Innovation Management Journal
Vol 14, No 2 (52), Summer 2025
https://www.nowavari.ir

Policy analysis of solar cell technology development priorities in Iran

Mehdi Rajipour[1], Ali Khajehnaieni[*2]

Received: 28/03/2025 **PP: 205-236** **Accepted:** 22/09/2025

Abstract

In recent years, the increasing energy imbalance in Iran has doubled the necessity of developing renewable energy sources. In the meantime, solar cells have attracted global attention as one of the emerging technologies due to their high efficiency growth rate, low production cost, and flexibility. This research, using content analysis of existing resources and interviews with relevant experts, examines the priorities for the development of solar cell technology in Iran and, by analyzing global trends, explains the strengths and challenges in the development of various solar cell-related technologies. The research findings show that, according to the participants in the research, the perovskite solar cell is the first priority for technology development in Iran due to its simple production process, low cost, small-scale development capability, and flexible application of this technology. Also, according to the participants, the perovskite technology is highly compatible with the research capacity of universities and the capabilities of the country's knowledge-based companies, and national needs. Developing a roadmap based on research and development, financial support, and the creation of industrial infrastructure will be a necessary step to achieve mass production and utilization of this technology in Iran.

Keywords: Solar cells, prioritization, technology development, renewable energy, Iran.

Reference: Rajipour, M., & Khajehnaieni, A. (2025). Policy analysis of solar cell technology development priorities in Iran. ***Innovation Management Journal***, 14(2), 205-236.

Doi: https://doi.org/10.22034/imj.2025.514249.2894

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. PHD student in technology management, Allameh Tabatabaei University, Tehran, Iran. mehdi.rajipour@gmail.com
2. Assistant Professor of Public Policy, Faculty of Law and Political Science, Allameh Tabatabaei University, Tehran, Iran (Corresponding author) naieniali@atu.ac.ir

نشریه علمی مدیریت نوآوری
سال ۱۴/ شماره ۲ (۵۲) / تابستان ۱۴۰۴
https://www.nowavari.ir

نوع مقاله: پژوهشی

تحلیل سیاستی اولویت‌های توسعه فناوری سلول‌های خورشیدی در ایران

مهدی راجی‌پور[۱]، علی خواجه نائینی*[۲]

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۸ صص: ۲۳۶-۲۰۵ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

چکیده

در سال‌های اخیر، افزایش ناترازی انرژی در ایران، ضرورت توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر را دوچندان کرده است. در این میان، سلول‌های خورشیدی به دلیل نرخ رشد بازدهی بالا، هزینه تولید پایین و قابلیت انعطاف‌پذیری، به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوظهور، توجه جهانی را به خود جلب کرده‌اند. این پژوهش، با استفاده از تحلیل محتوای منابع موجود و مصاحبه با خبرگان مرتبط، اولویت‌های توسعه فناوری سلول‌های خورشیدی در ایران را بررسی کرده و با تحلیل روندهای جهانی، نقاط قوت و چالش‌های موجود در مسیر توسعه انواع فناوری‌های مرتبط با سلول خورشیدی را تبیین می‌کند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که از نظر مشارکت‌کنندگان در تحقیق، سلول خورشیدی پروسکایتی به دلیل فرایند تولید ساده، هزینه پایین، قابلیت توسعه در مقیاس کوچک و انعطاف‌پذیری کاربرد این فناوری، اولویت نخست توسعه فناوری در ایران است. همچنین، به باور مشارکت‌کنندگان، فناوری پروسکایت با ظرفیت تحقیقاتی دانشگاه‌ها و توان شرکت‌های دانش‌بنیان کشور و نیازهای ملی، انطباق بالایی دارد. تدوین نقشه‌راه مبتنی‌بر تحقیق و توسعه، حمایت‌های مالی و ایجاد زیرساخت‌های صنعتی، گامی ضروری برای تحقق تولید انبوه و بهره‌گیری از این فناوری در ایران خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: سلول‌های خورشیدی، اولویت فناوری، توسعه فناوری انرژی تجدیدپذیر، ایران.

استناددهی(APA): راجی‌پور، مهدی، و خواجه نائینی، علی (۱۴۰۴). تحلیل سیاستی اولویت‌های توسعه فناوری سلول‌های خورشیدی در ایران، ***نشریه علمی مدیریت نوآوری***، ۱۴(۲)، ۲۳۶-۲۰۵.
Doi: https://doi.org/10.22034/imj.2025.514249.2894

۱. دانشجوی دکتری مدیریت فناوری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران. mehdi.rajipour@gmail.com
۲. استادیار سیاستگذاری عمومی، دانشکده حقوق و علوم سیاسی، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران (نویسنده مسئول) naieniali@atu.ac.ir

نشریه علمی مدیریت نوآوری
سال ۱۴/ شماره ۲ (۵۲) / تابستان ۱۴۰۴

مقدمه

منابع انرژی به دو دسته کلی منابع تجدیدپذیر و منابع تجدیدناپذیر تقسیم شده‌اند. انرژی خورشیدی، انرژی آبی، انرژی بادی، انرژی زیست‌توده و انرژی زمین‌گرمایی، پنج گروه اصلی انرژی تجدیدپذیر هستند که هر یک، شرایط عملیاتی و بازده تبدیل انرژی خاص خود را دارند (انگ[1] و همکاران, ۲۰۲۲). تبعات زیان‌بار زیست‌محیطیِ استفاده از سوخت‌های فسیلی، همچون گرمایش جهانی و تغییرات آب‌وهوایی (وایِن[2]، ۲۰۰۸: ۶۳-۴۹) موجب تمایل روزافزون کشورها برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر شده است (سانتیکا[3] و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۱۴-۲۰۱).

توسعه فناوری‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر، نه‌تنها به توسعه پایدار کمک می‌کند، بلکه از نظر اقتصادی نیز حائز اهمیت است؛ چرا که این فناوری‌ها موجب کاهش هزینه تولید برق شده و از منابعی استفاده می‌کنند که به‌طور طبیعی جایگزین می‌شوند (کاردونی[4]، سومیانی بینتی، بینتی کاری، ۲۰۱۶: ۱۰-۱). در این میان، انرژی خورشیدی یکی از پُرکاربردترین منابع انرژی تجدیدپذیر در جهان به‌شُمار می‌رود (الحمرونی[5] و همکاران، ۲۰۲۰: ۲۱۱۷-۲۱۱۱). سامانه‌های خورشیدی حرارتی و فتوولتائیک (پی‌وی[6]) دو نوع اصلی از سامانه‌های انرژی خورشیدی هستند که برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی و تبدیل آن به انرژی الکتریکی، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پژوهشگران بسیاری در مسیر کشف و توسعه فناوری بهینه‌سازی این سامانه‌ها به‌منظور بهبود و افزایش بازده تبدیل انرژی خورشیدی همراه با کاهش اثرات زیست‌محیطی آنها گام برداشته‌اند (الهی نظری[7] و همکاران، ۲۰۲۱) پیشتازی سلول‌های خورشیدی (تأمین‌کننده انرژی فتوولتائیک) در

1. Ang
2.Vine
3. Santika
4. Kardooni
5. Alhamrouni
6. PV
7. Alhuyi Nazari

تـأمین انـرژی تجدیدپـذیر جهـان (رن ۲۱[1]، ۲۰۲۴) نشـان از آن دارد کـه ایـن فناوری، یکـی از برجسته‌تـرین و امیدوارکننـده‌تـرین فنـاوری‌هـا بـرای تـأمین انـرژی در آینـده اسـت (محمـود الحفـدهی[2] و همکـاران، ۲۰۲۰). بـر اسـاس آخـرین گـزارش آزمایشـگاه ملـی انـرژی تجدیدپـذیر[3] آمریکـا از بـازدهی انـواع مختلـف سـلول‌هـای خورشـیدی، ایـن سـلول‌هـا در ۶ گـروه اصـلی چنداتصـالی، گـالیم‌آرسـناید تـک اتصـالی، سـیلیکونی بلـوری، لایـه‌هـای نـازک تنـدم هیبریـدی (دو ترمینالـه) و سـلول‌هـای خورشـیدی نوظهـور دسـته‌بنـدی مـی‌شـوند. سـلول‌هـای رنـگ‌حسـاس، پروسـکایتی، آلـی، تانـدِم آلـی، سـی.زد.تی.اس، اس.ای.اس[4]، نقـاط کوانتـومی و تانـدِم پروسـکایتی، انـواع مختلـف سـلول‌هـای خورشـیدی هسـتند کـه در ایـن دسـته‌بنـدی در گـروه سـلول‌هـای خورشـیدی نوظهـور جـای گرفتـه‌انـد (آزمایشـگاه ملـی انـرژی تجدیدپذیر، ۲۰۲۵).

بـه‌طـور کلـی، چهـار فنـاوری اصـلی در حـوزه فتوولتائیـک در ادبیـات علمـی و سیاسـت‌گـذاری فنـاوری مطـرح هسـتند کـه عبـارت‌انـد از: سـلول‌هـای سـیلیکونی[5]، پروسـکایتی[6]، سـی‌آی‌جـی‌اس[7] و سـلول‌هـای حسـاس بـه رنـگ[8]. ایـن چهـار فنـاوری بـه‌عنـوان نماینـدگان نسـل اول، دوم و سـوم سـلول‌هـای خورشـیدی، در مطالعـات مقایسه‌ای و تحلیل روند توسـعه فنـاوری مـورد ارزیـابی قـرار گرفتـه‌انـد. بـا توجـه بـه جایگـاه سـلول‌هـای خورشـیدی در آینـده صـنعت انـرژی خورشـیدی، ضـرورت شناسایی حوزه‌هـای اولویـت بـرای توسـعه ایـن فنـاوری در سـطح ملـی بـیش‌ازپـیش وجود دارد. بنـابراین پرسـش پـژوهش بـه ایـن صـورت مطـرح مـی‌شـود: «حـوزه‌هـای اولویـت توسـعه فنـاوری سـلول‌هـای خورشـیدی در ایـران بـا توجـه بـه نیازهـا و توانمندی‌های داخلی کدام‌انـد و بـا چـه نقـاط ضـعف و قـوتی روبـه‌رو هسـتند؟». ایـن امـر نیازمنـد هـم‌راستاسـازی سـه حـوزه کلیـدی علـم، صـنعت و سیاسـت فنـاوری

1. REN 21
2. Alhafadhi
3. NREL: National Renewable Energy Laboratory
۴. CZTSSe: ترکیبی از عناصر مس، روی، قلع، گوگرد و سلنیوم
5. Silicon-based
6. Perovskite
7. CIGS: Copper Indium Gallium Selenide
8. DSSC: Dye-Sensitized Solar Cells

است. در حوزه سیاست‌گذاری علم و فناوری، «اولویت‌گذاری فناوری» به‌معنای شناسایی نظام‌مند فناوری‌هایی است که دارای بیشترین ظرفیت برای پاسخگویی به نیازهای راهبردی کشور و بیشترین هم‌راستایی با ظرفیت‌های داخلی هستند. این مفهوم، نقشی کلیدی در جهت‌دهی منابع محدود پژوهشی و تمرکز بر حوزه‌های فناورانه با بیشترین بازده سرمایه‌گذاری ایفا می‌کند.

