Science Popularization

Sustainable Development with Integrated Photovoltaics: From Technology to Project Governance

Mahdi Paknezhad[1], Seyed Farid Ghannadpour[*,1]

Article Info

Article type:
Popularization of Science

Article history:

Receive Date:
07 June 2026

Revise Date:
09 June 2026

Accept Date:
11 June 2026

Available online:
21 June 2026

Keywords:

Building-integrated-photovoltaics

Perovskite

Fire safety

Circular economy

Adaptive project-management.

Climate change has driven the world toward constructing zero-energy buildings. Traditional silicon solar panels face severe installation limitations in urban areas due to their heavy weight, rigid structure, and high fragility. In recent years, polymer and perovskite solar panels have emerged as highly attractive alternatives for sustainable urban development. These novel panels are completely flexible and can easily transmit visible light. Furthermore, by utilizing advanced tandem architectures, their overall power conversion efficiency has increased significantly. These panels can be directly integrated into building facades to successfully realize the concept of building-integrated photovoltaics. Despite these remarkable technical advancements, the large-scale commercialization of this technology faces major obstacles. Rapid fire spread risks in building facades, severe dust accumulation in arid regions, and high economic complexities are among the most critical challenges. To solve these operational issues, engineers have recently developed green solvents and waterless cleaning robots. This article introduces these novel solar technologies using a simplified language. It thoroughly examines the environmental and safety challenges during the implementation phase. Finally, the key role of adaptive project management in overcoming these institutional barriers is investigated. The results indicate that successful implementation of these sustainable projects in Iran strictly requires cross-sectoral coordination and reforms.

Cite this article: Paknezhad,M ; Ghannadpour,S F. (2026). Sustainable Development with Integrated Photovoltaics: From Technology to Project Governance. *Science Cultivation*, 16 (1), pp. 88-94.

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights.
Publisher: Foundation for the Advancement of Science and Technology in Iran (FAST-IRAN) and Iran Society of Biophysical Chemistry (ISOBC)

* Corresponding Author. Associate Professor. Tel: +982173225015 -, Fax: +982173021214, E-mail: Ghannadpour@iust.ac.ir
[1] School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

توسعه پایدار با فتوولتائیک‌های یکپارچه: از فناوری تا حکمرانی پروژه‌ها

مهدی پاک نژاد[1]، سید فرید قنادپور [*،1]

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله ترویجی

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت:
۱۷ خرداد ۱۴۰۵
تاریخ بازنگری:
۱۹ خرداد ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش:
۲۱ خرداد ۱۴۰۵
تاریخ انتشار:
۳۱ خرداد ۱۴۰۵

کلیدواژه‌ها:
فتوولتائیک یکپارچه،
پروسکایت،
ایمنی حریق،
اقتصاد چرخشی،
مدیریت پروژه تطبیقی

چکیده

تغییرات اقلیمی جهان را به سمت ساخت ساختمان‌های انرژی‌صفر هدایت کرده است. پنل‌های خورشیدی سیلیکونی به دلیل وزن زیاد و شکنندگی، محدودیت‌های فراوانی برای نصب در شهرها دارند. در سال‌های اخیر، پنل‌های خورشیدی پلیمری و پروسکایتی به‌عنوان یک جایگزین جذاب معرفی شده‌اند. این پنل‌های نوین انعطاف‌پذیر هستند و می‌توانند نور مرئی را از خود عبور دهند. همچنین با استفاده از ساختارهای تاندم (چندپیوندی)، بازدهی این پنل‌ها افزایش چشمگیری یافته است. این پنل‌ها می‌توانند در نمای ساختمان‌ها ادغام شوند و مفهوم فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان را به‌صورت عملی محقق کنند. باوجود این پیشرفت‌های فنی، تجاری‌سازی این فناوری با چالش‌های مهمی روبه‌رو است. خطر گسترش آتش در نمای ساختمان‌ها، نشست گردوغبار و پیچیدگی‌های اقتصادی از جمله این چالش‌ها هستند. این مقاله با زبانی ساده، فناوری‌های نوین خورشیدی را معرفی می‌کند. سپس چالش‌های بهره‌برداری و ایمنی را مورد بررسی قرار می‌دهد. در نهایت، نقش کلیدی مدیریت پروژه تطبیقی برای غلبه بر این موانع تحلیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که اجرای موفق این پروژه‌ها در ایران، نیازمند هماهنگی میان‌رشته‌ای و اصلاح قوانین توسعه شهری است.

استناد: پاک نژاد،مهدی؛ قنادپور،سید فرید . (۱۴۰۵). توسعه پایدار با فتوولتائیک‌های یکپارچه: از فناوری تا حکمرانی پروژه‌ها. *نشاء علم*، ۱۶ (۱)،ص ۸۸-۹۴.

