپذیر، بلکه به عنوان ابزاری مؤثر برای بهبود ایمنی ترافیکی در نظر گرفته می‌شوند. با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، این جاده‌ها می‌توانند محیطی ایمن‌تر برای رانندگان و عابران پیاده فراهم کنند. موارد زیر نمونه‌هایی شاخص از کمک پنل‌های خورشیدی به ایمنی عبور و مرور هستند.

#### ۴-۳-۱- روشنایی هوشمند و پیشگیری از تصادفات

جاده‌های خورشیدی با بهره‌گیری از سیستم‌های روشنایی هوشمند، به‌طور خودکار و بسته به شرایط محیطی، نور کافی را تأمین می‌کند. این سیستم‌ها می‌تواند در شب، در شرایط بارانی یا برفی و همچنین در نقاطی که تردد عابران پیاده بیشتر است، به‌صورت خودکار روشن شود. با این کار، دید رانندگان در شرایط نامساعد بهبود یافته و خطر تصادفات کاهش یافته است (شکل ۷).

#### ۴-۳-۲- تشخیص و هشدار خطرات

جاده‌های خورشیدی می‌تواند به سیستم‌های هوشمند متصل شود که قادر به شناسایی شرایط خطرناک مانند وجود موانع در مسیر یا ترافیک سنگین هستند. این سیستم‌ها می‌تواند به‌صورت فوری به رانندگان هشدار دهد و آنها را از خطرات احتمالی آگاه نماید. به عنوان نمونه، نصب سنسورهای تشخیص حرکت و دوربین‌های نظارتی در این جاده‌ها می‌تواند اطلاعات لحظه‌ای از وضعیت ترافیک ارائه دهند.

#### ۴-۳-۳- ارتقاء زیرساخت‌های امنیتی

با نصب پنل در جاده‌های خورشیدی، امکان ایجاد زیرساخت‌های امنیتی مانند تامین انرژی دوربین‌های مدار بسته و سیستم‌های نظارت بر ترافیک در داخل و حاشیه و حریم جاده فراهم می‌شود. این تجهیزات می‌تواند به مدیریت ترافیک و جلوگیری از رفتارهای ناامن رانندگان کمک کنند. بدیهی است که با ارتقاء امنیت جاده‌ها، احساس ایمنی در بین رانندگان و عابران پیاده افزایش می‌یابد.

#### ۴-۳-۴- پتانسیل نظارت و کنترل ترافیک

جاده‌های خورشیدی می‌تواند به‌عنوان نقاط اتصال برای سیستم‌های مدیریت ترافیک عمل نماید. این قابلیت به مقامات محلی این امکان را می‌دهد که وضعیت ترافیک را به‌طور دقیق‌تری زیر نظر داشته و از داده‌های جمع‌آوری شده برای بهبود برنامه‌ریزی‌های ترافیکی و کاهش ترافیک استفاده کنند.

با افزایش ایمنی جاده‌ها، کاهش تصادفات نیز حاصل می‌شود، که این امر به نوبه خود می‌تواند به کاهش هزینه‌های اجتماعی ناشی از حوادث ترافیکی منجر گردد. براساس گزارش اداره ملی ایمنی ترافیک بزرگراه‌ها (NHTSA) در سال ۲۰۲۲، هزینه‌های سالانه ناشی از تصادفات جاده‌ای بالغ بر ۱/۹ تریلیون دلار بوده است، که این مبلغ شامل ۶۶۵ میلیارد دلار هزینه‌های اقتصادی مستقیم و ۱/۴ تریلیون دلار هزینه‌های ناشی از کاهش کیفیت زندگی بوده است. جاده‌های خورشیدی، با افزایش ایمنی و کاهش تصادفات، می‌تواند به کاهش این هزینه‌ها کمک کرده و به صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجهی منجر شود. (AASHTO, 2023).

#### ۶- پی‌نوشت‌ها

1. Solar Roads
2. The Law of Conservation of Energy
3. Urban Heat Island (UHI)
4. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)

#### ۵- نتیجه‌گیری

بررسی پروژه‌ها و پژوهش‌های مرتبط با جاده‌های خورشیدی حاکی از آن است، که این جاده‌ها با وجود پتانسیل بالا در تولید

#### ۷- مراجع

performance of a photovoltaic panel. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200, 109948 .  
-Amelia, A., Irwan, Y., Leow, W., Irwanto, M., Safwati, I., & Zhafarina, M. (2016). Investigation of the effect temperature on photovoltaic (PV) panel output performance. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, 6(5), 682-688.

-AASHTO. (2023a). TRIP Report Examines Causes & Costs of Traffic Fatalities. *AASHTO Journal*.

-AASHTO. (2023b). TRIP Report Examines Causes & Costs of Traffic Fatalities. *AASHTO Journal*.