پیشینه پژوهش و مبانی نظری

پیشینه پژوهش

الهی و همکاران (۱۳۹۴) به مطالعه اشاعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر پرداخته‌اند. نتایج پژوهش، الگویی را آشکار کرد که نشان‌دهنده وجود ۴ دسته از عوامل اصلی است. فشار علم، کشش تقاضا، جذابیت سرمایه‌گذاری و «چارچوبی و زیرساختی» است. بیانلو و زارع احمدآبادی (۱۳۹۵) به‌منظور پیش‌بینی تحقیقات فناوری در قلمرو منتخب از انرژی خورشیدی، پتنت‌های استخراج‌شده از پایگاه ثبت پتنت آمریکا با استفاده از رویکرد تحلیل پتنت را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در آینده تحقیقات فناوری فتوولتائیک به سمت نسل سوم فناوری (مواد آلی) و همچنین تمرکز بر مؤلفه‌های محیطی و تأثیرات آن بر عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک سوق پیدا خواهد کرد. رحیمی‌راد و همکاران (۱۳۹۶) با هدف تحلیل تاریخی شکل‌گیری کارکردهای نظام نوآوری فناورانه سیستم‌های خورشیدی فتوولتاییک در ایران به استخراج موتور محرک نوآوری در هر مرحله پرداخته‌اند. در این پژوهش با توجه به ماهیت نظام نوآوری فناورانه فتوولتاییک در ایران که عمدتاً مبتنی‌بر واردات تجهیزات و مونتاژ آنها در داخل است، مفاهیم نظام نوآوری فناورانه مبتنی‌بر انتشار مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد روند انتشار فناوری فتوولتاییک در ایران، عمدتاً با استقرار فناوری خارجی در داخل و مونتاژ انجام شده است. اما صرف داشتن ماشین‌آلات و خط تولید، به‌ویژه در فضای پُرشتاب توسعه فناوری در دنیا، کشور را صاحب فناوری نمی‌کند. برای پاسخ به حلقه مفقوده چرخه ساخت و تولید سلول‌های فتوولتاییک و بومی

سازی این فناوری، نیاز مبرمی به تحقیق و توسعه در تحقیقات دانشگاهی و مؤسسات علمی وجود دارد. آنها معتقدند که گرچه تاکنون بازیگران محدودی وارد توسعه این فناوری شده‌اند، اما در صورت تکرار بیشتر این حلقه به صورت مطلوب، بازیگران با نرخ فزاینده‌ای افزوده شده و می‌توانند تمام بازیگران بخش عرضه و تقاضا را با خود همراه کنند و درنتیجه تداوم این توالی، یادگیری در حین کار نیز رُخ می‌دهد و می‌توانند به بهبود ماهیت فناوری نیز کمک کنند. خیاطیان یزدی و همکاران (۱۳۹۹)، تطور تاریخی توسعه فناوری سیستم‌های خورشیدی فتوولتائیک در ایران را با تأکید بر نقش نهادهای فیزیکی و سخت در بازه زمانی سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ بررسی کرده‌اند. بر اساس یافته‌های این تحقیق، در دوره اول (۱۳۷۰ تا ۱۳۸۵) تمرکز نهادی بر آشنایی مسئولان با انرژی‌های تجدیدپذیر و ترویج این انرژی بوده است. درحالی‌که در دوره دوم (۱۳۸۵ تا ۱۳۹۴)، تمرکز نهادی به سمت حمایت از توسعه فناوری سیستم‌های خورشیدی فتوولتائیک متمایل و متعاقباً و در دوره سوم (۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸) جهت‌گیری نهادی به سمت ایجاد بازار انرژی‌های تجدیدپذیر و خورشیدی در ایران هدایت شده است. محمدنژاد و همکاران (۱۴۰۴) با بهره‌گیری از دو منظر بازیگران (دولتی، خصوصی و جامعه مدنی) و تجلیات (انجام، تفکر و سازماندهی) به توسعه یک گونه‌شناسی از نوآوری‌های اجتماعی حوزه انرژی تجدیدپذیر می‌پردازد و سپس با نقشه‌برداری از فعالیت‌ها و ابتکارات در ایران، این گونه‌شناسی را مورد بررسی قرار می‌دهد. یافته‌های این پژوهش حاکی از عدم‌تعادل نقش‌آفرینی بازیگران مختلف (به‌ویژه جامعه مدنی) در نوآوری‌های اجتماعی حوزه انرژی تجدیدپذیر می‌باشد.

درباره اولویت‌گذاری انواع فناوری‌های سلول خورشیدی، مطالعه (اونی[1] و همکاران، ۲۰۲۴) به‌طور جامع چهار حوزه فناوری سلول خورشیدی را از نظر سازوکارهای تلفات انرژی، ظرفیت بهبود بازده و محدودیت‌های فنی را ارزیابی کرده و تفاوت‌های کلیدی میان آنها را برجسته ساخته است. در این مطالعه، فناوری‌های سیلیکونی به‌عنوان گزینه‌ای بالغ، پروسکایتی به‌عنوان فناوری

1. Oni

نوظهور با بهره‌وری بالا، سی‌آی‌جی‌اس به‌عنوان گزینه‌ای با انعطاف‌پذیری ساخت و دی‌اس‌اس‌سی به‌عنوان فناوری مناسب برای نور کم، مورد توجه قرار گرفته‌اند (اونی و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین جیانولی[1] (۲۰۲۱) در یک مطالعه مقایسه‌ای درباره فناوری‌های نوظهور خورشیدی، به بررسی دی‌اس‌اس‌سی، سلول‌های آلی و پروسکایتی پرداخته و با ارجاع به فناوری‌های مرسوم مانند سی‌آی‌جی‌اس و سیلیکونی، یک چارچوب مقایسه‌ای ارائه کرده است. این مطالعه نشان می‌دهد که گرچه دی‌اس‌اس‌سی در محیط‌های کم‌نور عملکرد مناسبی دارد، اما فناوری‌های پروسکایتی و سی‌آی‌جی‌اس از منظر توسعه صنعتی آینده‌دارتر هستند (جیانولی[2]، ۲۰۲۱). در همین راستا، ماشین و مارکز[3](۲۰۲۴) نیز با تمرکز بر پیشرفت مواد به‌کاررفته در سلول‌های خورشیدی، به بررسی جامع فناوری‌های سیلیکونی، آلی، پروسکایتی و همچنین فناوری‌های فیلم نازک[4] شامل دی‌اس‌اس‌سی و سی‌آی‌جی‌اس پرداخته‌اند. آنها تأکید دارند که ترکیب مواد در پروسکایت– سیلیکون‌های تاندِم می‌تواند راهگشای افزایش بازده و کاهش هزینه باشد و CIGS به‌دلیل ساختار انعطاف‌پذیر خود، قابلیت توسعه در بسترهای سبک را داراست (ماشین و مارکز، ۲۰۲۴).

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که اغلب این مطالعات یا بر فناوری‌های خاص متمرکز بوده‌اند یا به ارائه چارچوب‌های مفهومی و نظری پرداخته‌اند. در بسیاری از آنها، سطح تحلیل از نوع مفهومی یا شاخه صنعت بوده و کاربرد سیاستی- ملی که مورد تأکید این پژوهش است، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین اولویت‌گذاری انواع حوزه‌های توسعه فناوری سلول خورشیدی، تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است.