ناشر: بنیاد پیشبرد علم و فناوری در ایران و انجمن بیوشیمی فیزیک ایران
© نویسندگان حق نشر و کلیه حقوق انتشار را برای خود حفظ می‌کنند.

* عهده‌دار مکاتبات: دانشیار. تلفن: ۷۳۲۲۵۰۱۵ (۹۸۲۱+)، دورنگار: ۷۳۰۲۱۲۱۴ (۹۸۲۱+)، آدرس الکترونیکی:Ghannadpour@iust.ac.ir

[1] گروه مدیریت بهره وری و پروژه، دانشکده صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۱. مقدمه و ضرورت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر

مصرف انرژی در ساختمان‌ها یکی از عوامل اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان است. آژانس بین‌المللی انرژی گزارش داده است که ساختمان‌ها بیش از سی درصد از کل انرژی جهان را مصرف می‌کنند [۱]. به همین دلیل، کاهش مصرف انرژی در بخش ساختمان برای مقابله با تغییرات اقلیمی بسیار مهم است. مفهوم ساختمان‌های انرژی‌صفر در سال‌های اخیر بسیار موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است. این ساختمان‌ها باید بتوانند انرژی مورد نیاز خود را به طور کامل از منابع پاک و محلی تأمین کنند. خورشید یکی از پاک‌ترین و دردسترس‌ترین منبع انرژی برای تحقق این هدف بزرگ است.

بااین‌حال استفاده از پنل‌های خورشیدی سنتی در شهرها با محدودیت‌های بزرگی همراه است. پنل‌های سیلیکونی رایج در بازار وزن بسیار زیادی دارند، ساختار آن‌ها شکننده است و ظاهر تیره دارند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود معماران تمایلی به استفاده از آن‌ها در نمای ساختمان‌های مدرن نداشته باشند [۲].

برای غلبه بر این محدودیت‌ها فناوری فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان[1] (BIPV) معرفی شده است. در این فناوری پنل خورشیدی دیگر یک وسیله اضافی روی سقف نیست. این پنل‌ها به طور مستقیم جایگزین مصالح ساختمانی در نما می‌شوند [۳]. این رویکرد نوآورانه به شهرها کمک می‌کند تا از سطح وسیع نمای عمودی برای تولید برق استفاده کنند. بااین‌وجود توسعه موفقیت‌آمیز این فناوری نیازمند مواد نوین و تغییر در ساختارهای مدیریت پروژه‌های شهری است.

۲. گذار فناوری: از سلول‌های پایه تا معماری تاندم

نسل‌های جدید سلول‌های خورشیدی تفاوت‌های بنیادینی با همتایان سیلیکونی خود دارند. دانشمندان برای رفع مشکلات وزن و شکنندگی به سراغ مواد شیمیایی جدیدی رفته‌اند. دو دسته مهم از این مواد، فتوولتائیک‌های ارگانیک[2] (OPV) و سلول‌های خورشیدی پروسکایتی[3] (PSC) هستند. این مواد نیمه‌رسانا می‌توانند در حلال‌های خاصی حل شوند و این ویژگی باعث می‌شود پنل‌های خورشیدی مانند جوهر روی رول‌های پلاستیکی منعطف چاپ شوند [۴].

سلول‌های خورشیدی ارگانیک، با برخورداری از وزن بسیار کم و انعطاف‌پذیری کامل، قابلیت عبور نور مرئی و تولید هم‌زمان برق را دارا هستند [۵]. ازسوی‌دیگر، سلول‌های پروسکایتی به دلیل ساختار بلوری خاص خود بازدهی فوق‌العاده‌ای ارائه می‌دهند [۶]؛ اما هر یک از این فناوری‌ها به‌تنهایی در جذب تمام طیف‌های نوری با محدودیت‌هایی مواجه‌اند.

برای عبور از این محدودیت‌ها، دانشمندان معماری تاندم یا چندپیوندی را توسعه داده‌اند که در آن، قرارگیری چند لایه از مواد مختلف روی یکدیگر به‌گونه‌ای عمل می‌کند که لایه بالایی نور مرئی را جذب کرده و لایه پایینی اشعه فروسرخ را به دام می‌اندازد [۷]. این همکاری در سطح مولکولی با کاهش چشمگیر هدررفت گرما، راندمان پنل‌ها را به‌شدت افزایش داده است؛ به‌طوری که گزارش‌های علمی نشان می‌دهند سلول‌های تاندم پروسکایت–سیلیکون با عبور از مرز بازدهی سی و سه درصد، توانسته‌اند برتری تاریخی سیلیکون را در هم بشکنند [۸].