-Aly, S. P., Ahzi, S., & Barth, N. (2019). Effect of physical and environmental factors on the

- on the PV performance: A comprehensive review. *Energy Science & Engineering*, 10(2), 656-675.
- Hu, H., Vizzari, D., Zha, X., & Roberts, R. (2021). Solar pavements: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111712. [doi.org/10.1016/j.rser.2021.111712](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111712)
- Ma, T., Yang, H., Gu, W., Li, Z., & Yan, S. (2019). Development of walkable photovoltaic floor tiles used for pavement. *Energy Conversion and Management*, 183, 764-771 .
- Mani, M., & Pillai ,R. (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3124-3131 .
- Nasiri, k. (2020). Urban cold islands. *Roshd Magazine*.
- PreScouter, V. M., Anil Vishnu. (2019). Smart Road Technologies Shaping the Future of Transportation. *PreScouter* .
- 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.
- Renoald, A. J., Hemalatha, V., Punitha, R., Sasikala, M., & Sasikala, M. (2016). Solar roadways-the future rebuilding infrastructure and economy. *International Journal of Electrical and Electronics Research*, 4(2), 14-19 .
- Shekhar, A., Kumaravel, V., Klerks, S., Wit, S., O., & Zeman, M. (2018). Harvesting Roadway Solar Energy—Performance of the Installed Infrastructure Integrated PV Bike Path. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 1-8. [doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2820998](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2820998)
- Theray.org. (2015). Solar-Powered Vehicle Charging. In: theray.org.
- Timmers, O. (2023). Photovoltaic bikw paths in the Netherlands with Wattway technology.
- Tyagi, V., Rahim, N. A., Rahim, N., Jeyraj, A., & Selvaraj, L. (2013). Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 443-461 .
- Axton, S. (2024). Solar Panel Roads – A Vision for Pavements as Renewable Energy Sources.
- 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*.
- Beddu, S., Ahmad, M., Mohd Kamal, N. L., Mohamad, D., Itam, Z., Min, Y. H., & Ahmad Zailani, W. W. (2024). A State-of-the-Art Review of Hydronic Asphalt Solar Collector Technology for Solar Energy Harvesting on Road Pavement. *MATEC Web Conf.*, 400, 03007. [doi.org/10.1051/mateconf/202440003007](https://doi.org/10.1051/mateconf/202440003007)
- Darwish, Z. A., Kazem, H. A., Sopian, K., Al-Goul, M., & Alawadhi, H. (2015). Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 735-744 .
- Darwish, Z. A., Kazem, H. A., Sopian, K., Alghoul, M., & Chaichan, M. T. (2013). Impact of some environmental variables with dust on solar photovoltaic (PV) performance: review and research status. *International J of Energy and Environment*, 7(4), 152-159 .
- Ferrovia, N. (2023). *Ferrovia talks high-tech highways, connected and autonomous vehicles at SXSW 2023*.
- Fouad, M., Shihata, L. A., & Morgan, E. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1499-1511 .
- Green, M., Dunlop, E., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2021). Solar cell efficiency tables (version 57). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(1), 3-15 .
- Hachicha, A. A., Al-Sawafta, I., & Said, Z. (2019). Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under United Arab Emirates weather conditions. *Renewable Energy*, 141, 287-297.
- Hasan, K., Yousuf, S. B., Tushar, M. S. H. K., Das, B. K., Das, P., & Islam, M. S. (2022). Effects of different environmental and operational factors

# Solar Roads and Factors Affecting Their Performance

*Ali Garshasbi, M.Sc., Student, Faculty of Civil & Environmental Engineering,  
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

*Amir Kavussi, Professor, Faculty of Civil & Environmental Engineering,  
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

*Parham Hayati, Assistant Professor, Faculty of Civil & Environmental Engineering,  
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

*E-mail: aligarshasbii2001@gmail.com*

Received: April 2025- Accepted: November 2025

## **ABSTRACT**

Solar roads and using renewable energy as prominent innovations in transportation infrastructure have great potential to improve road performance and provide clean energy. This article has examined solar roads, their heat transfer mechanisms, and dimensional structure. Also, two main indicators affecting the performance of solar roads have been examined: 1- The environmental index includes the reduction of greenhouse gas emissions, the reduction of the urban heat island effect, the optimal use of existing infrastructure, the reduction of the use of chemicals for melting ice and snow, and environmental conditions. 2- The safety index examines the effects of smart lighting, accident prevention, hazard detection and warning, and monitoring capacities on solar roads. This article describes the importance of developing and implementing this technology in transportation infrastructure. It demonstrates that solar roads as an innovative solution can help achieve sustainable development goals and improve the quality of urban life.

**Keywords:** Solar Roads, Renewable Energy, Environment, Road Safety