1. Giannouli
2. Giannouli
3. Machín & Márquez
4. Thin-Film

فناوری‌های سلول خورشیدی و اولویت‌گذاری ملی

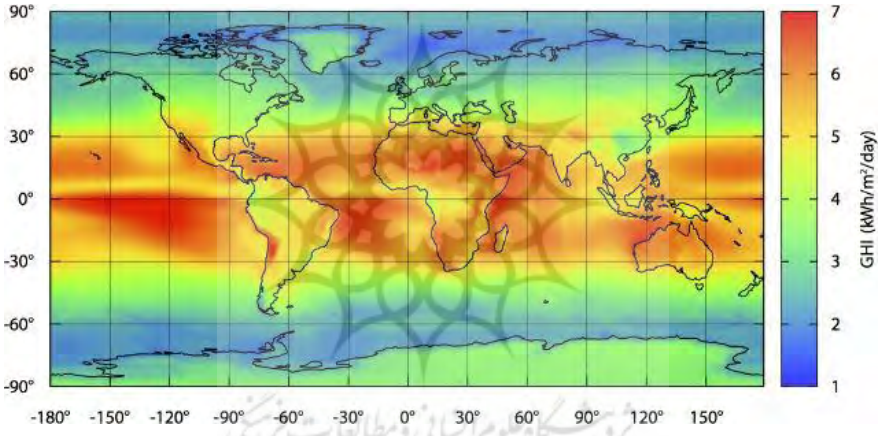
چهار فناوری مورداشاره، نمایانگر طیف کاملی از مسیرهای تحقیق و توسعه در فتوولتائیک هستند و بسته به سیاست صنعتی و ظرفیت ملی، می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های اولویت‌دار یا مکمل برای توسعه آینده انرژی خورشیدی در نظر گرفته شوند. در کشورهای مختلف، یکی از چهار حوزه فناوری سلول خورشیدی به‌عنوان اولویت ملی توسعه فناوری انتخاب شده‌اند. برای نمونه فناوری سلول خورشیدی پروسکایتی در حال حاضر به‌طور رسمی در برنامه‌های سیاستی و صنعتی کشورهای پیشرفته قرار گرفته است. در ژاپن، بر اساس برنامه راهبردی هفتم انرژی[1]، دولت این کشور هدف‌گذاری کرده است که تا سال ۲۰۴۰، ظرفیت نصب‌شده سلول‌های پروسکایتی را به ۲۰ گیگاوات برساند. این هدف در قالب توسعه ماژول‌های رول‌تورول قابل‌نصب بر دیوار و سقف ساختمان‌ها و با پشتیبانی وزارت اقتصاد، تجارت و صنعت[2] و سازمان توسعه انرژی ندو[3] دنبال می‌شود. بودجه تخصیص‌یافته برای این فناوری در ژاپن حدود ۱.۵ میلیارد دلار اعلام شده است که نشان‌دهنده تمرکز راهبردی کشور بر این حوزه است (ندو، ۲۰۲۳ و پی‌وی مگزین، ۲۰۲۴). در ایالات متحده، وزارت انرژی آمریکا[4] و آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر، بر پروژه‌های مرتبط با سلول‌های پروسکایتی به صورت قابل‌توجهی سرمایه‌گذاری کرده‌اند. این سرمایه‌گذاری‌ها از طریق برنامه‌هایی مانند سان شات[5] یا برنامه‌های رقابتی دانشگاهی، حمایت از توسعه مواد پایدار، افزایش بازده و ارتقاء قابلیت تولید صنعتی، این فناوری را هدف قرار داده‌اند (گزارش‌های آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر و وزارت انرژی آمریکا، ۲۰۲۳). در اروپا، به‌ویژه آلمان، شرکت‌هایی مانند آکسفورد فُتوولتائیک[6] با پشتیبانی دولت آلمان، در حال توسعهٔ سلول‌های پروسکایتی– سیلیکونی تاندِم هستند. این شرکت در سال‌های اخیر خطوط تولید نیمه‌صنعتی خود را راه‌اندازی کرده و به مرحله تجاری‌سازی

1. 7th Strategic Energy Plan
2. METI
3. NEDO
4. DOE
5. SunShot
6. Oxford Photovoltaics (PV)

نزدیک شده است (اطلاعیه رسمی آکسفورد فُتوولتائیک، ۲۰۲۳). در کنار پروسکایتی، فناوری سی‌آی‌جی‌اس نیز در کشورهای صنعتی نظیر چین و ژاپن جایگاه ویژه‌ای در صنعت و سیاست‌گذاری فناوری دارد. چین، به‌عنوان بزرگ‌ترین بازیگر صنعت فتوولتائیک در جهان، در توسعه صنعتی و تجاری فناوری سی‌آی‌جی‌اس سرمایه‌گذاری کرده و چندین خط تولید فعال دارد (گزارش سالانه آژانس بین‌المللی انرژی برنامه سامانه‌های برق فتوولتائیک (خورشیدی)[1]، ۲۰۲۲). در ژاپن از طریق همکاری با نهادهایی مانند آژانس بین‌المللی انرژی، برنامه سامانه‌های برق فتوولتائیک، پروژه‌های توسعه‌ای با تمرکز بر بهبود بازده، بازیافت و پایداری سی‌آی‌جی‌اس انجام شده است. در مقابل، فناوری‌های سیلیکونی و سلول‌های رنگ‌حساس با وجود اهمیت پژوهشی، از نظر سیاست‌گذاری توسعه‌ای در جایگاه‌های متفاوتی قرار دارند. فناوری سیلیکونی گرچه همچنان پُرکاربردترین فناوری خورشیدی جهان است، فقط کشورهایی مانند چین، آلمان و دانمارک که در زنجیره تأمین جهانی سیلیکون سهم دارند، آن را به‌عنوان فناوری پایه نگه‌داشته‌اند (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۳ و گزارش فراون‌هوفر مؤسسه سیستم‌های انرژی خورشیدی[2]). از سوی دیگر، فناوری سلول‌های حساس به رنگ به دلیل کارایی پایین‌تر و محدود بودن کاربرد آن به فضاهای داخلی و نور کم، هنوز در مرحله تحقیقاتی باقی مانده و در هیچ‌کدام از برنامه‌های سیاستی کشورها به‌عنوان فناوری اولویت‌دار معرفی نشده است (آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر، ۲۰۲۲؛ الزویر ساینس دایرکت[3] - سلول خورشیدی حساس‌شده به رنگ ترندز[4]). ایران در سال‌های اخیر، با چالشی جدی در حوزه انرژی مواجه شده است. برای نمونه در حوزه تأمین برق موردنیاز کشور، ناترازی برق در تابستان ۱۴۰۳، به حدود ۱۹.۷۰۰ مگاوات رسیده (ایرنا، ناترازی برق، ۱۴۰۳) و پیش‌بینی می‌شود که این ناترازی در سال ۱۴۰۴ به ۲۴،۰۰۰ مگاوات افزایش یابد (ایرنا، پیش‌بینی ناترازی برق، ۱۴۰۳) همچنین، آمار ارائه‌شده در پایان تابستان ۱۴۰۳ نشان از

1. IEA (International Energy Agency) PVPS (Photovoltaic Power Systems Programme) Annual
2. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE)
3. Elsevier ScienceDirect
4.DSSC: Dye-Sensitized Solar Cell

این دارد که کشور روزانه ۲۶۰ میلیون متر مکعب ناترازی گاز داشته است (ایرنا، کمبود گاز، ۱۴۰۳). این ناترازی‌ها، اهمیت توسعه و بهره‌گیری از منابع انرژی را در کشور دوچندان کرده است. با توجه به میزان تابش آفتاب در کشور می‌توان گفت که ایران نیز ظرفیت بالایی برای بهره‌بردن از فناوری سلول‌های خورشیدی برای تولید انرژی دارد؛ چرا که به‌طور میانگین در کل سال حدود ۳۰۰۰ ساعت بر خاک ایران آفتاب می‌تابد؛ یعنی بیش از ۸ ساعت در روز که این عدد برای برخی از استان‌ها به حدود ۹ ساعت در روز نیز می‌رسد (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۲). نگاهی به میزان دریافت تابش خورشید در نقاط مختلف جهان نیز نشان می‌دهد که ایران از این نظر در بالاترین رده‌ها نسبت به سایر کشورهای جهان قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱. نقشه جهانی تابش افقی جهانی متوسط (GHI) (کیلووات‌ساعت بر مترمربع در روز) (اسمِتس[1] و همکاران، ۲۰۱۴)

در سطوح سیاستگذاری در ایران، تنها در موارد معدود به سلول خورشیدی به‌عنوان یک فناوری برجسته اشاره شده، اما حوزه‌های اولویت‌دار آن برای توسعه فناوری، مورد بررسی و شناسایی قرار نگرفته است. برای نمونه، برنامه هفتم توسعه، به‌طور خاص، بر افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر ازجمله خورشیدی در سبد تولید برق تأکید دارد. همچنین برنامه ملی توسعه سامانه‌ها و زنجیره

1. Smets

تولید برق خورشیدی به هیچ یک از انواع فناوری‌های نوظهور سلول خورشیدی اشاره‌ای نکرده است. همان‌طور که در پیشینه پژوهش نشان داده می‌شود؛ با توجه به اینکه پژوهش کنونی مفهوم اولویت‌گذاری را در حوزه سلول خورشیدی به‌کار برده است، بررسی منابع موجود نشان می‌دهد هرچند پژوهش‌هایی به بررسی مفهوم اولویت‌گذاری پرداخته‌اند، ولی حوزه کاربرد آن، سلول خورشیدی نبوده است، از طرف دیگر پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه سلول خورشیدی نیز از ابعاد دیگر این حوزه را کنکاش کرده و به تعیین اولویت‌های توسعه این فناوری نپرداخته‌اند. این خلأ سیاستگذاری و پژوهشی، ضرورت انجام مطالعه‌ای را نشان می‌دهد که بتواند حوزه‌های اولویت توسعه سلول‌های خورشیدی را با تکیه بر شواهد علمی و با توجه به توانمندی و نیازمندی‌های کشور روشن سازد.

اولویت‌گذاری ملی توسعه فناوری

اولویت‌گذاری توسعه فناوری به فرایند نظام‌مند شناسایی، ارزیابی و رتبه‌بندی فناوری‌ها بر اساس شاخص‌های مشخص و در راستای اهداف راهبردی یک کشور یا سازمان اشاره دارد (سازمان همکاری و توسعه اقتصادی[1]، ۲۰۱۱). این فرایند نقش مهمی در تخصیص بهینه منابع تحقیق و توسعه و تمرکز سیاست‌های نوآوری بر فناوری‌های کلیدی ایفا می‌کند (لاوریج[2]، ۲۰۰۹). از منظر سیاست‌گذاری، اولویت‌گذاری فناوری، ابزاری برای جهت‌دهی به سیاست‌های صنعتی، توسعه زیرساخت‌های فناوری و برنامه‌ریزی تحقیقاتی در سطوح ملی و بخشی است (پورتر[3] و همکاران، ۱۹۹۱). شاخص‌های اولویت‌گذاری می‌توانند شامل نیاز بازار، قابلیت‌های فناورانه موجود، تأثیر اقتصادی، زمان رسیدن به بازار یا مزیت رقابتی بالقوه باشند (پاپر[4] و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین، هم‌راستایی فناوری با ظرفیت‌های داخلی کشور، یکی از محورهای کلیدی تحلیل در کشورهایی با محدودیت منابع به‌شُمار می‌رود.