استفاده از این پنل‌های نوین تنها به نمای ساختمان‌ها محدود نمی‌شود، بلکه در کشاورزی هوشمند نیز پنل‌های نیمه‌شفاف به‌عنوان پوشش گلخانه‌ها به کار می‌روند تا ضمن عبور نور لازم برای رشد گیاهان، برق تجهیزات را نیز تأمین کنند [۹]. علاوه بر این، نصب این پنل‌ها روی سقف خودروهای الکتریکی برای شارژ مداوم باتری‌ها [۱۰]، نشان‌دهنده تحولی اساسی در توسعه زیرساخت‌های انرژی شهری است.

۳. ادغام در معماری: زیبایی‌شناسی و پنجره‌های هوشمند

معماران و طراحان شهری همواره به ظاهر ساختمان‌ها توجه ویژه‌ای دارند و رنگ تیره و یکنواخت پنل‌های سنتی همیشه یکی از موانع اصلی توسعه فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان به شمار می‌رفته است. برای حل این مشکل، پژوهشگران فناوری رنگ‌بندی ساختاری را معرفی کرده‌اند که با استفاده از نانوذرات و ساختارهای میکروسکوپی برای بازتاب طیف خاصی از نور [۱۱]،

[1] Building-integrated photovoltaics (BIPV)
[2] Organic photovoltaics (OPV)
[3] Perovskite solar cell (PSC)

ظاهری شبیه به سنگ مرمر یا آجر سفالی به پنل‌ها می‌بخشد [۱۲]. اگرچه ایجاد این رنگ‌ها به دلیل بازتاب بخشی از نور خورشید باعث کاهش اندک بازدهی می‌شود، اما مزایای زیبایی‌شناختی آن پذیرش این فناوری را در پروژه‌های شهری به‌شدت افزایش داده است.

علاوه بر این، پیشرفت‌های جدید به سمت تولید پنجره‌های خورشیدی هوشمندی حرکت کرده‌اند که می‌توانند میزان عبور نور و گرما را بر اساس شرایط محیطی تغییر دهند [۱۳]. برای نمونه، پنجره‌های الکتروکرومیک با دریافت یک جریان الکتریکی بسیار ضعیف در روزهای گرم تیره می‌شوند تا از ورود گرمای بیش‌ازحد جلوگیری کنند. همچنین ترکیب مواد تغییرفازدهنده در این پنجره‌ها راهکاری بسیار کارآمد است [۱۴]، چرا که این مواد با جذب گرمای اضافی محیط در طول روز و آزادسازی آن در هنگام شب، نوسانات دمایی داخل ساختمان را به حداقل رسانده و مصرف انرژی را به‌شدت کاهش می‌دهند.

۴. تجاری‌سازی پایدار: تولید دوستدار محیط‌زیست و اقتصاد چرخشی

ازآنجاکه تولید صنعتی پنل‌های خورشیدی نوین باید از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی پایدار باشد، محققان حلال‌های سبز مبتنی بر منابع طبیعی را جایگزین حلال‌های شیمیایی و سمی گذشته کرده‌اند [۱۵]. استفاده از این حلال‌های ایمن با فراهم کردن امکان چاپ پنل‌ها در هوای آزاد [۱۶]، راه را برای تولید انبوه با استفاده از روش چاپ پیوسته هموار می‌سازد [۱۷].

ازسوی‌دیگر، برای رفع چالش وجود مقادیر کمی سرب در ساختار برخی سلول‌ها، مهندسان از فناوری کپسوله‌سازی با رزین اپوکسی بهره می‌برند تا پنل را در برابر رطوبت و نشت مواد سمی در شرایط سخت جوی کاملا آب‌بندی کنند. همچنین جایگزینی فلزات گران‌بها با الکترودهای کربنی نه‌تنها هزینه تولید را کاهش داده [۱۸]، بلکه به دلیل خاصیت آب‌گریزی بالای کربن، به پایداری طولانی‌مدت پنل نیز کمک شایانی کرده است.

در نهایت، تحقق اقتصاد چرخشی یکی دیگر از دستاوردهای مهم این فناوری به شمار می‌رود، زیرا پنل‌های پلیمری در پایان عمر مفید خود قابلیت بازیافت دارند. دانشمندان با استفاده از روش انحلال انتخابی، جوهر فرسوده را شست‌وشو می‌دهند [۱۹] تا لایه شیشه‌ای و الکترودهای زیرین کاملا سالم باقی بمانند. این تجهیزات سالم بلافاصله برای چاپ مجدد جوهر خورشیدی جدید مورد استفاده قرار می‌گیرند که این امر هزینه‌های بلندمدت پروژه‌ها را به میزان چشمگیری کاهش می‌دهد.