1. OECD: The Organization for Economic Cooperation and Development
2. Loveridge
3. Porter
4. Popper

روش‌شناسی پژوهش

چارچوب این پژوهش برمبنای یک فرایند ترکیبی و مرحله‌مند طراحی شده است. در مرحله اول، از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساخت‌یافته با خبرگان و بر اساس ماتریس توانمندی- نیازمندی، اولویت‌های توسعه فناوری سلول خورشیدی در کشور شناسایی شدند. ماتریس نیازمندی– توانمندی، یکی از ابزارهای شناخته‌شده در تحلیل اولویت‌های فناورانه است که به شناسایی فناوری‌هایی کمک می‌کند که از یک‌سو با نیازهای راهبردی کشور هم‌راستایی دارند و از سوی دیگر، قابلیت‌های اجرایی و علمی لازم برای توسعه آنها در داخل وجود دارد (پاپر و همکاران، ۲۰۰۷). در این ماتریس، هر فناوری بر اساس دو محور ارزیابی می‌شود: «میزان نیازمندی» (تبیین‌شده از طریق اسناد سیاستی، تحلیل بازار یا اهمیت راهبردی) و «سطح توانمندی» (بر پایه زیرساخت فنی، منابع انسانی و ظرفیت بومی‌سازی) (کینان[1] و همکاران، ۲۰۱۳) این ابزار، امکان مقایسه نسبی فناوری‌ها را فراهم می‌کند و با قرارگیری آنها در یکی از چهار ناحیه ماتریس (بالا– بالا، بالا– پایین، پایین– بالا و پایین– پایین)، تصمیم‌گیری برای تمرکز منابع یا کنارگذاری برخی فناوری‌ها تسهیل می‌شود (کاگنین[2] و همکاران، ۲۰۱۲). فناوری‌هایی که در ناحیه نیازمندی بالا و توانمندی متوسط یا بالا قرار دارند، معمولاً به‌عنوان اولویت‌های راهبردی شناخته می‌شوند. این رویکرد به‌ویژه در کشورهایی با منابع محدود، کاربرد بالایی دارد. در این مرحله، فناوری‌ها بر اساس دو شاخص کلیدی تحلیل شدند: ۱. نیازمندی که نمایانگر میزان اهمیت و ضرورت توسعه آن فناوری برای کشور است (مطابق با اسناد سیاستی و روند جهانی) و ۲. توانمندی که بیانگر زیرساخت فنی، نیروی انسانی و قابلیت بومی‌سازی فناوری است. فناوری‌هایی که در ناحیه «نیازمندی بالا– توانمندی متوسط یا بالا» قرار داشتند، به‌عنوان فناوری‌های اولویت‌دار معرفی می‌شوند. شاخص‌های کیفی مرتبط به شرح زیر است:

1. Keenan
2. Cagnin

۱- بُعد توانمندی توسعه فناوری

بررسی این بُعد بر اساس قابلیت‌های موجود در کشور برای توسعه درون‌زای فناوری و امکان‌پذیری تولید در مقیاس صنعتی انجام شده است:

۱-۱. توان فنی و زیرساختی

- وجود متخصصان و نیروی انسانی دانشی در حوزه فناوری موردنظر
- در دسترس بودن مواد اولیه و پیش‌نیاز تولید سلول
- امکان تأمین تجهیزات فناورانه موردنیاز در مقیاس آزمایشگاهی

۱-۲. ظرفیت توسعه صنعتی

- امکان توسعه تجهیزات موردنیاز تولید در مقیاس نیمه‌صنعتی و صنعتی
- قابلیت افزایش مقیاس تولید پس از مرحله توسعه آزمایشگاهی

۱-۳. امکان‌پذیری اقتصادی

- توجیه اقتصادی تولید در مقیاس کوچک و نیمه‌صنعتی
- عدم نیاز به سرمایه‌گذاری سنگین اولیه برای ورود به مرحله تولید نیمه‌صنعتی

۱-۴. قابلیت تجاری‌سازی

- ظرفیت ورود به بازار داخلی در میان‌مدت برای حل بخشی از مشکل ناترازی انرژی

۲- بُعد نیازمندی فناوری برای کشور

در این بخش، بررسی با توجه به شاخص‌های کیفی زیر انجام شده است.

۲-۱. سازگاری اقلیمی

- توانایی عملکرد مطلوب در شرایط دمایی بالا (تحمل گرمای شدید در مناطق مختلف کشور)

۲-۲. عملکرد فنی

- بازدهی انرژی در سطح قابل‌رقابت با فناوری‌های رایج (حداقل معادل بازدهی سلول‌های سیلیکونی متداول)

۲-۳. تطابق سیستمی

- سازگاری با سیستم‌های فعلی برق خورشیدی کشور (نیاز حداقلی به تغییر زیرساخت‌های موجود برای جایگزینی یا افزودن این فناوری)

جامعه آماری مرحله دوم را ۲۷ نفر از پژوهشگران و فناوران حوزه سلول خورشیدی (به شرح جدول زیر) تشکیل داده که مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته انجام شد. مصاحبه‌شوندگان شامل موارد زیر هستند:

جدول ۱۱. مشخصات مصاحبه‌شوندگان

ردیف	وابستگی سازمانی	حوزه	حوزه تخصصی مرتبط	مدت مصاحبه (ساعت)
۱	دانشگاه یزد	هیئت علمی دانشکده فیزیک	سلول خورشیدی نسل جدید: حساس شده به رنگ، نقاط کوانتومی و پروسکایت	۱
۲	دانشگاه صنعتی شریف	هیئت علمی دانشکده فیزیک	سلول خورشیدی لایه نازک: سی‌آی‌جی‌اس، سلول خورشیدی نسل جدید: حساس‌شده به رنگ و پروسکایت	۸
۳	شرکت کیمیاسولار اسپادانا	مدیرعامل	سلول خورشیدی نسل جدید: پروسکایت	۶
۴	دانشگاه تورورگاتا- ایتالیا	هیئت علمی دانشکده مهندسی الکترونیک	سلول خورشیدی نسل جدید: پروسکایت	۴
۵	دانشگاه تهران	هیئت علمی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر	الکترونیک چاپی، سلول خورشیدی سیلیکونی، سلول خورشیدی نسل جدید: پروسکایتی	۳
۶	دانشگاه صنعتی شریف	پژوهشگر سلول خورشیدی و فناوری لیزر	سلول خورشیدی لایه نازک: سی‌آی‌جی‌اس	۴
۷	پژوهشگاه نیرو	پژوهشگر گروه پژوهشی مواد	سلول خورشیدی نسل جدید:	۲

ردیف	وابستگی سازمانی	حوزه	حوزه تخصصی مرتبط	مدت مصاحبه (ساعت)
		غیرفلزی	حساس به رنگ، پروسکایت، سلول خورشیدی لایه نازک: سی‌آی‌جی‌اس	
۸	پژوهشگاه نیرو	هیئت علمی گروه پژوهشی مواد غیرفلزی	سلول خورشیدی لایه نازک	۲
۹	دانشگاه صنعتی شریف	هیئت علمی پژوهشکده جامع علوم و فناوری‌های همگرا	سلول خورشیدی نسل جدید، الکترونیک چاپی	۳
۱۰	دانشگاه تربیت مدرس	هیئت علمی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر	سلول خورشیدی نسل جدید: پروسکایت	۲
۱۱	دانشگاه تربیت مدرس	هیئت علمی دانشکده مهندسی شیمی	سلول خورشیدی نسل جدید: پلیمری، پروسکایت	۵
۱۲	دانشگاه تهران	هیئت علمی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر	سلول خورشیدی سیلیکونی	۲
۱۳	دانشگاه صنعتی مالک اشتر	هیئت علمی مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک	سلول خورشیدی لایه نازک	۴
۱۴	پژوهشگاه دانش‌های بنیادین	پسادکتری پژوهشگاه فیزیک	سلول خورشیدی سیلیکونی	۴
۱۵	دانشگاه علم و صنعت	هیئت علمی مهندسی مواد و متالورژی	سلول خورشیدی نسل جدید: حساس به رنگ، پروسکایت	۴
۱۶	پژوهشگاه رنگ	هیئت علمی پژوهشکده فیزیک رنگ	الکترونیک چاپی	۴
۱۷	پژوهشگاه مواد و انرژی	هیئت علمی پژوهشکده نانو	سلول خورشیدی نسل جدید: حساس به رنگ، پروسکایت، تندم سیلیکون- پروسکایت	۴
۱۸	دانشگاه تربیت مدرس	هیئت علمی دانشکده علوم پایه	سلول خورشیدی نسل جدید: پروسکایت	۲
۱۹	دانشگاه تهران	هیئت علمی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر	میکرو الکترونیک، نانو الکترونیک	۲
۲۰	دانشگاه شهید بهشتی	معاون برنامه ملی میکروالکترونیک	الکترونیک چاپی	۶
۲۱	شرکت صنایع الکترونیک‌سازان سمنان	مدیرعامل	ساخت صنعتی سلول خورشیدی سیلیکونی	۴

ردیف	وابستگی سازمانی	حوزه	حوزه تخصصی مرتبط	مدت مصاحبه (ساعت)
۲۲	شرکت فناپ	معاون نوآوری	آینده‌پژوهی فناوری	۶
۲۳	کالج دانشگاهی لندن	هیئت علمی	سلول خورشیدی نسل جدید: پروسکایت	۲
۲۴	دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی	هیئت علمی دانشکده فیزیک	سلول خورشیدی نسل جدید: پروسکایت	۲
۲۵	پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی	هیئت علمی	سلول خورشیدی نسل جدید: پروسکایت ارگانیک	۲
۲۶	دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی	هیئت علمی دانشکده مهندسی برق	میکرو الکترونیک، نانو الکترونیک	۲
۲۷	دانشگاه شهید بهشتی	پژوهشکده لیزر و پلاسما	سلول خورشیدی لایه نازک: سی‌آی‌جی‌اس	۳