۵. چالش‌های بهره‌برداری در مقیاس شهری و راهکارهای مهندسی

۱.۵. مدیریت حرارت و تولید همزمان برق و گرما

تابش شدید آفتاب با افزایش دمای پنل‌های خورشیدی، نه‌تنها بازدهی تولید برق را کاهش می‌دهد، بلکه موجب فرسودگی زودهنگام لایه‌های پلیمری می‌گردد [۲۰]. متخصصان برای حل این مشکل، سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان را طراحی کرده‌اند [۲۱]. در این سیستم‌ها تعبیه یک کانال هوای ویژه در پشت پنل و استفاده از فناوری‌هایی مانند برخورد جت هوا، باعث عبور سریع هوای خنک می‌شود [۲۲]. این جریان هوا ضمن خنک کردن پنل و افزایش بازدهی الکتریکی آن، گرمای تولید شده را به خود جذب کرده و به یک منبع حرارتی ارزشمند تبدیل می‌شود [۲۳]. بدین ترتیب با هدایت مستقیم این هوای گرم به سیستم‌های گرمایش و تهویه ساختمان، پنل خورشیدی به طور هم‌زمان برق و حرارت تولید می‌کند.

۲.۵. ایمنی حریق و کاهش ریسک

نصب پنل‌های خورشیدی در نمای برج‌ها همواره دغدغه‌های ایمنی مانند خطر آتش‌سوزی را به همراه دارد، زیرا فضای خالی بین پنل و دیوار با ایجاد اثر دودکش در زمان حریق بسیار خطرناک عمل می‌کند [۲۴]. این پدیده جریان هوای بالارونده را تشدید کرده و شعله‌های آتش را با سرعت به طبقات بالاتر می‌کشد [۲۵]. بااین‌حال علم مهندسی راهکارهای مؤثری برای مهار این خطر ارائه داده است؛ به‌طوری که در پنل‌های جدید استفاده از ورقه‌های فولادی نازک در پشت پنل، مقاومت سامانه در برابر گسترش شعله را افزایش داده و احتمال سرایت آتش را کاهش می‌دهد [۲۶]. در کنار رعایت فاصله هوایی مناسب و استفاده از عایق‌های نسوز، نصب سنسورهای هوشمند برای جلوگیری از جرقه زدن کابل‌ها نیز نقش حیاتی دارد [۲۷]. این سنسورها با بهره‌گیری از هوش

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

مصنوعی، نوسان‌های خطرناک برق را پیش از ایجاد شعله تشخیص داده و جریان را بلافاصله قطع می‌کنند.

۳.۵. مدیریت گردوغبار و ارزیابی سطح آمادگی فناوری

انباشت گردوغبار در مناطق خشک تولید برق پنل‌ها را به‌شدت کاهش می‌دهد [۲۸] و ازآنجاکه شست‌وشوی سنتی نیازمند مقادیر زیادی آب است، اجرای آن در مناطق درگیر کم‌آبی هیچ توجیه محیط‌زیستی ندارد. به همین دلیل مدیران پروژه‌های انرژی برای انتخاب روش جایگزین، از شاخص سطح آمادگی فناوری[1] به‌عنوان یک استاندارد جهانی برای ارزیابی بلوغ تکنولوژی‌ها استفاده می‌کنند [۲۹]. بر اساس این ارزیابی دقیق، روش شست‌وشوی دستی با آب در حال منسوخ شدن بوده و امروزه ربات‌های تمیزکننده خشک بالاترین سطح آمادگی را به خود اختصاص داده‌اند [۳۰]. این ربات‌های خودران با بهره‌گیری از هوش مصنوعی و برس‌های مخصوص، سطح پنل‌ها را بدون مصرف آب پاک‌سازی می‌کنند. در کنار این موارد، توسعه فناوری‌های نوین دیگری مانند سپرهای الکترودینامیک که با پالس‌های الکتریکی ذرات گردوغبار را دفع می‌کنند [۳۱]، تداوم تولید حداکثری برق را در شرایط سخت جوی تضمین می‌نماید.

۴.۵. چرا آمادگی فناوری به‌تنهایی کافی نیست؟

اگرچه پیشرفت‌های اخیر نشان می‌دهد که فناوری‌های نوین فتوولتائیک به دستاوردهای بزرگی در زمینه بازدهی و ایمنی رسیده‌اند، اما آمادگی فناوری به‌تنهایی تضمین‌کننده موفقیت پروژه‌های شهری نیست و انتقال آن از محیط آزمایشگاه به مقیاس واقعی، مستلزم آمادگی کامل در ابعاد مدیریتی و حکمرانی است. پروژه‌های فتوولتائیک یکپارچه در مرحله پیاده‌سازی با مجموعه‌ای از چالش‌های غیرفنی مانند فرآیندهای پیچیده صدور مجوز، محدودیت‌های مالی، تعدد ذی‌نفعان و ناهماهنگی‌های سازمانی مواجه می‌شوند که می‌توانند روند تجاری‌سازی یک فناوری کاملاً بالغ را با شکست روبه‌رو کنند. ازاین‌رو موفقیت نهایی این پروژه‌ها نیازمند استقرار سازوکارهای حکمرانی کارآمد و مدیریت پروژه تطبیقی است و بر همین اساس، چالش‌های پیاده‌سازی و ناهم‌راستایی حکمرانی به‌عنوان موانع اصلی توسعه شهری در بخش بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۶. شکاف پیاده‌سازی و ناهم‌راستایی حکمرانی در کلان‌پروژه‌ها

پژوهشگران ریشه اجرا نشدن گسترده فناوری‌های خورشیدی در شهرها را در مفهوم شکاف پیاده‌سازی جست‌وجو می‌کنند [۳۲]. برنامه‌های کلان معمولاً با نگاهی صرفاً فنی و اقتصادی تدوین می‌شوند. اما این برنامه‌ها در مرحله اجرا در سطح شهرداری‌ها با واقعیت‌های پیچیده‌ای؛ مانند مقاومت‌های اجتماعی و بوروکراسی اداری برخورد می‌کنند [۳۳]. مطالعات نشان می‌دهد ریشه اصلی این شکست‌ها ناهم‌راستایی حکمرانی است [۳۴]. موفقیت کلان‌پروژه‌ها به هماهنگی دقیق میان نهادهای مختلف وابسته است. تفاوت در منطق کاری و سرعت تصمیم‌گیری میان نهادهای قانون‌گذار، مالی و زیرساختی باعث توقف پروژه‌ها می‌شود. این ناهم‌راستایی در چهار بعد اساسی نمایان می‌شود [۳۵].

نخست ناهم‌راستایی مکانی است. تولید برق خورشیدی معمولاً در مناطق دور از مراکز پرجمعیت انجام می‌شود. انتقال این برق به شهرها نیازمند احداث شبکه‌های پرهزینه است [۳۶]. نصب پنل‌های یکپارچه در نمای ساختمان‌های شهری این مشکل را تا حد زیادی برطرف می‌کند.

دوم ناهم‌راستایی زمانی است. سرعت عمل بخش خصوصی در خرید و نصب تجهیزات بسیار بالا است. در مقابل بررسی درخواست‌های اتصال به شبکه توسط نهادهای دولتی ماه‌ها طول می‌کشد [۳۷]. این توقف زمانی باعث دلسردی سرمایه‌گذاران و کاهش توجیه اقتصادی پروژه می‌شود.

سوم ناهم‌راستایی رویه‌ای است. یک پروژه شهری باید مجوزهای متعددی از اداره برق، آتش‌نشانی و شهرداری دریافت کند. گاهی استانداردهای این نهادها با یکدیگر در تضاد هستند که باعث توقف مکرر پروژه می‌شود [۳۸]. ایجاد یک درگاه واحد برای صدور مجوزها این مانع را رفع می‌کند.

چهارم ناهم‌راستایی توزیعی است. نهادهای دولتی معمولاً تمام خطرات تأمین زمین، نوسانات مالی و تأخیر شبکه را بر دوش توسعه‌دهنده قرار می‌دهند [۳۹]. این عدم تعادل باعث می‌شود

[1] TRL

پیمانکاران پروژه را رها کنند. دولت‌ها باید بخشی از این ریسک‌ها را بپذیرند.

این ناهم‌راستایی‌ها نشان می‌دهد روش‌های سنتی مدیریت پروژه دیگر پاسخگو نیستند. کلان‌پروژه‌های خورشیدی در محیطی پر از عدم‌قطعیت اجرا می‌شوند. مدیران ارشد باید از مدیریت پروژه تطبیقی استفاده کنند [۴۰]. در این روش مدیر به‌صورت مداوم تغییرات را پایش کرده و مشارکت فعال تمام ذی‌نفعان را جلب می‌کند.