برای تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از مصاحبه‌ها، از روش تحلیل محتوای کیفی استفاده شد. در این روش، پاسخ‌های مشارکت‌کنندگان به صورت نظام‌مند مرور شد و جملات کلیدی مرتبط با موضوع تحقیق بر پایه «نیاز کشور به فناوری» و «توانمندی داخلی» استخراج شدند. سپس با بررسی تکرار، تأکید و توافق نسبی پاسخ‌دهندگان در هر محور، جمع‌بندی شد. در مرحله دوم به‌منظور درک مسیر توسعه واقعی و گلوگاه‌ها و پویایی فنی در روندهای جهانی، دو فناوری اولویت‌دار شناسایی شده و بر اساس توصیه‌های مصاحبه‌شوندگان، تحلیل پتنت‌های این دو فناوری انجام شد. بررسی داده‌های پتنت به‌عنوان شاخصی معتبر و کمی از سرمایه‌گذاری آر.اند.دی[1]، بلوغ فناوری و فعالیت‌های رقابتی در سطح جهانی شناخته می‌شود. این نوع تحلیل به‌ویژه زمانی اهمیت می‌یابد (گریلیشز[2]، ۱۹۹۰؛ آرشیابوگی و پیانتا[3]، ۱۹۹۶ و سازمان همکاری و توسعه اقتصادی[4]، ۲۰۱۱) که یک کشور مانند ایران در مرحله تصمیم‌گیری برای ورود به توسعه بومی یک فناوری نوظهور قرار دارد و نیاز به

1. R&D
2. Griliches
3. Archibugi & Pianta
4. OECD

نشریه علمی مدیریت نوآوری
سال ۱۴/ شماره ۲ (۵۲) / تابستان ۱۴۰۴

درک دقیق از فضای رقابتی، سرعت تحول فناوری و قابلیت‌های تجاری‌سازی وجود دارد (پاپر و همکاران، ۲۰۰۷ و کینان و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین تحلیل پروژه‌های فناورانه در اتحادیه اروپا به‌عنوان یکی از پیشروترین نهادهای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر به‌منظور آگاهی از گلوگاه‌های فنی و نیازهای زیرساختی «توسعه این فناوری در عمل که با اجرای پروژه‌های هدفمند تحقیق و توسعه همراه بوده» انجام شد.

یافته‌های پژوهش

اولویت‌های توسعه فناوری‌های سلول خورشیدی در ایران

یافته‌های حاصل از مصاحبه‌ها مبتنی‌بر ماتریس توانمندی- نیازمندی

فناوری نسل اول سیلیکونی سلول خورشیدی

در کوتاه و میان‌مدت برای مرحله توسعه بازار و توسعه کاربرد در حوزه سلول خورشیدی، فناوری نسل اول سیلیکونی باید مورد توجه قرار گیرد. با واردات سلول خورشیدی به‌ویژه از کشور چین به‌عنوان بزرگ‌ترین تأمین‌کننده سلول خورشیدی و تبدیل آن به پنل خورشیدی با کاربردهای متنوع در کشور می‌توان ارزش افزوده خوبی کسب کرد. همان‌طور که هم‌اکنون چند شرکت بزرگ ساخت پنل خورشیدی در کشور فعال هستند. اما این نسل از سلول‌ها برای توسعه فناوری درونزا در کشور مناسب نیستند. دلایل این امر را می‌توان به صورت زیر برشمرد: ۱- بیش از ۷۰ سال از تجاری‌سازی نسل اول سلول خورشیدی سیلیکونی می‌گذرد و برای یک فناوری با این سطح از بلوغ، انتقال فناوری گزینه‌ای مناسب‌تر از توسعه درون‌زای آن است. ۲- یارانه دولتی و سرمایه‌گذاری زیرساختی حجیم در زنجیره سیلیکون و سلول خورشیدی در کشور چین باعث شده قیمت سلول خورشیدی چینی بسیار رقابتی و پایین باشد. این امر باعث شده که بیشتر تولیدکنندگان سلول خورشیدی در سایر کشورها که بعضاً سابقه چند دهه ساخت سلول خورشیدی را داشته‌اند، نیز توان رقابت با چین از نظر قیمتی نداشته باشند. این مسئله برای کشور ما که هنوز در ابتدای راه تجاری‌سازی این فناوری است، بسیار شدیدتر است. ۳-

سلول خورشیدی سیلیکونی جدای از زنجیره ارزش سیلیکونی نیست. بنابراین تا زمانی که سرمایه‌گذاری روی زنجیره سیلیکون به‌عنوان یک برنامه ملی صورت نپذیرد، امکان تولید رقابتی سلول سیلکونی به‌عنوان یک محصول از این زنجیره نیست. برای نمونه یکی از مصاحبه‌شوندگان می‌گوید: «انتخاب بخشی از زنجیره ارزش پنل خورشیدی که برای کشور مناسب باشد، یک انتخاب مهم و راهبردی است. در این بین آن بخش از زنجیره که تبدیل سلول به پنل است، دارای بیشترین ارزش افزوده برای کشور است. چرا که حمل‌ونقل پنل‌های خورشیدی از چین به داخل کشور با توجه به ابعاد و شکنندگی و حساسیت بالای پنل دارای ملاحظات بسیار است، اما تولید پنل از سلول در کشور امکان‌پذیر و دارای ارزش افزوده صددرصدی است». مصاحبه‌شونده دیگر در این زمینه اعتقاد دارد: «سلول خورشیدی سیلیکونی به افول خود از نظر چرخه فناوری نزدیک می‌شود. یکی از مهم‌ترین گزینه‌ها برای ادامه حیات این سلول‌ها، تلفیق یا تاندم سیلیکون و پروسکایت[1] است که بازده این سلول‌ها از نظر تئوری تا ۴۳ درصد پیش‌بینی شده است». با توجه به مطالب مطرح‌شده جایگاه سلول خورشیدی سیلیکونی به صورت زیر است: دارای نیازمندی- عدم توانمندی.

فناوری پروسکایت سلول خورشیدی

با توجه به سرعت رو به رشد افزایش بازده سلول‌های خورشیدی پروسکایتی و ارزان قیمت بودن آن که پیشتر به آن اشاره شد، مصاحبه‌شوندگان اعتقاد داشتند که فناوری پروسکایت، تنها فناوری است که سهم بزرگی از سبد سلول خورشیدی سیلیکونی را در آینده دربرمی‌گیرد. مهم‌ترین مسئله از نظر مصاحبه‌شوندگان درباره فناوری پروسکایت، پایداری این سلول‌هاست. درواقع مسئله مهم این بود که آیا در سال‌های آینده، مسئله پایداری حل خواهد شد یا خیر. به بیان دیگر آیا مشکل پایداری پروسکایت، یک مشکل ذاتی و ساختاری در این فناوری است و درنتیجه حل‌نشدنی است یا یک مشکل تکنیکی که در آینده قابل‌حل خواهد بود؟ در این بین، دو دیدگاه

1. Perovskite/Silicon Tandem

وجـود داشـت: تعـداد محـدودی اعتقـاد داشـتند کـه پروسـکایت قطعـاً بـه پایـداری خواهـد رسـید و بـه‌طـور کامـل امکـان جـایگزینی بـا سـیلیکون را دارد. ولـی اکثریـت معتقد بودند کـه پروسـکایت، حتـی در صـورت عـدم حـل مشـکل پایـداری، سـهمی از سـبد سـیلیکون را در آینـده خواهـد گرفـت. بـه‌ویـژه در کاربردهـایی نظیـر سـلول خورشیدی منعطف و بـه‌کـارگیری در دیـوایس‌هـای مبتنـی‌بـر اینترنـت اشـیا و برخـی کاربردهـای فضـایی. ضـمن اینکـه بیشـتر مصـاحبه‌شـوندگان، سـاخت سـلول پروسکایتی در کشـور را بـه دلیـل آسـان و ارزان‌تـر بـودن مـواد و تجهیـزات موردنیـاز آن، امکان‌پـذیرتر از سـیلیکونی مـی‌دانسـتند. بـه‌عـلاوه بـه دلیـل نزدیـک بـودن بـازده پروسـکایت بـه بـازده سـلول خورشـیدی سـیلیکونی، نیـاز بـه تغییـر در سیسـتم‌هـای فعلی خورشـیدی بـه حـداقل خواهـد رسـید. بـرای نمونـه یکـی از مصـاحبه‌شـوندگان مـی‌گویـد: «آنچـه در مـورد اینـده فنـاوری سـلول خورشـیدی مسـلم اسـت فناوری‌هـای مبتنـی‌بـر سـاخت بـه روش چـاپ (الکترونیـک چـاپی) اسـت. حتـی اگـر پروسـکایت نیـز از نظـر پایـداری بـه نتیجـه نرسـد و نتوانـد بـه‌عنـوان جـایگزین سیلیکون مطرح شود، سلول‌هـای خورشـیدی قابـل‌چـاپ آینـده ایـن فنـاوری هسـتند و فنـاوری دیگـری مبتنـی‌بـر فراینـد سـاخت چـاپی توسـعه پیـدا خواهـد کـرد. ایـن درحالی است کـه دوران فنـاوری‌هـای گـران‌قیمـت بـا فراینـدهای سـاخت الکترونیـک سـنتی بـه پایـان خـود نزدیـک مـی‌شـود. درنتیجـه جایگـاه سـلول خورشـیدی پروسکایتی به صورت «دارای نیازمندی- دارای توانمندی» است.

فناوری رنگدانه‌ای

ازآنجاکـه فنـاوری سـلول خورشـیدی پروسـکایتی از مسـیر توسـعه سـلول خورشـیدی رنگدانـه‌ای ظـاهر شـد و مسـیری پُرشـتاب‌تـر را طـی کـرد، مصـاحبه‌شـوندگان اعتقـاد داشـتند کـه نـوع سـلول‌هـای رنگدانـه‌ای یـا بـه‌طـور کلـی کنـار گذاشـته خواهنـد شـد و بـا پروسـکایت جـایگزین خواهـد شـد یـا کاربردهـای محدودی خواهند داشـت. اسـتفاده از ایـن سـلول‌هـا در شیشـه‌هـای رنگـی (بـا توجـه به امکـان سـاخت ایـن سـلول‌هـا در رنـگ‌هـای مختلـف)، یکـی از ایـن کاربردهاسـت. درمجمـوع، جایگـاه سـلول خورشـیدی رنگدانـه‌ای بـه صـورت عـدم نیازمنـدی- دارای توانمندی است.