۷. چشم‌انداز بومی: الزامات پیاده‌سازی و حکمرانی تطبیقی در ایران

ایران با داشتن بیش از سیصد روز آفتابی در سال ظرفیت بی‌نظیری برای تولید انرژی پاک دارد، اما هم‌زمان با چالش‌های بزرگی مانند کمبود شدید آب و طوفان‌های مداوم گردوغبار روبه‌رو است. همچنین ناترازی شبکه برق در فصل‌های مختلف مشکلات فراوانی برای صنایع ایجاد کرده است که نصب پنل‌های یکپارچه در نمای ساختمان‌های شهری می‌تواند این فشار را به‌شدت کاهش دهد. این پنل‌های نوین با تولید برق در همان محل مصرف، نیاز به احداث شبکه‌های انتقال طولانی را از بین می‌برند [۴۱]. در کنار این موضوع بهره‌گیری از ربات‌های تمیزکننده خشک که مصرف آب را به صفر می‌رسانند برای مناطق درگیر با خشکسالی و ریزگردها یک ضرورت حیاتی محسوب می‌شود [۴۲].

در سطح آسیا و کشورهای همجوار توسعه سیستم‌های فتوولتائیک برای تولید هم‌زمان برق و حرارت سرعت چشمگیری یافته است. کشور چین به‌عنوان پیش‌گام جهانی، توسعه و به‌کارگیری سامانه‌های فتوولتائیک تولید هم‌زمان برق و حرارت را در مقیاس گسترده دنبال کرده است [۴۳]. همچنین کشورهای امارات و عربستان که با چالش‌های اقلیمی کاملاً مشابه ایران روبه‌رو هستند سرمایه‌گذاری عظیمی روی این سیستم‌های دوگانه انجام داده‌اند. این کشورها برای تأمین هم‌زمان برق ساختمان‌ها و حرارت لازم برای دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن از پنل‌های یکپارچه بهره می‌برند و با استفاده از ربات‌های نظافتچی بدون آب بر مشکل طوفان‌های شن غلبه کرده‌اند [۴۴]. ازسوی‌دیگر کشور ترکیه نیز موفق شده است سیستم‌های تولید همزمان برق و گرما را برای حل مشکل ناترازی انرژی پیاده‌سازی کند. ترکیه از طریق اصلاح قوانین ملی ساختمان و گذار به حکمرانی تطبیقی توانسته است سرمایه‌های بخش خصوصی را با موفقیت به سمت این پروژه‌ها هدایت نماید [۴۵]. باتوجه‌به این تجربیات ارزشمند الگوبرداری از ترکیه در زمینه سیاست‌گذاری و جذب سرمایه و همچنین استفاده از دانش عربستان و امارات در مدیریت حرارت و مهار گردوغبار می‌تواند کامل‌ترین نقشه راه عملیاتی برای ایران باشد [۴۶-۴۴].

۸. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای کاربردی

انقلاب انرژی خورشیدی با ظهور سلول‌های چندپیوندی و رنگی وارد عصر جدیدی شده است. این پنل‌های نوین با استفاده از حلال‌های سبز چاپ می‌شوند و آسیب زیست‌محیطی کمتری نسبت به گذشته به همراه دارند. تجهیز این پنل‌ها به سیستم‌های بازیافت حرارت بازدهی آن‌ها را به‌شدت افزایش داده است. همچنین توسعه سامانه‌های ایمنی، استفاده از لایه‌های محافظ و فناوری‌های پایش هوشمند، امکان استفاده ایمن‌تر از این تجهیزات در نمای ساختمان‌های مسکونی و تجاری را فراهم کرده است. توسعه پایدار این زیرساخت‌های حیاتی در گرو تغییر نگاه مدیران ارشد از روش‌های سنتی به سمت حکمرانی تطبیقی است [۴۷].

برای بهره‌برداری موفق از این فرصت‌ها در کشور چند پیشنهاد کاربردی به سیاست‌گذاران ارائه می‌شود. نخست این که مقررات ملی ساختمان و استانداردهای آتش‌نشانی باید به‌سرعت به‌روزرسانی شوند. نصب سنسورهای هوشمند تشخیص جرقه و استفاده از لایه‌های فلزی نسوز در نمای ساختمان‌ها باید به یک قانون اجباری تبدیل گردد. پیشنهاد دوم ترویج ابزارهای شبیه‌سازی پیشرفته و مدیریت تطبیقی در پروژه‌های عمرانی است. مهندسان معمار و طراحان تأسیسات باید پیش از شروع عملیات ساخت‌وساز تمام چالش‌های احتمالی را در نرم‌افزارهای تخصصی شبیه‌سازی و برطرف کنند. پیشنهاد سوم توسعه اقتصاد چرخشی در داخل کشور است. دولت باید به شرکت‌های دانش‌بنیان برای بومی‌سازی حلال‌های سبز یارانه تخصیص دهد. همچنین حمایت از فناوری‌های بازیافت پنل‌های خورشیدی بسیار ضروری است. این حمایت‌های هدفمند باعث می‌شود که چرخه تولید انرژی در کشور به طور کامل پاک و اقتصادی و پایدار باقی بماند.

تأییدیه اصالت مقاله و عدم‌استفاده از هوش مصنوعی

بدین‌وسیله گواهی می‌شود که این مقاله و یا هیچ بخشی از آن پیش از این در جای دیگری منتشر نشده است. همچنین، نویسندگان متعهد می‌شوند که تمام محتوای این پژوهش حاصل تلاش فکری خودشان بوده و از هیچ‌گونه ماشین و ابزارهای هوش مصنوعی برای نگارش آن استفاده نشده است.

منابع Reference

[1]. IEA. (2024). Renewables 2024 Analysis and forecast to 2030, International Energy Agency, Vol. 1, No. 1. PP. 1-150.

[2]. Jelle, B. P. (2012). Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 100, No. 1. PP. 69-96.

[3]. Kuhn, T. E. (2021). Review of technological design options for building integrated photovoltaics, Energy and Buildings, Vol. 231, No. 2. PP. 110381.

[4]. Zang, Y. (2025). Large-area printing technologies for organic photovoltaic cells, Materials Today Energy, Vol. 54, No. 1. PP. 102150.

[5]. Yu, H. (2026). Research progress on active layer materials for semi-transparent organic photovoltaics, Journal of Energy Chemistry, Vol. 117, No. 2. PP. 60-69.

[6]. Ma, W. (2026). Physical insights into single-component organic photovoltaics, Joule, Vol. 10, No. 3. PP. 102397.

[7]. Qahtan, T. F. (2026). State-of-the-art in flexible tandem solar cells, Solar Energy, Vol. 315, No. 1. PP. 114755.

[8]. Wang, S. (2026). Flexible perovskite/silicon tandem solar cells with 33.6% efficiency, Nature, Vol. 649, No. 4. PP. 59-64.

[9]. Song, W. (2023). Semi-transparent organic photovoltaics for agrivoltaic applications, Nano Energy, Vol. 116, No. 2. PP. 108805.

[10]. Yamaguchi, M. (2022). Impact and recent approaches of high-efficiency solar cell modules for PV-powered vehicles, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 61, No. 1. PP. SC0802.

[11]. Xie, Y. (2026). A review of colored building-integrated photovoltaics for building decarbonization: Technological and market perspectives, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 235, No. 3. PP. 116924.

[12]. Peharz, G. (2017). Application of plasmonic coloring for making building integrated PV modules comprising of green solar cells, Renewable Energy, Vol. 109, No. 2. PP. 542-550.

[13]. Jia, Z. (2025). Smart solar windows for an adaptive future: A comprehensive review of performance, methods and applications, Energy & Buildings, Vol. 346, No. 1. PP. 116227.

[14]. Ke, W. (2023). Modelling analysis and performance evaluation of a novel hybrid CdTe-PCM PV glass module for building envelope application, Energy, Vol. 284, No. 4. PP. 129182.

[15]. Wang, H. (2025). Recent advances in ambient-air-processed organic photovoltaics: Devices design and printing technology, Review of Materials Research, Vol. 1, No. 1. PP. 100060.

[16]. Zi, W. (2018). Flexible perovskite solar cells based on green, continuous roll-to-roll printing technology, Journal of Energy Chemistry, Vol. 27, No. 3. PP. 971-989.

[17]. Dela Peña, T. A. (2025). Advancing organic photovoltaics processed from green-solvents: From characterization methods to optimization strategies, EnergyChem, Vol. 7, No. 2. PP. 100162.

[18]. Balagowtham, N. (2025). Challenges in commercializing perovskite solar cells with focus on sustainability, stability, and cost efficiency, Solar Energy, Vol. 301, No. 1. PP. 113892.

[19]. Kim, B. J. (2016). Selective dissolution of perovskite solar cells for recycling of functional materials, Nature Communications, Vol. 7, No. 4. PP. 11735.

[20]. Bilen, K. (2023). Effects of cooling on performance of photovoltaic/thermal solar panels: A comprehensive review, Solar Energy, Vol. 262, No. 2. PP. 111829.

[21]. Lukasik, J. (2026). An overview of heat transfer intensification methods for air-cooled flat plate building-integrated photovoltaic/thermal systems, Solar Energy, Vol. 312, No. 1. PP. 114597.

[22]. Wajs, J. (2024). Assessment of the impact of jet impingement technique on the energy efficiency of air-cooled BIPV/T roof tile, Archives of Thermodynamics, Vol. 45, No. 2. PP. 5-18.

[23]. Yang, T. (2015). Experimental investigation of a two-inlet air-based building integrated photovoltaic/thermal system, Applied Energy, Vol. 159, No. 1. PP. 70-79.

[24]. Aram, M. (2023). Scaling study of smoke spread from building integrated photovoltaic double skin façade fire for achieving sustainable buildings, Sustainable Cities and Society, Vol. 97, No. 3. PP. 104648.

[25]. Gao, Z. (2026). Hazard-source-based review of fire safety in building-integrated photovoltaics, Solar Energy, Vol. 316, No. 1. PP. 114837.

Lawrence Berkeley National Laboratory, Vol. 1, No. 1. PP. 1-45.

[38]. Lahav, A. D. (2018). Procedural design, Vanderbilt Law Review, Vol. 71, No. 3. PP. 821-840.

[39]. Lamont, J. (2017). Distributive Justice, Routledge, Vol. 1, No. 1. PP. 1-250.

[40]. Bryson, J. (2011). The strategy change cycle: An effective strategic planning approach for public and nonprofit organizations, Jossey-Bass, Vol. 1, No. 1. PP. 41-80.

[41]. Gulaydin, O. (2025). Net-zero Turkey: Renewable energy potential and implementation challenges, Energy for Sustainable Development, Vol. 87, No. 2. PP. 101744.

[42]. Al-Housani, M. (2019). Assessment of various dry photovoltaic cleaning techniques and frequencies on the power output in dusty environments, Sustainability, Vol. 11, No. 4. PP. 2850.

[43]. Zhang, C. (2024). An integrated industrial PV panel cleaning recommendation system for optimal dust removal, Applied Energy, Vol. 377, No. 1. PP. 124692.

[44]. Sanfilippo, A. (2024). Energy transition strategies in the Gulf Cooperation Council countries, Energy Strategy Reviews, Vol. 55, No. 2. PP. 101512.

[45]. Qahtan, A. M. (2025). Building-integrated photovoltaics in Saudi Arabia for sustainable energy transition: A comprehensive review of status, challenges, and future prospects, Energy and Buildings, Vol. ۳۴۷, No. 1. PP. 116301.

[46]. Bostani, M. (2026). Potentials and challenges of solar-based cogeneration systems for decentralized production of power, heat, and freshwater in rural MENA regions, Energy Conversion and Management: X, Vol. 30, No. 1. PP. 101732.

[47]. Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study, Research Policy, Vol. 31, No. ۸–۹. PP. 1257-1274.

[26]. Kristensen, J. S. (2021). Experimental study of flame spread underneath photovoltaic modules, Fire Safety Journal, Vol. 120, No. 2. PP. 103027.

[27]. Akram, M. W. (2022). Failures of photovoltaic modules and their detection: A review, Applied Energy, Vol. 313, No. 4. PP. 118822.

[28]. Kazem, H. A. (2020). A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems, Journal of Cleaner Production, Vol. 276, No. 1. PP. 123187.

[29]. Ibrahim, R. (2026). Technology readiness level assessment of solar PV cleaning technologies, Solar Energy, Vol. 307, No. 2. PP. 114360.

[30]. Fan, S. (2022). A novel water-free cleaning robot for dust removal from distributed photovoltaic in water-scarce areas, Solar Energy, Vol. 241, No. 3. PP. 553-563.

[31]. Kawamoto, H. (2020). Improved detachable electrodynamic cleaning system for dust removal from soiled photovoltaic panels, Journal of Electrostatics, Vol. 107, No. 1. PP. 103481.

[32]. Vergragt, P. (2014). Sustainable production, consumption, and livelihoods: Global and regional research perspectives, Journal of Cleaner Production, Vol. 63, No. 2. PP. 1-12.

[33]. Petersen, J.-P. (2018). The application of municipal renewable energy policies at community level in Denmark: A taxonomy of implementation challenges, Sustainable Cities and Society, Vol. 38, No. 4. PP. 205-218.

[34]. Eitan, A. (2026). From approval to operation: Governance misalignment in renewable energy implementation, Energy Strategy Reviews, Vol. 66, No. 1. PP. 102310.

[35]. Candel, J. J. L. (2016). Toward a processual understanding of policy integration, Policy Sciences, Vol. 49, No. 3. PP. 211-231.

[36]. Desmet, K. (2014). Spatial development, American Economic Review, Vol. 104, No. 4. PP. 1211-1243.

[37]. Rand, J. (2025). Queued up: characteristics of power plants seeking transmission interconnection,