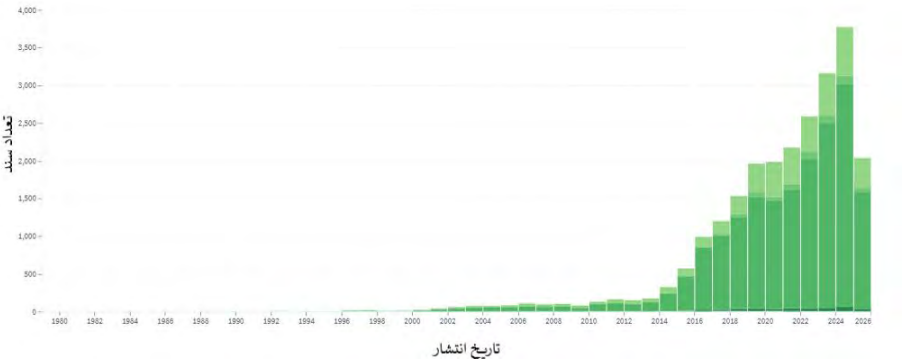
فناوری سی‌آی‌جی‌اس

مصاحبه‌شوندگان در زمینه اولویت توسعه فناوری سی‌آی‌جی‌اس بیان کردند که این سلول‌ها می‌توانند گزینه خوبی برای توسعه فناوری درونزا و بومی در کشور باشند. دلایل این فناورها برای انتخاب یادشده عبارت‌اند از: ۱- کم‌هزینه‌تر و دردسترس‌تر بودن ساخت این سلول‌ها در کشور نسبت به سلول‌های سیلیکونی، ۲- بازده مناسب و تحمل دمایی بالاتر در قیاس با سایر فناوری‌ها که آن را برای اقلیم ایران مناسب‌تر می‌کند و ۳- نداشتن مشکل پایداری در قیاس با سلول پروسکایتی. البته از نظر آنها برای ساخت سلول خورشیدی سی‌آی‌جی‌اس، نیاز به فناوری لایه نشانی در خلأ بالا وجود دارد. فناوری لایه نشانی در خلأ در کشور بومی شده و امکان آن وجود داشت، اما برای لایه نشانی در خلأ بالا با مشکلات فناورانه در کشور مواجه بودیم که امکان توسعه درون‌زای این سلول‌ها در داخل کشور را مشکل می‌کند. معدود بودن فناوران مسلط به سی‌آی‌جی‌اس در قیاس با سایر فناوری‌ها (سیلیکونی و پروسکایتی) از دیگر مشکلات این حوزه بود. درمجموع جایگاه سلول خورشیدی سی‌آی‌جی‌اس به صورت «نیازمندی- عدم توانمندی» است.

نتایج حاصل از تحلیل پتنت‌های فناوری[1]

از میان انواع مختلف فناوری‌های سلول‌های خورشیدی، تحلیل پتنت با استفاده از ابزار لنز[2] استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، نخستین اختراع به‌ثبت‌رسیده در حوزه سلول‌های خورشیدی پروسکایت در سال ۱۹۹۹ بوده و از سال ۲۰۱۴ روند روبه‌رشد آن آغاز شده و تاکنون ادامه داشته است.

۱. نویسندگان سپاسگذاری خود را از همکاری دکتر حسن علم‌خواه عضو هیئت علمی دانشگاه بوعلی سینا در تدوین این بخش اعلام می‌دارند.
2. Lens

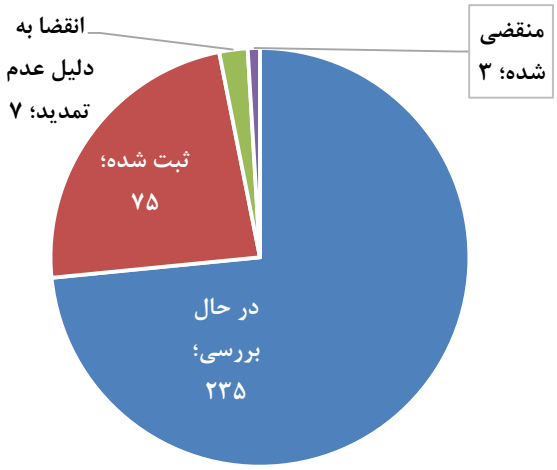


شکل ۲. تعداد پتنت‌های ثبت‌شده در حوزه سلول‌های خورشیدی نانوساختار بر پایه پروسکایت تا سال ۲۰۲۶

این در حالی است که نخستین فعالیت فناوری در حوزه سلول‌های خورشیدی بر پایه سی‌آی‌جی‌اس به سال ۱۹۹۲ بازمی‌گردد و روند رشد شتابان این فناوری از سال ۲۰۱۴ (همزمان با رشد پتنت‌های پروسکایت) متوقف شده و روند کاهشی به خود گرفته است (شکل ۳).

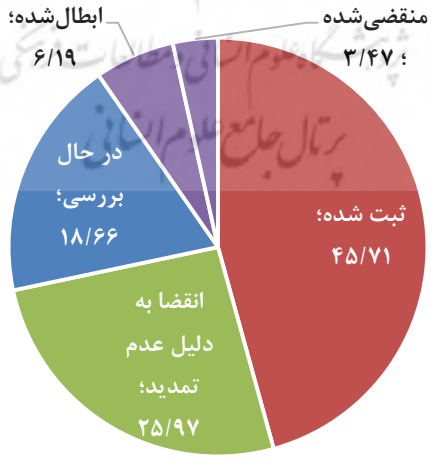
شکل ۳. تعداد پتنت‌های ثبت‌شده در حوزه سلول‌های خورشیدی بر پایه سی‌آی‌جی‌اس تا سال ۲۰۲۶

همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، تعداد پتنت‌های گرنت‌شده، کمتر از پرونده‌هایی است که در فرایند ثبت قانونی قرار داشته‌اند که این نشان‌دهنده نوظهور بودن این فناوری است.



شکل ۴. وضعیت حقوقی اسناد پتنت در حوزه سلول‌های خورشیدی نوظهور

نکته دیگر این است که حدود ۵۰ درصد پتنت‌های گرنت‌شده، مربوط به سال ۲۰۱۶ هستند. همچنین، همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، هرچند تعداد پتنت‌های گرنت‌شده در حوزه سلول‌های خورشیدی سی‌آی‌جی‌اس، کمتر از پرونده‌هایی است که در فرایند ثبت قانونی قرار داشته‌اند، اما حدود یک چهارم پتنت‌های حوزه سی‌آی‌جی‌اس، به دلیل عدم پرداخت حق شارژ باطل شده‌اند.



شکل ۵. وضعیت حقوقی اسناد پتنت در حوزه سلول‌های خورشیدی نانوساختار بر پایه سی‌آی‌جی‌اس

تحلیل پتنت‌ها در حوزه فناوری‌های نوین خورشیدی، به‌ویژه فناوری پروسکایتی، به‌عنوان یکی از ابزارهای اصلی ارزیابی روند نوآوری و بلوغ فناورانه در سطح جهانی شناخته می‌شود. ثبت اختراعات، برخلاف مقالات علمی که بازتاب‌دهنده فعالیت‌های نظری و آزمایشگاهی‌اند، به‌طور مستقیم به تلاش‌های سازمان‌ها و بنگاه‌های صنعتی در راستای توسعه کاربردی، ثبت بازار، حفاظت مالکیت فکری و تجاری‌سازی فناوری مربوط می‌شود (سازمان همکاری و توسعه اقتصادی، ۲۰۱۱ و سازمان جهانی مالکیت معنوی[1]، ۲۰۲۳). بنابراین، تحلیل نظام‌مند پتنت‌ها به سیاستگذاران فناوری در کشورهایی مانند ایران، این امکان را می‌دهد تا میزان بلوغ فناوری را بر اساس حجم، نوع و نرخ رشد پتنت‌های ثبت‌شده ارزیابی کرده و موقعیت رقابتی بازیگران پیشرو را در زنجیره مالکیت فکری شناسایی کنند. بر اساس داده‌های این پژوهش، روند ثبت پتنت در حوزه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، اگرچه هنوز از نظر تعداد کل پتنت‌ها نسبت به فناوری‌های بالغ‌تری مانند سی‌آی‌جی‌اس یا سیلیکونی کمتر است، اما ویژگی‌های منحصربه‌فردی دارد که نشان‌دهنده فرصت برای ورود راهبردی است. ازجمله اینکه بخش قابل‌توجهی از پتنت‌های این حوزه هنوز در فرایند ثبت قرار دارند که به‌معنای نوظهور بودن و پویایی بالای این فناوری است. توزیع زمانی پتنت‌ها نشان می‌دهد تمرکز اصلی نوآوری در سال‌های اخیر (به‌ویژه از ۲۰۱۶ به بعد) شکل گرفته و هنوز به نقطه اشباع نرسیده است. حوزه‌های اصلی نوآوری ثبت‌شده عمدتاً مربوط به پایداری، روش‌های نوین لایه‌نشانی، طراحی‌های چاپ‌پذیر و ترکیب‌های ساختاری دوبُعدی هستند که با نیازها و ظرفیت‌های صنعتی ایران همخوانی دارند. در نقطه مقابل، بررسی پتنت‌های مربوط به فناوری سی‌آی‌جی‌اس نشان می‌دهد که این حوزه با وجود آغاز زودهنگام، از حدود سال ۲۰۱۳ با کاهش رشد مواجه شده است. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که نه‌تنها حجم ثبت اختراعات کاهش یافته، بلکه نسبت بالایی از پتنت‌ها نیز به دلیل عدم تمدید و عدم پرداخت هزینه شارژ، از اعتبار ساقط شده‌اند. این وضعیت اغلب زمانی اتفاق می‌افتد که مالکان پتنت‌ها، افق

1. WIPO: World Intellectual Property Organization

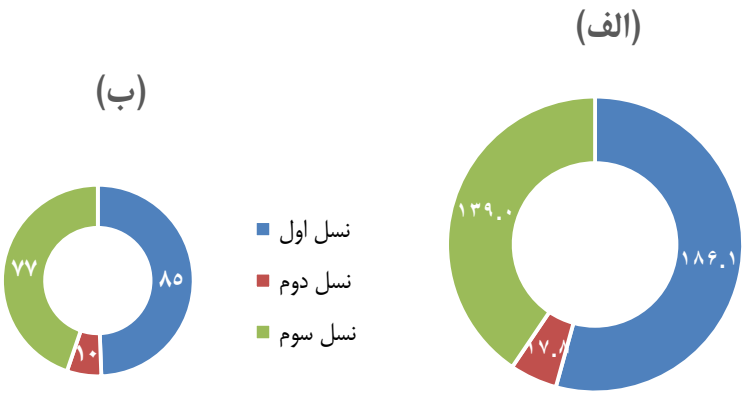
تجاری‌سازی یا سودآوری قابل‌قبولی برای آن فناوری پیش‌بینی نمی‌کنند (گریلیچز[1]، ۱۹۹۰ و هال[2] و همکاران، ۲۰۰۵).

نتایج حاصل از تحلیل پروژه‌های سلول خورشیدی چشم‌انداز ۲۰۲۰ اتحادیه اروپا

اتحادیه اروپا از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ برنامه تحقیقاتی چشم‌انداز ۲۰۲۰ را اجرا کرده که در آن ۱۷۲ پروژه مرتبط با سلول‌های خورشیدی تعریف شده و بودجه‌ای بالغ بر ۳۴۳ میلیون یورو به این بخش اختصاص یافته است. این طرح در حوزه‌های مختلفی مانند توسعه سلول‌های خورشیدی سیلیکونی، پروسکایتی، رنگدانه‌ای، آلی، معدنی، زیستی، نقاط کوانتومی، لایه‌های نازک سی‌آی‌جی‌اس و جی‌ای ای‌اس و همچنین تحقیق روی مواد مرتبط با سلول‌های خورشیدی مانند شیشه‌های هادی، نانوکریستال‌ها و مواد خودتمیزشونده متمرکز بوده است. از مجموع ۸۰ میلیارد یورو بودجه اختصاص‌یافته برای این برنامه تحقیقاتی، ۴۹ درصد به توسعه سلول‌های سیلیکونی، ۴۵ درصد به سلول‌های نسل سوم مانند پروسکایتی و نقاط کوانتومی و تنها ۶ درصد به فناوری‌های لایه نازک اختصاص یافته است (شکل ۶).

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. Griliches
2. Hall



شکل ۶. (الف) تعداد پروژه‌های مورد حمایت و (ب) بودجه اختصاص داده‌شده (بر حسب میلیون یورو) در چشم‌انداز ۲۰۲۰ به تفکیک نسل‌های مختلف سلول خورشیدی

بخش عمده‌ای از تحقیقات بر بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی، افزایش بازدهی، کاهش وزن، پایداری در برابر شرایط محیطی و توسعه کاربردهای صنعتی آنها در بخش‌هایی مانند ساخت‌وساز، خودروسازی، نورپردازی و انرژی گرمایی بوده است. برای نمونه، ۴۴ پروژه با بودجه ۱۰۲ میلیون یورو به توسعه سلول‌های سیلیکونی، ۲۷ پروژه با بودجه ۲۳ میلیون یورو به بهبود سلول‌های پروسکایتی و ۳ پروژه با بودجه ۱۳ میلیون یورو به افزایش بازدهی سلول‌های سی‌آی‌جی‌اس تا ۲۵ درصد اختصاص یافته است. همچنین، ۳۴ پروژه با ۹۱ میلیون یورو به تحقیق در زمینه مواد مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی، ازجمله نانوکریستال‌ها و مواد فوتونیک، اختصاص داشته‌اند. این بررسی نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های فناوری نانو و توسعه سلول‌های خورشیدی لایه نازک، بیشترین سرمایه‌گذاری در حوزه توسعه فناوری سلول خورشیدی در زمینه سلول‌های خورشیدی پروسکایت بوده است. ۲۷ پروژه در اتحادیه اروپا در راستای بهبود سلول‌های پروسکایتی تعریف شده‌اند. پس از بررسی ابعاد فنی این پروژه‌ها (که مستخرج از ۱۳۶۴۳ پروژه افق ۲۰۲۰ بوده‌اند)، آنها دسته‌بندی شده و ملاحظات توسعه فناوری آنها ذیل ۵ موضوع (چالش) اصلی «پایداری

سلول خورشیدی پروسکایتی؛ انتخاب ماده و روش لایه‌نشانی برای لایه انتقال‌دهنده حفره[1] (یکی از ۵ لایه پروسکایت)؛ سلول خورشیدی پروسکایتی منعطف؛ لایه‌نشانی به صورت پرینت؛ سلول خورشیدی پروسکایت دوبُعدی» قرار گرفتند. تحلیل نظام‌مند پروژه‌های اتحادیه اروپا در زمینه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، به‌ویژه استخراج پنج محور کلیدی چالش‌های فناورانه، می‌تواند نقش مهمی در جهت‌دهی سیاست‌های توسعه فناوری ایران ایفا کند. این تحلیل نشان می‌دهد که تمرکز اروپا بر موضوعاتی نظیر پایداری طولانی‌مدت ماژول‌ها، توسعه فناوری‌های لایه‌نشانی دقیق (اچ‌تی‌ال)، سلول‌های منعطف، چاپ‌پذیری صنعتی و ساختارهای دوبُعدی، حاصل تجربیات عملی و آزمون‌وخطاهای گسترده در مسیر صنعتی‌سازی این فناوری است. برای کشوری مانند ایران که در آستانه تصمیم‌گیری درباره ورود به توسعه بومی سلول‌های پروسکایتی است، این اطلاعات می‌تواند نقشه‌راهی واقع‌گرایانه، آینده‌نگر و مبتنی‌بر داده فراهم کند. به این ترتیب، استفاده از تجربه‌های انباشته‌شده در پروژه‌های اروپایی، هم موجب افزایش اثربخشی منابع محدود ملی می‌شود و هم سرعت دستیابی به سطح آمادگی فناوری[2] بالا را در فناوری پروسکایت ارتقاء می‌بخشد.

بحث

توسعه پایدار و دستیابی به منابع انرژی تجدیدپذیر، یکی از مهم‌ترین اهداف کشورهای پیشرو در حوزه فناوری است. با توجه به رشد فزاینده مصرف انرژی و محدودیت منابع فسیلی در ایران، بهره‌گیری از انرژی خورشیدی به‌عنوان یک منبع پایدار و تجدیدپذیر، اهمیت زیادی دارد. در این میان، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوظهور، ظرفیت بالایی برای تولید انرژی پاک، ارزان و کارآمد دارند. بررسی روند جهانی توسعه سلول‌های خورشیدی نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، سرمایه‌گذاری‌های گسترده‌ای در حوزه فناوری‌های پروسکایتی انجام شده است. کشورهای چین، ژاپن و کره

1. HTL: Hole transport layer
2. TRL: Technology readiness levels

نشریه علمی مدیریت نوآوری
سال ۱۴/ شماره ۲ (۵۲) / تابستان ۱۴۰۴

جنوبی در برنامه‌های ملی خود، حمایت ویژه‌ای از این فناوری داشته و مسیر تجاری‌سازی آن را با سرعت زیادی پیش برده‌اند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که اولویت‌بندی فناوری‌های سلول خورشیدی در ایران نمی‌تواند صرفاً برمبنای وفور منابع یا نیاز بازار انجام شود، بلکه باید تلفیقی از نیاز ملی، توانمندی بومی و تحلیل دقیق روندهای فناورانه جهانی را دربرگیرد. بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که ایران از ظرفیت علمی و زیرساختی مناسبی برای توسعه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی برخوردار است. با وجود این، چالش‌هایی مانند بهبود پایداری مواد پروسکایتی نیازمند سیاست‌های جامع‌تر است. یافته‌های این پژوهش که بر پایه مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با متخصصان، سیاست‌گذاران و فعالان صنعتی حوزه انرژی خورشیدی ایران انجام شد، نشان می‌دهد که انتخاب مسیر توسعه فناوری نمی‌تواند تنها بر اساس روندهای جهانی یا فناوری‌های غالب باشد، بلکه باید متکی بر تحلیل دقیق نیازها، اولویت‌ها و ظرفیت‌های داخلی باشد. مصاحبه‌شوندگان به اتفاق، بر ضرورت فاصله‌گیری از تمرکز صرف بر سلول‌های خورشیدی سیلیکونی تأکید کرده و به وجود موانع زیرساختی و اشباع بازار در این حوزه اشاره کردند. مشارکت‌کنندگان پژوهش، فناوری پروسکایتی را به دلیل سادگی فرآیند تولید، امکان توسعه در مقیاس کوچک و انعطاف‌پذیری طراحی، به‌عنوان اولویت نخست توسعه در ایران معرفی کردند. از سوی دیگر، فناوری سی‌آی‌جی‌اس نیز به‌عنوان گزینه دوم مطرح شد؛ فناوری‌ای که ضمن داشتن سابقه صنعتی، با نیازهای مناطق دورافتاده، سبک و غیرشبکه‌ای و شرایط اقلیمی کشور همخوانی دارد. از مهم‌ترین دلایل انتخاب این دو فناوری از دید خبرگان، می‌توان به امکان بومی‌سازی تجهیزات تولید، سهولت انتقال فناوری، نیاز کمتر به سرمایه‌گذاری سنگین اولیه و امکان ورود شرکت‌های دانش‌بنیان به فرایند توسعه اشاره کرد. همچنین، مصاحبه‌شوندگان بر این باور بودند که این فناوری‌ها، فرصت مناسبی برای تقویت توان تحقیقاتی دانشگاه‌ها و ایجاد پیوند واقعی میان علم و صنعت در کشور فراهم می‌کنند. در مقایسه نظرات خبرگان تحقیق، تحلیل آماری پتنت‌ها و پروژه‌های اتحادیه اروپا

(چشم‌انداز ۲۰۲۰)، می‌توان گفت که اولویت پروژه‌های اتحادیه اروپا (چشم‌انداز ۲۰۲۰) به‌ترتیب شامل الف- سلول‌های خورشیدی نسل اول سیلیکونی: بهبود عملکرد و توسعه کاربرد، ب- سلول‌های خورشیدی پروسکایتی: توسعه فناوری با تکیه بر نانومواد مرتبط و افزایش طول عمر و ج- سلول خورشیدی سی‌آی‌جی‌اس: افزایش بازدهی است. با توجه به اینکه کشورهای اروپایی از دانش فنی طراحی و ساخت سلول خورشیدی سیلیکونی برخوردار هستند، اولویت این اتحادیه ابتدا توسعه کاربرد نسل اول سیلیکونی موجود و تجاری‌سازی‌شده است و سپس توسعه فناوری پروسکایت. تعداد محدودی پروژه درباره سی‌آی‌جی‌اس هم تعریف شده است. نتایج حاصل از تحلیل آماری پتنت‌ها، رشد بسیار بالای سلول‌های خورشیدی پروسکایتی از سال ۲۰۱۴ تا به امروز و نزول تعداد پتنت‌های سلول خورشیدی سی‌آی‌جی‌اس از سال ۲۰۱۴ تاکنون را نشان می‌دهد. این امر مؤید نظر مصاحبه‌شوندگان مبنی‌بر رشد بسیار بالای روند ثبت پتنت‌ها در حوزه پروسکایت به‌ویژه از سال ۲۰۱۴ تا به امروز است. اولویت‌های حاصل از مصاحبه با نخبگان به‌ترتیب شامل الف- سلول‌های خورشیدی پروسکایتی: افزایش مقیاس و تحقیق و توسعه برای افزایش پایداری و فرایند ساخت به صورت پرینت، ب- سلول‌های خورشیدی نسل اول سیلیکونی: توسعه درون‌زا یا مهندسی معکوس ساخت این سلول‌ها در کشور و ج- سلول خورشیدی سی‌آی‌جی‌اس: تحقیق و توسعه برای ساخت مبتنی‌بر پرینت و افزایش بازدهی است. با توجه به عدم برخورداری کشور از دانش فنی تولید صنعتی سلول خورشیدی، سلول خورشیدی پروسکایتی به دلایل ذکرشده در اولویت قرار داشت. درنتیجه توسعه فناوری پروسکایت به‌عنوان یک اولویت مورد تأکید بوده است. اما اولویت داشتن یا نداشتن توسعه فناوری و محصول سلول خورشیدی سیلیکونی نسبت به پروسکایت، از نقاط افتراق این یافته‌هاست. یافته‌های پژوهش مبتنی‌بر نظرات خبرگان موردمصاحبه نشان می‌دهد که ایران می‌تواند از طریق تدوین یک نقشه‌راه جامع، مسیر توسعه این فناوری را هموار کند. این نقشه‌راه باید بر چهار محور اصلی متمرکز باشد: ۱. تحقیق و توسعه: سرمایه‌گذاری در تحقیقات دانشگاهی و صنعتی به‌منظور

نشریه علمی مدیریت نوآوری
سال ۱۴/ شماره ۲ (۵۲) / تابستان ۱۴۰۴

بهبود پایداری سلول‌های پروسکایتی، افزایش طول عمر آنها و بهینه‌سازی فرایندهای تولید، ۲. توسعه زیرساخت‌های صنعتی: ایجاد مراکز تولید نیمه‌صنعتی و حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در حوزه انرژی خورشیدی، ۳. حمایت‌های مالی و سرمایه‌گذاری: اختصاص بودجه‌های دولتی و تسهیلات مالی برای تجاری‌سازی این فناوری و تشویق بخش خصوصی برای ورود به این صنعت و ۴. همکاری‌های بین‌المللی: مشارکت با مراکز تحقیقاتی و صنعتی پیشرو در جهان برای انتقال فناوری و بهره‌گیری از تجربیات موفق سایر کشورها.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

منابع

اخروی، امیرحسین و شکیبامنش، علیرضا. (۱۳۹۸). ارائه مدل تدوین نقشه راه فناوری‌های یک سامانه پیشرفته. فصلنامه مدیریت توسعه فناوری، ۹۱-۱۱۸.

ایرنا. (۱۴۰۳، دی ۱۴). پیش‌بینی ناترازی برق. بازیابی از ایرنا: www.irna.ir/xjSxgh

ایرنا. (۱۴۰۳، شهریور ۲۸). کمبود گاز. بازیابی از ایرنا: www.irna.ir/xjRC2N

ایرنا. (۱۴۰۳، مهر ۳). ناترازی برق. بازیابی از ایرنا: www.irna.ir/xjRDWx

بیانلو، زهره و زارع احمدآبادی، حبیب (۱۳۹۵). پیش بینی تحقیقات فناوری در قلمرو منتخب از انرژی خورشیدی: کاربرد تحلیل پتنت و شبکه عصبی مصنوعی. مدیریت توسعه فناوری، ۴(۱)، ۱۴۹-۱۷۱

خیاطیان یزدی، محمدصادق، فرتاش، کیارش و قربانی، امیر. (۱۳۹۹). تحلیل تطور تاریخی توسعه فناوری سیستم‌های خورشیدی فتوولتائیک در ایران: رویکردی نهادی. بهبود مدیریت ۱۴(۱)، ۱-۳۰.

رحیمی راد، زهره، یحیی زاده فر، محمود، میرعمادی، طاهره و مدهوشی، مهرداد (۱۳۹۶). تحلیل نظام نوآوری فناورانه سیستم‌های خورشیدی فتوولتاییک در ایران. مدیریت نوآوری ۶(۴)، ۱-۲۸.

کاویانی کوثرخیزی، کیارش ، بوشهری، علیرضا و منطقی، منوچهر . (۱۳۹۱). مطالعه تطبیقی و دسته بندی روش های تدوین نقشه راه (ره نگاشت) فناوری. رهیافت، ۲۲(۵۰)، ۷۵-۹۲.

محمدنژاد فیروزجایی، رقیه، علیزاده ثانی، محسن، محسنی کیاسری، مصطفی و سعدآبادی ارانی، علی اصغر. (۱۴۰۴). گونه شناسی نوآوری اجتماعی در انرژی تجدیدپذیر ایران. سیاست علم و فناوری، ۱۸(۱)، ۵۱-۶۸.

مرکز آمار ایران. (۱۴۰۲). سالنامه آماری کشور ۱۴۰۱. تهران: مرکز آمار ایران.

الهی، شعبان، غریبی، جلیل، مجیدپور، مهدی و انواری رستمی، علی اصغر. (۱۳۹۴). مسیر اشاعه فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر: رویکرد نظریه سازی بنیادی. مدیریت نوآوری ۴(۲)، ۳۳-۵۶.

Alhafadhi, L., Teh, J., Lai, C.-M., & Salem, M. (2020). Predictive adaptive filter for reducing total harmonics distortion in PV systems. Energies.

Alhamrouni, I., Danial, M., Salem, M., Awalin, L., & Ismail, B. (2020). Design of 2LC-Y DC-DC converter for high voltage/low current renewable energy application. Test Engineering & Management, 2111-2117.

Alhuyi Nazari, M., Salem, M., Mahariq, I., Younes, K., & Maqableh, B. (2021). Utilization of data-driven methods in solar desalination systems: a comprehensive review. Frontiers in Energy Research. Frontiers in Energy Research.

Ang, T.-Z., Mohamed, S., Mohamad, K., Prabaharan, N., Mohammad Alhuyi, N., & Nazari, M. (2022). A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. Energy Strategy Reviews.

Bisquert, J. (2017). The physics of solar cells: perovskites, organics, and photovoltaic fundamentals. USA: CRC press.

Diakaki, C., Grigoroudis, E., Kabelis, N., Kolokotsa, D., Kalaitzakis, K., & Stavrakakis, G. (2010). A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings. Energy, 5483-5496.

EurekAlert! (2024, January 31). KRICT sets new world record for large-area perovskite solar cells, accelerating commercialization از بازیابی .EurekAlert!;: https://www.eurekalert.org/news-releases/1064815

Kardooni, R., Binti Yusoff, S., & Binti Kari, F. (2016). Renewable energy technology acceptance in Peninsular Malaysia. Energy policy, 1-10.

Kostoff, R. N., & Schaller, R. R. (2001). Science and technology roadmaps. IEEE Transactions on Engineering Management, 132-143.

L. Garcia, M., & H. Bray, O. (1997). Fundamentals of technology roadmapping. Sandia National Laboratories.

Lee, S., & Park, Y. (2005). Customization of technology roadmaps according to roadmapping purposes. Technological Forecasting & Social Change, 567-583.

National Renewable Energy Laboratory. (2025). Best research-cell efficiency chart [Chart]. USA: U.S. Department of Energy از بازیابی . https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html

Phaal, R., Farrukh, C., & Probert, D. (2004). Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution. Technological Forecasting & Social Change, 5-26.

Probert, D., Farrukh, C., & Phaal, R. (2003). Technology roadmapping—developing a practical approach for linking resources to strategic goals. Journal of Engineering Manufacture, 1183-1195.

Razumnikova, O. (2020). Divergent versus convergent thinking در .E. Carayannis, Encyclopedia of Creativity, Invention, Innovation and Entrepreneurship .ص) .(۷۶۵-۷۵۹Cham: Springer International Publishing.

REN21. (2024). Renewables 2024 global status report collection, global overview. Paris: REN21 Secretariat.

Santika, W., Anisuzzaman, M., A. Bahri, P., Shafiullah, G., V. Rupf, G., & Urmee, T. (2019). From goals to joules: A quantitative approach of interlinkages between energy and the Sustainable Development Goals. Energy Research & Social Science, 201-214.

Smets, A., Jäger, K., Isabella, O., Swaaij, R., & Zeman, M. (2014). Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. India: UIT Cambridge.

Vine, E. (2008). Breaking down the silos: the integration of energy efficiency, renewable energy, demand response and climate change. Energy efficiency, 49-63.

Zhao, J. (2024). China advances to GW-scale mass production of perovskite solar cells: Aims to exceed 30% conversion efficiency with tandem cells. Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی