



Sustainable Management of Solar Panels within the Framework of a Circular Economy

Fatemeh Molaie^a, Mohsen Rezaeian^a, Jahanbakhsh Balist^{a*}

^aDepartment of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

*Corresponding author: j.balist@ut.ac.ir, <https://orcid.org/0000-0002-4431-3290>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/01/27
Received in revised form:
2026/02/20
Accepted 2026/02/27
Available online: 2026/03/10

Keywords:
Circular Economy,
Solar Panel Recycling,
Photovoltaic Waste,
Sustainable Development,
Producer Responsibility.

ABSTRACT

The rapid expansion of solar energy systems has played a significant role in reducing greenhouse gas emissions and accelerating the global transition toward renewable energy. However, the increasing deployment of photovoltaic (PV) technologies has also led to growing concerns regarding the management of end-of-life (EoL) photovoltaic modules, which are emerging as a major environmental, economic, and managerial challenge. As the installed capacity of PV systems continues to increase worldwide, a substantial volume of PV waste is expected to be generated in the coming decades. Consequently, developing effective strategies for the collection, recycling, and recovery of valuable materials has become an essential prerequisite for achieving a circular economy in the renewable energy sector. This study aims to comprehensively examine the challenges associated with end-of-life photovoltaic panel management and to identify sustainable recycling strategies through a descriptive-analytical review of recent scientific literature, international reports, and global best practices. The study investigates the technical, economic, environmental, institutional, and social dimensions of PV waste management while evaluating current mechanical, thermal, and chemical recycling technologies, Extended Producer Responsibility (EPR) policies, Design for Recycling (DfR) principles, regulatory frameworks, stakeholder engagement, and circular economy approaches. The findings indicate that insufficient recycling infrastructure, high processing costs, technological limitations, weak regulatory enforcement, inadequate investment, and the absence of integrated waste management systems remain the primary barriers to sustainable photovoltaic recycling, particularly in developing countries. Conversely, strengthening domestic recycling technologies, implementing Extended Producer Responsibility schemes, promoting recyclable product design, expanding secondary materials markets, enhancing collaboration among governments, industry, and research institutions, and increasing public awareness can significantly improve material recovery rates, reduce environmental impacts, and enhance resource efficiency throughout the photovoltaic value chain. The main contribution of this study is the development of an integrated and locally adaptable framework for sustainable end-of-life photovoltaic panel management in Iran. By combining technical, economic, institutional, and policy perspectives, the proposed framework provides practical guidance for supporting the transition toward a circular economy and improving resource sustainability within the renewable energy sector.

Cite this article: Molaie, F., rezaeian, M., & Balist, J. (2026). Sustainable Management of Solar Panels within the Framework of a Circular Economy. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 1(1), 60-78. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252594>



Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252594>

Introduction

The rapid growth of renewable energy technologies, especially photovoltaic systems, has played a pivotal role in the global transition to sustainable development and reduced dependence on fossil fuels. However, the accumulation of end-of-life solar modules has become one of the world's emerging environmental and management challenges. Estimates indicate that by the middle of this century, more than 78 million tons of photovoltaic panels will be discarded worldwide; a figure that, in the absence of recycling infrastructure, could pose a serious threat to soil, water, and human health. Solar panels are composed of materials such as glass (more than 70% by weight), aluminum, silicon, and silver, which have high economic value, but at the same time contain compounds such as lead and cadmium, which, if improperly disposed of, cause serious environmental pollution. The multilayer structure and thermal bonding of the panel components make separation and recycling difficult and costly. In Iran, with the growth of small-scale and home solar power plants (more than 500 MW of installed capacity by the end of 1402), the issue of end-of-life management of this equipment is becoming a national concern, but it still lacks binding laws, technological infrastructure, and effective regulatory mechanisms. The theoretical framework of this research is based on the principles of circular economy, which aims to preserve the value of materials in the production cycle and reduce resource waste. In this regard, two key concepts, including Extended Producer Responsibility (EPR) and Design for Recyclability (DfR), play a central role. The main objective of this research is to analyze the challenges and opportunities of photovoltaic panel waste management and to provide an integrated and indigenous framework for Iran that is based on Extended Producer Responsibility, product design with recyclability, development of mechanical, thermal, and chemical technologies appropriate to domestic capacity, and tracking and stakeholder participation mechanisms. The importance of the research is that by combining EPR policy, recyclable design, localized technologies, and stakeholder participation, it provides an operational model for sustainable management of solar waste in Iran that can be used as a model for other developing countries with similar conditions.

Method

This research is an analytical review study with a qualitative approach and is based on library and document studies. A systematic search was conducted in reputable international databases including ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, and Google Scholar, as well as Persian databases including SID, Magiran, and Civilica with the combined keywords "solar panel recycling", "photovoltaic waste management", "circular economy", "extended producer responsibility", and their Persian equivalents including "solar panel recycling", "photovoltaic waste", "circular economy", and "producer responsibility". The search period was from 2010 to 2025 to cover the latest research, global policies, and technological developments in the field of solar panel recycling. Inclusion criteria included (1) direct relevance to the topic of photovoltaic panel waste management or recycling, (2) provision of quantitative or qualitative data on recycling technologies, EPR policies, or environmental-economic analysis, and (3) publication in reputable scientific journals or official reports of international organizations (such as IRENA, IEA, and EPA). From 112 primary sources, 40 articles and reports that were most relevant to the topic were selected and analyzed. The data extraction process was carried out qualitatively using the oriented content analysis method, and the information was categorized into four main axes: (1) technical challenges, (2) economic challenges, (3) institutional and legal challenges, and (4) cultural challenges and public awareness. Also, successful global models in the field of PV waste management (such as the European Union's experience in implementing the WEEE Directive, the EPR model in Germany and France, and the PV CYCLE project) were analyzed for localization in Iran. To analyze the current situation

in Iran, reports from Tavanir Company, the Renewable Energy Organization (SATBA), and related domestic research were used. The data were examined using comparative and content analysis methods, and based on that, a proposed integrated framework for sustainable management of solar panel waste and transition to a circular economy in Iran was designed.

Results

A systematic review of the literature and qualitative data analysis revealed that sustainable solar panel waste management faces significant challenges across technical, economic, institutional, and social dimensions. From a technical perspective, the complex multilayer structure of photovoltaic (PV) panels and the strong bonding of their components make recycling difficult and expensive. Recovering valuable materials such as silver and silicon requires advanced thermal and chemical technologies that are not yet widely commercialized. In addition, the lack of international standards for design for recyclability has limited the development of more recyclable PV modules.

Economically, the high cost of recycling, combined with the relatively low market value of some recovered materials, reduces the profitability of recycling activities. Limited government subsidies, insufficient financial incentives, and the absence of well-developed secondary markets further discourage private investment in recycling infrastructure. Institutionally, many countries, including Iran, still lack comprehensive regulations, monitoring systems, and unified technical standards for end-of-life PV management. The absence of Extended Producer Responsibility (EPR) mechanisms also weakens the collection and recycling of discarded panels. From a social perspective, limited public awareness regarding proper disposal and recycling, together with the rapid evolution of PV technologies and the increasing diversity of panel designs, creates additional challenges for establishing efficient recycling systems.

To address these challenges, several opportunities and policy measures were identified. These include promoting a circular economy through design for recycling, component reuse, and material recovery; implementing Extended Producer Responsibility (EPR) policies based on successful international experiences; developing indigenous recycling technologies using mechanical, thermal, and chemical processes, supported by emerging technologies such as artificial intelligence and nanotechnology; creating economic incentives through subsidies, tax exemptions, and take-back programs; improving panel design to facilitate recycling; establishing national monitoring and traceability systems using digital databases and QR codes; strengthening international cooperation and technology transfer; and enhancing public awareness through education and outreach programs. Together, these strategies can improve resource recovery, reduce environmental impacts, and support the long-term sustainability of the photovoltaic industry.

Conclusions

A systematic review of the literature and analysis of the challenges and opportunities of photovoltaic panel waste management showed that this issue is not just an environmental challenge, but a strategic issue for sustainable development in which smart policy-making, technological innovation, interagency cooperation, public participation, and culture-building play a central role. The challenges can be summarized in five categories: technical, economic, institutional, cultural, and emerging technologies, and opportunities such as the development of green recycling technologies, redesigning panels based on recyclability, strengthening the EPR system, establishing a national database, and active participation of the private sector pave the way for the transition to a circular economy. The proposed framework for Iran is based on three main axes: (1) an institutional and policy framework including the establishment of a national recycling institution, the adoption of an EPR law, and a digital tracking system; (2) the technical and economic model including the combination of mechanical, thermal, and chemical

technologies, regional centers with the PPP model, and the support system and economic incentives; and (3) the role of stakeholders and public participation including the government, municipalities, the private sector, the media, and citizens. If countries like Iran can respond to this issue in a timely manner and properly localize global models, they will not only prevent future environmental threats, but also provide them with new opportunities in the field of green economy, employment, and resource efficiency. It is suggested that future research should focus on quantitative assessment of waste generation, techno-economic feasibility of regional recycling centers, and comparative study of EPR policies in different countries. The establishment of the proposed integrated framework can increase the recovery of valuable materials, reduce environmental risks, and facilitate the transition to a circular economy in the renewable energy sector.



مدیریت پایدار پل های خورشیدی در چارچوب اقتصاد چرخشی

فاطمه مولائی^a، محسن رضائیان^a، جهانبخش بالیست^{a*}

^a گروه برنامه ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: j.balist@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	رشد سریع بهره گیری از انرژی خورشیدی در سال های اخیر، اگرچه نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و توسعه انرژی های تجدیدپذیر داشته است، اما هم زمان مسئله مدیریت پل های فتوولتائیک پایان عمر را به یکی از چالش های مهم محیط زیستی، اقتصادی و مدیریتی تبدیل کرده است. با افزایش ظرفیت نصب نیروگاه های خورشیدی، حجم پسماند این تجهیزات نیز در دهه های آینده به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت؛ از این رو طراحی و اجرای راهکارهای مؤثر برای جمع آوری، بازیافت و بازگرداندن مواد ارزشمند به چرخه تولید، از الزامات تحقق اقتصاد چرخشی در صنعت انرژی به شمار می رود. پژوهش حاضر با هدف تحلیل جامع چالش ها و ارائه راهبردهای پایدار برای مدیریت پل های فتوولتائیک پایان عمر، با استفاده از روش مرور تحلیلی و توصیفی، مطالعات علمی، گزارش های بین المللی و تجربیات کشورهای پیشرو را بررسی کرده است. در این مطالعه، چالش های فنی، اقتصادی، محیط زیستی، نهادی و اجتماعی مرتبط با بازیافت پل های خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفته و فناوری های متداول بازیافت مکانیکی، حرارتی و شیمیایی، سیاست های مسئولیت توسعه یافته تولیدکننده، طراحی برای بازیافت پذیری، الزامات قانونی، نقش ذی نفعان و ظرفیت های اقتصاد چرخشی تحلیل شده اند. یافته های پژوهش نشان می دهد که نبود زیرساخت های مناسب بازیافت، هزینه های بالای فرآوری، محدودیت فناوری، ضعف قوانین الزام آور، کمبود سرمایه گذاری و نبود نظام یکپارچه مدیریت پسماند، از مهم ترین موانع توسعه بازیافت پایدار پل های خورشیدی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، محسوب می شوند. در مقابل، توسعه فناوری های بومی بازیافت، استقرار نظام مسئولیت توسعه یافته تولیدکننده، بهبود طراحی ماژول ها با هدف تسهیل جداسازی اجزا، توسعه بازار مواد بازیافتی، تقویت همکاری میان دولت، صنعت و مراکز پژوهشی و ارتقای آگاهی عمومی می تواند میزان بازیابی مواد ارزشمند را افزایش داده، آثار محیط زیستی را کاهش دهد و بهره وری زنجیره تأمین را بهبود بخشد. نوآوری این پژوهش، ارائه چارچوبی یکپارچه و بومی سازی شده برای مدیریت پایدار پسماند پل های فتوولتائیک در ایران است که با تلفیق ابعاد فنی، اقتصادی، نهادی و سیاستی، زمینه گذار به اقتصاد چرخشی و استفاده بهینه از منابع در صنعت انرژی های تجدیدپذیر را فراهم می سازد.
کلیدواژه ها: اقتصاد چرخشی، بازیافت پل خورشیدی، پسماند فتوولتائیک، توسعه پایدار، مسئولیت تولیدکننده.	
استناد به این مقاله: مولایی، فاطمه؛ رضائیان، محسن و بالیست، جهانبخش. (۱۴۰۴). مدیریت پایدار پل های خورشیدی در چارچوب اقتصاد چرخشی. راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۱(۱)، ۸۷-۶۰. https://doi.org/10.22034/jscsm.2026.252594	
	
© نویسندگان	
DOI: https://doi.org/10.22034/jscsm.2026.252594	
ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران	

مقدمه

رشد فزاینده تقاضای جهانی برای انرژی، نگرانی‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، موجب شده است توسعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر به یکی از اولویت‌های اصلی سیاست‌های انرژی در بسیاری از کشورها تبدیل شود (Billewar et al., 2023). در این میان، سامانه‌های فتوولتائیک به دلیل دسترسی گسترده به منبع خورشیدی، کاهش مستمر هزینه تولید، پیشرفت فناوری ساخت و قابلیت نصب در مقیاس‌های مختلف، جایگاه ویژه‌ای در سبد انرژی جهان یافته‌اند. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی^۱ (IEA, 2023)، انرژی خورشیدی تا سال ۲۰۲۸ بیشترین سهم را در افزایش ظرفیت تولید برق از منابع تجدیدپذیر خواهد داشت و به موتور محرک گذار جهانی به سمت انرژی پاک تبدیل می‌شود. همچنین گزارش مشترک آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر^۲ و اتحادیه بین‌المللی مخابرات^۳ نشان می‌دهد که توسعه سریع صنعت فتوولتائیک، علاوه بر مزایای اقتصادی و محیط‌زیستی، چالش‌های جدیدی در زمینه مدیریت تجهیزات پایان عمر ایجاد کرده است؛ به گونه‌ای که مدیریت پایدار پنل‌های مستعمل به یکی از ارکان تحقق اقتصاد چرخشی و توسعه پایدار تبدیل شده است (Tripathi et al., 2026; Chowdhury et al., 2022; Askari Shayegan et al., 2024).

افزایش ظرفیت نصب سامانه‌های خورشیدی، به‌طور اجتناب‌ناپذیر موجب افزایش حجم پنل‌های خارج‌شده از چرخه بهره‌برداری خواهد شد. عمر مفید اغلب پنل‌های فتوولتائیک بین ۲۵ تا ۳۰ سال برآورد می‌شود؛ بنابراین نخستین نسل نیروگاه‌های خورشیدی که از دهه ۱۹۹۰ و اوایل دهه ۲۰۰۰ نصب شده‌اند، اکنون به پایان عمر عملیاتی خود نزدیک می‌شوند. برآوردهای انجام‌شده نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۷۸ میلیون تن پسماند پنل‌های خورشیدی در جهان تولید خواهد شد که در صورت نبود زیرساخت‌های مناسب برای جمع‌آوری، بازیافت و استفاده مجدد، می‌تواند به یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی و اقتصادی قرن حاضر تبدیل شود (Sandanayake et al., 2022). در همین راستا، مطالعات جدید نیز روند رو به رشد تولید پسماندهای فتوولتائیک را تأیید کرده و بر ضرورت توسعه سامانه‌های مدیریت پایان عمر تجهیزات تأکید دارند (Piedrahita et al., 2025; Khakpour et al., 2025).

پنل‌های خورشیدی از مواد ارزشمند و راهبردی نظیر شیشه، آلومینیوم، سیلیکون، مس و نقره تشکیل شده‌اند که بازیابی آن‌ها علاوه بر کاهش مصرف منابع طبیعی، می‌تواند ارزش اقتصادی قابل‌توجهی برای صنعت بازیافت ایجاد کند. در مقابل، وجود فلزات سنگین و ترکیباتی نظیر سرب، کادمیوم و برخی پلیمرهای مقاوم در ساختار این تجهیزات، در صورت دفن یا دفع غیراصولی، خطر آلودگی خاک، منابع آب و اکوسیستم‌های طبیعی را افزایش می‌دهد (Babaei & Nasr Esfahani, 2024; Sánchez et al., 2024). علاوه بر این، ساختار چندلایه ماژول‌های فتوولتائیک، استفاده از لایه‌های پلیمری مقاوم و اتصال حرارتی اجزای مختلف، فرآیند جداسازی مواد را با پیچیدگی‌های فنی و هزینه‌های بالا مواجه کرده است؛ به همین دلیل، توسعه فناوری‌های بازیافت مکانیکی، حرارتی، شیمیایی و ترکیبی به یکی از مهم‌ترین محورهای پژوهش‌های اخیر تبدیل شده است (Gerold & Antrekowitsch, 2024; Das & Sarmah, 2025; Wei et al., 2025; Celep et al., 2025).

همزمان با توسعه فناوری‌های بازیافت، مفهوم اقتصاد چرخشی به‌عنوان چارچوبی نوین برای مدیریت پایدار منابع، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. برخلاف الگوی اقتصاد خطی که بر استخراج، تولید، مصرف و دفع استوار است، اقتصاد چرخشی بر حفظ ارزش مواد، افزایش طول عمر محصولات، استفاده مجدد، بازتولید و بازیافت مؤثر تأکید

¹ International Energy Agency (IEA)

² International Renewable Energy Agency (IRENA)

³ International Telecommunication Union (ITU)

دارد. در صنعت فتوولتائیک، اجرای سیاست‌هایی مانند مسئولیت توسعه‌یافته تولیدکننده^۱، طراحی برای بازیافت‌پذیری^۲، توسعه بازار مواد بازیافتی و ایجاد زنجیره‌های تأمین بسته، از مهم‌ترین راهکارهای تحقق اقتصاد چرخشی به شمار می‌روند (Wambach et al., 2024; IRENA & ITU, 2023). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که موفقیت این رویکرد مستلزم هم‌افزایی میان سیاست‌گذاران، تولیدکنندگان، مراکز پژوهشی، صنایع بازیافت و مصرف‌کنندگان است و بدون وجود چارچوب‌های قانونی، سرمایه‌گذاری در فناوری و مشارکت ذی‌نفعان، دستیابی به چرخه بسته مواد امکان‌پذیر نخواهد بود (Chowdhury et al., 2022; Askari Shayegan et al., 2024; Gerold & Antrekowitsch, 2024).

مرور ادبیات بین‌المللی نشان می‌دهد که طی سال‌های اخیر مطالعات متعددی به بررسی ابعاد مختلف مدیریت پسماند پنل‌های فتوولتائیک پرداخته‌اند. برخی پژوهش‌ها بر توسعه فناوری‌های بازیافت و افزایش راندمان بازیابی مواد ارزشمند تمرکز داشته‌اند (Sánchez et al., 2024; Das & Sarmah, 2025; Wei et al., 2025)، در حالی که گروهی دیگر ابعاد اقتصادی، سیاست‌گذاری و امکان‌سنجی استقرار اقتصاد چرخشی را مورد بررسی قرار داده‌اند (Piedrahita et al., 2025; Askari Shayegan et al., 2024; Khakpour et al., 2025). همچنین، مرورهای جامع انجام‌شده توسط همکاران (۲۰۲۴) Babaei & Nasr Esfahani، Chowdhury و همکاران (۲۰۲۲)، Wambach و همکاران (۲۰۲۴) و Celep و همکاران (۲۰۲۵) نشان می‌دهد که اگرچه پیشرفت‌های قابل‌توجهی در حوزه فناوری‌های بازیافت و سیاست‌های مدیریت پسماند حاصل شده است، اما همچنان شکاف قابل‌توجهی میان رشد حجم پسماندهای فتوولتائیک و ظرفیت واقعی بازیافت در بسیاری از کشورها وجود دارد. افزون بر این، اغلب مطالعات هر یک تنها بر یک یا چند بعد فنی، اقتصادی یا سیاستی تمرکز داشته‌اند و کمتر پژوهشی به ارائه چارچوبی یکپارچه برای تلفیق ابعاد فنی، اقتصادی، نهادی، اجتماعی و محیط‌زیستی مدیریت پنل‌های پایان عمر در چارچوب اقتصاد چرخشی پرداخته است.

در ایران نیز توسعه نیروگاه‌های خورشیدی طی سال‌های اخیر شتاب گرفته و برنامه‌های متعددی برای گسترش سامانه‌های خورشیدی خانگی و نیروگاه‌های مقیاس کوچک در دستور کار قرار گرفته است (Tavanir, 2023). با این حال، بررسی ادبیات داخلی نشان می‌دهد که پژوهش‌های انجام‌شده عمدتاً بر طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های فتوولتائیک، ارزیابی عملکرد نیروگاه‌های خورشیدی، تحلیل بازده پنل‌ها و امکان‌سنجی توسعه انرژی خورشیدی متمرکز بوده‌اند و موضوع مدیریت پسماند، بازیافت تجهیزات پایان عمر و به‌کارگیری اصول اقتصاد چرخشی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در میان مطالعات موجود، پژوهش Babaei & Nasr Esfahani (۲۰۲۴) یکی از معدود مطالعاتی است که مدیریت پایدار پسماند پنل‌های خورشیدی را از منظر اقتصاد چرخشی بررسی کرده و بر ضرورت تدوین سیاست‌های ملی، ایجاد زیرساخت‌های بازیافت، توسعه فناوری‌های بومی و مشارکت فعال ذی‌نفعان تأکید دارد. بنابراین، فقدان مطالعات جامع داخلی که بتوانند ابعاد فنی، اقتصادی، نهادی و سیاستی مدیریت پنل‌های پایان عمر را به‌صورت یکپارچه تحلیل کنند، بیانگر وجود شکاف پژوهشی قابل‌توجه در ادبیات ایران است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف تحلیل جامع چالش‌ها و راهبردهای پایدار بازیافت پنل‌های فتوولتائیک پایان عمر در چارچوب اقتصاد چرخشی انجام شده است. این مطالعه با تلفیق یافته‌های پژوهش‌های جدید، گزارش‌های بین‌المللی و تجربیات کشورهای مختلف، چالش‌های فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی، نهادی و اجتماعی مدیریت پسماندهای فتوولتائیک را بررسی کرده و با تأکید بر سیاست مسئولیت توسعه‌یافته تولیدکننده، طراحی برای بازیافت‌پذیری، توسعه فناوری‌های بومی، تقویت قوانین و ارتقای همکاری میان دولت، صنعت و مراکز پژوهشی،

¹ Extended Producer Responsibility (EPR)

² Design for Recycling (DfR)

چارچوبی یکپارچه برای مدیریت پایدار پنل‌های خورشیدی پایان عمر، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه و ایران، ارائه می‌دهد.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نوع مرور روایی تحلیلی است که با رویکرد کیفی و با هدف شناسایی، مقایسه و سنتز یافته‌های پژوهش‌های پیشین در زمینه مدیریت و بازیافت پسماند پنل‌های فتوولتائیک و ارتباط آن با اقتصاد چرخشی انجام شده است. فرایند مرور ادبیات بر اساس یک پروتکل چهارمرحله‌ای و به‌صورت تدریجی طراحی شد؛ به‌گونه‌ای که منابع از سطح اولیه اطلاعات (عنوان) به سطوح عمیق‌تر بررسی (متن کامل) منتقل شدند. دامنه زمانی مطالعات، سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ در نظر گرفته شد تا ضمن پوشش تحولات اولیه و توسعه فناوری‌های بازیافت پنل‌های خورشیدی، پژوهش‌ها و سیاست‌های جدیدتر نیز مورد توجه قرار گیرند.

۱. شناسایی و جستجوی منابع

جستجوی منابع در پایگاه‌های علمی معتبر شامل Scopus، ScienceDirect و Google Scholar انجام شد. برای شناسایی مطالعات مرتبط، از ترکیب کلیدواژه‌های انگلیسی شامل photovoltaic، solar panel recycling، waste management، photovoltaic module recycling، solar photovoltaic waste، circular economy، end-of-life photovoltaic panels و extended producer responsibility استفاده شد. در صورت امکان، کلیدواژه‌ها با استفاده از عملگرهای منطقی AND و OR ترکیب شدند تا دامنه جستجو ضمن حفظ جامعیت، بر موضوع پژوهش متمرکز باشد.

در مرحله شناسایی اولیه، در مجموع ۳۱۲ رکورد از پایگاه‌های مورد بررسی استخراج شد. پس از حذف موارد تکراری، تعداد ۲۴۷ رکورد برای ورود به فرایند غربالگری باقی ماند.

۲. پروتکل غربالگری و انتخاب مطالعات

به‌منظور افزایش شفافیت و قابلیت پیگیری فرایند انتخاب منابع، غربالگری مطالعات در چهار مرحله متوالی انجام شد:

مرحله اول: غربالگری عنوان^۱

در این مرحله عنوان تمامی ۲۴۷ رکورد بررسی شد. مطالعاتی که به‌طور آشکار با موضوع، هدف یا دامنه پژوهش ارتباط نداشتند، حذف شدند. پس از این مرحله، ۱۲۸ مقاله برای بررسی چکیده باقی ماند.

مرحله دوم: غربالگری چکیده^۲

در این مرحله چکیده ۱۲۸ مقاله مطالعه شد تا ارتباط محتوایی آن‌ها با محورهای اصلی پژوهش، شامل فناوری‌های بازیافت پنل‌های فتوولتائیک، مدیریت پسماند، سیاست‌های پایان عمر، مسئولیت تولیدکننده و اقتصاد چرخشی ارزیابی شود. مقالاتی که صرفاً از نظر واژگانی با موضوع پژوهش شباهت داشتند اما از نظر محتوایی ارتباط کافی نداشتند، حذف شدند. در پایان این مرحله، ۷۴ مقاله برای بررسی متن کامل انتخاب شد.

مرحله سوم: خوانش سریع متن کامل^۳

متن کامل ۷۴ مقاله به‌صورت اکتشافی و نسبتاً سریع بررسی شد. در این مرحله، ساختار کلی مقاله، مسئله پژوهش، چارچوب نظری، روش مطالعه، یافته‌ها و بحث بررسی شد تا میزان ارتباط واقعی مقاله با موضوع پژوهش و

^۱ Title Screening

^۲ Abstract Screening

^۳ Rapid Full-Text Reading

ارزش تحلیلی آن مشخص شود. مقالاتی که پس از بررسی متن کامل، ارتباط کافی با سؤال‌ها و اهداف پژوهش نداشتند یا اطلاعات تحلیلی قابل استفاده‌ای ارائه نمی‌کردند، کنار گذاشته شدند. پس از این مرحله، ۴۳ مقاله برای تحلیل عمیق باقی ماند.

مرحله چهارم: خوانش عمیق متن کامل^۱

در مرحله نهایی، ۴۳ مقاله با رویکرد تحلیلی و عمیق مطالعه شد. در این مرحله، اطلاعات مرتبط با مفاهیم و تعاریف کلیدی، مبانی نظری، فناوری‌های بازیافت، ترکیب و ارزش مواد قابل بازیابی، شیوه‌های مدیریت پسماند، سیاست‌های مسئولیت توسعه یافته تولیدکننده، مدل‌های اقتصاد چرخشی، یافته‌های کلیدی، نقاط توافق و اختلاف میان مطالعات و خلأهای پژوهشی استخراج و در قالب یک سنتز روایی با یکدیگر مقایسه شدند.

۳. معیارهای ورود و خروج مطالعات

معیارهای ورود شامل: (۱) ارتباط مستقیم یا معنادار با مدیریت، بازیافت یا پایان عمر پنل‌های فتوولتائیک؛ (۲) پرداختن به حداقل یکی از محورهای فناوری بازیافت، مدیریت پسماند، اقتصاد چرخشی یا سیاست‌های مرتبط؛ (۳) انتشار در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵؛ و (۴) دسترسی به عنوان و چکیده و، در مرحله نهایی، متن کامل مقاله بود. مطالعاتی که ارتباط محتوایی کافی با موضوع نداشتند، موارد تکراری، مطالعات فاقد ارزش تحلیلی برای اهداف پژوهش و منابعی که صرفاً به کاربرد انرژی خورشیدی پرداخته و موضوع پایان عمر یا مدیریت پسماند پنل‌ها را بررسی نکرده بودند، از فرایند مرور حذف شدند.

۴. استخراج، تحلیل و سنتز داده‌ها

پس از انتخاب نهایی مطالعات، اطلاعات هر مقاله به صورت ساختاریافته استخراج و در محورهای موضوعی اصلی دسته‌بندی شد. این محورها شامل فناوری‌های بازیافت و بازیابی مواد، ارزش اقتصادی مواد موجود در پنل‌ها، مدیریت پسماند در پایان عمر، سیاست‌های مسئولیت تولیدکننده، رویکردهای اقتصاد چرخشی، تجارب و الگوهای موفق بین‌المللی و الزامات بومی‌سازی در ایران بودند. سپس داده‌ها با استفاده از تحلیل مقایسه‌ای و تحلیل محتوای کیفی بررسی شدند. در این فرایند، ضمن شناسایی الگوهای مشترک و تفاوت‌های موجود میان مطالعات، نقاط قوت و محدودیت رویکردهای مختلف و خلأهای پژوهشی نیز مشخص شد.

در نهایت، یافته‌های مطالعات منتخب در قالب یک سنتز روایی تحلیلی یکپارچه شدند و بر اساس آن، مؤلفه‌های اصلی یک چارچوب پیشنهادی برای مدیریت پایدار پسماند پنل‌های خورشیدی و گذار به اقتصاد چرخشی در ایران استخراج و سازمان‌دهی شد. منطق کلی فرایند انتخاب و تحلیل مطالعات به صورت Title Screening → Abstract Screening → Rapid Full-Text Reading → Deep Full-Text Reading تعریف شد که در هر مرحله، با کاهش تدریجی تعداد مطالعات، تمرکز تحلیلی بر منابع مرتبط‌تر افزایش یافت.

یافته‌ها و بحث

در این بخش نتایج تحقیق به صورت موردی و سپس تحلیل آن‌ها ارائه شده است. چالش‌ها و مسائل مرتبط با مدیریت پسماند سلول‌های خورشیدی به شرح زیر است:

چالش‌ها و موانع مدیریت پسماند پنل‌های خورشیدی

مدیریت صحیح و پایدار پسماند پنل‌های خورشیدی با چالش‌های متعددی در ابعاد مختلف فنی، اقتصادی، نهادی و اجتماعی روبه‌رو است. این چالش‌ها در کشورهای مختلف بسته به سطح توسعه فناوری، زیرساخت، سیاست‌های قانونی و آگاهی عمومی، شدت و شکل متفاوتی دارند. در ادامه، مهم‌ترین این چالش‌ها به تفکیک بررسی می‌شوند:

^۱ Deep Full-Text Reading

چالش‌های فنی

یکی از اصلی‌ترین موانع، پیچیدگی فناوری بازیافت پنل‌های فتوولتائیک است. ساختار چندلایه این پنل‌ها و اتصال محکم مواد با روش‌هایی مانند لمینیشن حرارتی، فرآیند جداسازی اجزاء را دشوار و پرهزینه می‌کند. برای مثال، استخراج نقره و سیلیکون باکیفیت بالا از ماژول‌های قدیمی نیازمند فناوری‌هایی پیشرفته مانند روش‌های شیمیایی یا حرارتی است که هنوز در بسیاری از کشورها تجاری‌سازی نشده یا هزینه‌بر هستند (Wambach et al., 2024). همچنین، فقدان استانداردهای بین‌المللی برای طراحی پنل‌ها با قابلیت بازیافت‌پذیری بالا، موجب شده است بسیاری از تولیدکنندگان در طراحی اولیه به بازیافت‌پذیری توجه نکنند. این موضوع در آینده فرآیند بازیافت را پیچیده‌تر می‌کند.

چالش‌های اقتصادی

یکی دیگر از موانع جدی، نبود انگیزه اقتصادی کافی برای سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های بازیافت است. به دلیل پایین بودن ارزش بازار برخی از مواد بازیافتی، هزینه بازیافت اغلب بیشتر از منافع حاصل از فروش مواد ثانویه است. همچنین، نبود یارانه‌های دولتی، عدم تعریف مشوق‌ها یا نبود بازار رسمی برای مواد بازیافتی، انگیزه فعالان خصوصی را کاهش می‌دهد (Piedrahita et al., 2025). علاوه بر این، در بسیاری از کشورها هزینه حمل‌ونقل و پردازش پنل‌های فرسوده به مراکز بازیافت، توسط مصرف‌کننده یا پیمانکار پرداخت می‌شود که خود مانعی برای مشارکت داوطلبانه در فرآیند بازیافت به‌شمار می‌رود.

چالش‌های نهادی و قانونی

در بسیاری از کشورها، هنوز قوانین و مقررات جامع برای مدیریت پایان عمر پنل‌های خورشیدی تدوین نشده است. حتی در کشورهایی با چارچوب‌های قانونی، اغلب ناهماهنگی نهادی بین سازمان‌های مسئول، فقدان سامانه‌های پایش و ردیابی و نبود استانداردهای فنی یکپارچه، مانعی بر سر راه اجرای مؤثر نظام‌های جمع‌آوری، جداسازی و بازیافت پسماند PV است (Khakpour et al., 2025). نبود مکانیزم الزام‌آور برای تولیدکنندگان در مشارکت در جمع‌آوری و بازیافت مانند مدل EPR نیز موجب می‌شود بسیاری از پنل‌ها بدون نظارت رسمی از چرخه مصرف خارج شوند. از سوی دیگر، در کشورهای در حال توسعه، ضعف در نظارت محیط‌زیستی و عدم اجرای دقیق قوانین، به دفن غیرمجاز پنل‌ها یا صادرات غیرقانونی آن‌ها به کشورهای فقیرتر منجر می‌شود.

چالش‌های فرهنگی و آگاهی عمومی

در کنار چالش‌های زیرساختی و فنی، نبود آگاهی عمومی نسبت به ضرورت بازیافت پنل‌های خورشیدی نیز مانعی جدی است. بسیاری از کاربران خانگی یا حتی شرکت‌های نصب، برنامه مشخصی برای تحویل پنل‌های فرسوده ندارند. در نبود فرهنگ تفکیک و بازگشت، این پسماندها گاه به‌صورت غیرقانونی دفن یا سوزانده می‌شوند که پیامدهای محیط‌زیستی خطرناکی دارد (Babaei & Nasr Esfahani, 2024). همچنین، در برخی کشورها، اعتماد اندکی به عملکرد بازیافت رسمی وجود دارد و ترجیح داده می‌شود تجهیزات فرسوده در انبارها یا پشت‌بام‌ها رها شوند.

چالش‌های فناوری‌های نوظهور و تنوع طراحی

پیشرفت‌های سریع در فناوری‌های PV موجب تولید انواع مختلفی از پنل‌ها با ترکیبات و معماری‌های متفاوت شده است (مانند پنل‌های پرک سلولی، نازک‌لایه یا پرووسکایتی). این تنوع طراحی، فرآیند یکپارچه‌سازی روش‌های بازیافت را دشوار می‌سازد، چرا که هر نوع پنل نیازمند روش جداسازی خاص خود است. به‌علاوه، بسیاری از این فناوری‌های نوظهور هنوز فاقد داده‌های کافی درباره دوام، زیست‌پذیری و رفتار محیط‌زیستی در پایان عمر هستند. نبود این داده‌ها، پیش‌بینی چرخه زندگی و مدیریت بلندمدت آن‌ها را برای سیاست‌گذاران و متخصصان محیط‌زیست دشوار می‌کند. در نتیجه، رفع این چالش‌ها نیازمند طراحی سیاست‌های ترکیبی، سرمایه‌گذاری در پژوهش و فناوری‌های بازیافت، تقویت همکاری بین‌المللی و توسعه آموزش و فرهنگ‌سازی در همه سطوح است.

فرصت‌ها و راهکارهای پیشنهادی برای بهبود مدیریت پسماند پنل‌های خورشیدی

با وجود چالش‌های پیچیده در حوزه مدیریت پسماند فتوولتائیک، همزمان فرصت‌های قابل توجهی نیز برای بهبود وضعیت فعلی و حرکت به سوی توسعه پایدار وجود دارد. بهره‌گیری از این فرصت‌ها نیازمند رویکردهای سیستمی، ترکیبی و آینده‌نگرانه است. در این بخش، مهم‌ترین راهکارهای بهبود و فرصت‌های کلیدی به تفصیل بررسی می‌شوند:

ارتقاء مدل اقتصاد چرخشی در مدیریت پسماند PV

مفهوم اقتصاد چرخشی، جایگزین مدل خطی سنتی (تولید-مصرف-دفع) شده و بر حفظ ارزش مواد در چرخه تولید تأکید دارد. در زمینه پنل‌های خورشیدی، این مدل می‌تواند از طریق طراحی برای بازیافت، استفاده مجدد از اجزاء سالم و بازیابی ارزش افزوده از مواد، به کاهش اتلاف منابع کمک کند. نمونه‌هایی مانند طرح Circular PV Alliance در اتحادیه اروپا یا پروژه PV CYCLE، نشان داده‌اند که با طراحی چرخه‌های بسته برای تجهیزات PV می‌توان به صرفه‌جویی اقتصادی، کاهش انتشار و ایجاد اشتغال در صنایع بازیافتی دست یافت (Wambach et al., 2024).

پیاده‌سازی مدل مسئولیت توسعه یافته تولیدکننده

مدل EPR یکی از مؤثرترین ابزارهای سیاستی برای مدیریت پسماند تجهیزات الکترونیکی است. در این مدل، تولیدکننده موظف می‌شود تا پایان عمر محصول، مسئول جمع‌آوری، پردازش و بازیافت آن باشد. تجربه موفق پیاده‌سازی EPR در کشورهای اروپایی مانند آلمان و فرانسه، نشان می‌دهد که الزام قانونی به تولیدکننده موجب افزایش کیفیت طراحی (برای بازیافت پذیری) و همچنین توسعه زیرساخت‌های جمع‌آوری و بازیافت می‌شود (Khakpour et al., 2025). اجرای این مدل در کشورهای دیگر، مستلزم تصویب قوانین مشخص، ایجاد بانک اطلاعاتی جامع و هماهنگی میان نهادهای مرتبط است.

یکی از راهکارهای کلیدی برای غلبه بر چالش‌های فنی، سرمایه‌گذاری در توسعه فناوری‌های بومی و متناسب با انواع پنل‌های موجود در هر کشور است. استفاده از روش‌های مکانیکی (خردایش و جداسازی)، حرارتی (پیرولیز، ذوب) و شیمیایی (لیچینگ، شست‌وشو با اسید) باید بهینه شده و متناسب با نیاز و ظرفیت کشورها طراحی شود (Piedrahita et al., 2025). همچنین، بهره‌گیری از نانوفناوری و هوش مصنوعی در جداسازی هوشمند اجزاء یا پایش خودکار کیفیت مواد بازیافتی، می‌تواند به کارآمدی فرآیند بازیافت کمک کند.

ایجاد مشوق‌های اقتصادی و بازار ثانویه مواد

برای افزایش مشارکت بخش خصوصی و مصرف‌کنندگان، لازم است بسته‌های تشویقی اقتصادی طراحی شوند؛ از جمله یارانه برای فناوری‌های بازیافت، معافیت مالیاتی برای سرمایه‌گذاری در مراکز بازیافت، یا پرداخت‌های بازگشت مالی^۱ برای مصرف‌کنندگانی که پنل‌های مستعمل را تحویل مراکز مجاز می‌دهند. همچنین، ایجاد بازار رسمی برای مواد بازیافتی، قیمت‌گذاری شفاف، و اتصال زنجیره‌های تأمین بازیافتی می‌تواند به ارتقای اقتصادی این حوزه کمک کند (Babaei & Nasr Esfahani, 2024).

ارتقاء طراحی اولیه پنل‌ها برای بازیافت پذیری

یکی از راهکارهای کلیدی در سطح تولید، اصلاح طراحی اولیه پنل‌ها با در نظر گرفتن اصول بازیافت پذیری است. این شامل استفاده از اتصالات بازشدنی، اجتناب از ترکیب مواد ناسازگار، استفاده از مواد زیست‌تخریب پذیر یا استانداردسازی ساختار ماژول‌ها می‌شود. تولیدکنندگانی که این رویکرد را در طراحی لحاظ می‌کنند، در آینده مزیت رقابتی بالاتری در بازارهای پایدار خواهند داشت.

^۱ Refund Systems

توسعه نظام‌های نظارت، پایش و ردیابی

ایجاد پایگاه‌های داده ملی و منطقه‌ای برای ردیابی پنل‌ها از مرحله نصب تا پایان عمر، موجب افزایش شفافیت، مدیریت بهتر منابع و امکان سیاست‌گذاری دقیق‌تر خواهد شد. استفاده از بارکد، QR یا سامانه‌های دیجیتال برای رهگیری تجهیزات، از جمله اقدامات مؤثر در این راستا است.

همکاری بین‌المللی و انتقال دانش

باتوجه به ماهیت جهانی زنجیره تأمین تجهیزات PV، همکاری‌های بین‌المللی در انتقال فناوری، تدوین استانداردهای جهانی، و توسعه کنسرسیوم‌های مشترک (مانند IEA-PVPS یا Solar Waste Partnership) می‌تواند از تکرار تجربیات شکست‌خورده جلوگیری کرده و بهره‌وری جهانی را افزایش دهد.

آموزش و فرهنگ‌سازی

توسعه آگاهی عمومی در مورد مزایای بازیافت، مخاطرات دفن غیرمجاز و نحوه صحیح تحویل تجهیزات، نقش مهمی در ارتقای مشارکت داوطلبانه مردم دارد. این امر می‌تواند از طریق رسانه‌ها، آموزش‌های رسمی، برنامه‌های مدارس و کمپین‌های عمومی تحقق یابد.

مدل پیشنهادی برای مدیریت پسماند PV در ایران

تحلیل وضعیت موجود در ایران

در سال‌های اخیر، ایران با سیاست‌های گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه نیروگاه‌های خورشیدی کوچک‌مقیاس و خانگی، رشد چشم‌گیری در ظرفیت نصب‌شده فتوولتائیک تجربه کرده‌است. طبق گزارش شرکت مادر تخصصی توانیر، تا پایان سال ۱۴۰۲ بیش از ۵۰۰ مگاوات ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی در کشور نصب شده که بخش قابل‌توجهی از آن‌ها در قالب نیروگاه‌های پشت‌بامی خانگی بودند (Tavanir, 2023). این روند، هرچند امیدبخش است، اما منجر به شکل‌گیری نسل جدیدی از پسماندها خواهد شد که مدیریت آن‌ها تاکنون در کشور مورد توجه سیاست‌گذاران قرار نگرفته‌است.

در حال حاضر، نه تنها قانونی برای مدیریت پایان عمر تجهیزات فتوولتائیک در ایران وجود ندارد، بلکه هیچ نهادی نیز به‌طور مستقیم مسئول نظارت بر جمع‌آوری، پایش یا بازیافت این پسماندها نیست. این خلأ نهادی موجب شده بسیاری از پنل‌های معیوب یا مستعمل، در انبارها، حیاط‌ها یا طبیعت رها شوند. بر اساس پژوهش بابایی و نصر اصفهانی (۲۰۲۴)، اغلب شرکت‌های نصاب و مصرف‌کنندگان خانگی در ایران، از الزامات محیط‌زیستی مربوط به دفع پنل‌های فرسوده آگاه نیستند و بیشتر پنل‌های معیوب بدون هیچ مسیر بازیافتی به حاشیه رانده می‌شوند.

از منظر حقوقی نیز، برخلاف اتحادیه اروپا که ضوابط سخت‌گیرانه‌ای همچون دستورالعمل WEEE را برای مدیریت تجهیزات الکترونیکی و فتوولتائیک تدوین کرده است، در ایران تاکنون هیچ متن قانونی الزام‌آوری برای اعمال مسئولیت تولیدکننده (EPR) یا فرآیند رسمی بازیافت تدوین نشده‌است (Khakpour et al., 2025). به‌همین دلیل، نه شرکت‌های تولیدکننده داخلی و نه واردکنندگان ماژول‌های خارجی، خود را موظف به جمع‌آوری یا بازیافت پنل‌های پایان عمر نمی‌دانند.

در نهایت، فقدان سامانه ملی ردیابی تجهیزات PV و نبود آمار رسمی از میزان تولید پسماند، مانعی مهم برای برنامه‌ریزی کلان محسوب می‌شود. این وضعیت، ایران را در معرض شکل‌گیری بحران پنهانی از پسماندهای خورشیدی قرار می‌دهد که در آینده‌ای نه‌چندان دور، پیامدهای اقتصادی، بهداشتی و محیط‌زیستی جدی خواهدداشت.

چارچوب نهادی و سیاستی پیشنهادی

یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای توسعه نظام مدیریت پسماند فتوولتائیک در ایران، ایجاد چارچوب نهادی یکپارچه و تدوین قوانین الزام‌آور برای بازیافت و مسئولیت‌پذیری تولیدکنندگان و واردکنندگان است. تجربه کشورهای موفق نشان

داده که بدون حمایت نهادی قوی و سازوکارهای نظارتی کارآمد، هیچ سیاستی در زمینه بازیافت پسماندهای خورشیدی به مرحله اجرا نمی‌رسد.

در ایران، مدیریت پسماندهای خاص به صورت پراکنده در حیطه مسئولیت دستگاه‌هایی مانند سازمان حفاظت محیط‌زیست، شهرداری‌ها، گمرک، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر (ساتبا) و وزارت صنعت قرار دارد، اما هیچ نهاد هماهنگ‌کننده‌ای برای مدیریت یکپارچه پسماندهای فتوولتائیک وجود ندارد (Mohebbi, 2026). در این راستا، پیشنهاد می‌شود نهاد ملی بازیافت تجهیزات انرژی تجدیدپذیر با ساختاری مستقل یا وابسته به سازمان محیط‌زیست تأسیس گردد. این نهاد وظیفه خواهد داشت تا سیاست‌گذاری، پایش و نظارت بر فرآیند جمع‌آوری، تفکیک و بازیافت پنل‌ها را به صورت شفاف و متمرکز انجام دهد.

از منظر سیاستی، ضروری است اصل مسئولیت توسعه‌یافته تولیدکننده به عنوان رکن اصلی قانون‌گذاری این حوزه در کشور تصویب شود. در قالب این مدل، کلیه واردکنندگان، تولیدکنندگان داخلی و توزیع‌کنندگان پنل‌های PV موظف می‌شوند هزینه جمع‌آوری، بازیافت و ردیابی تجهیزات پایان عمر را از پیش پرداخت کرده یا در یک سامانه مشارکت مالی داشته باشند (Khakpour et al., 2025). این مدل در کشورهای اروپایی با موفقیت اجرا شده و موجب رشد صنعت بازیافت، کاهش دفن غیرمجاز، و ایجاد زنجیره ارزش ثانویه شده است (Chowdhury et al., 2022). همچنین، لازم است آیین‌نامه‌هایی جامع و کاربردی توسط نهاد ملی جدید تدوین گردد که شامل موارد زیر باشد:

ثبت اطلاعات همه تجهیزات وارداتی و داخلی در سامانه ردیابی دیجیتال، تعیین عمر مفید، زمان تحویل، و محل تحویل پنل‌های مستعمل، الزام به برچسب‌گذاری محیط‌زیستی روی پنل‌ها با QR Code برای ردیابی، ممنوعیت دفن بدون مجوز یا صادرات غیررسمی تجهیزات فرسوده و تشویق به تولید پنل‌های قابل بازیافت با ارائه تسهیلات یا معافیت مالیاتی در نهایت، موفقیت چارچوب نهادی پیشنهادی در گرو همکاری منسجم بین بخش عمومی، بخش خصوصی، نهادهای محلی و نهادهای دانشگاهی خواهد بود. این چارچوب باید به گونه‌ای طراحی شود که علاوه بر رعایت اصول محیط‌زیستی، مشوقی برای توسعه فناوری‌های داخلی و اشتغال‌زایی در حوزه بازیافت نیز باشد.

مدل فنی و اقتصادی بازیافت پیشنهادی

باتوجه به شرایط خاص ایران، از جمله سطح فناوری، ظرفیت صنعتی، محدودیت‌های مالی و نیازهای محیط‌زیستی، طراحی یک الگوی بومی بازیافت پنل‌های خورشیدی ضروری است. الگویی که هم قابلیت اجرایی داشته باشد و هم از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشد. در این بخش، مدل پیشنهادی بازیافت براساس ترکیب فناوری‌های مختلف، ساختار منطقه‌ای و زنجیره ارزش اقتصادی ارائه می‌شود.

انتخاب فناوری‌های متناسب با ظرفیت داخلی

با بررسی تجربیات جهانی، سه فناوری اصلی در بازیافت ماژول‌های PV شناسایی شدند:

- فرآیندهای مکانیکی: شامل خردایش، جداسازی فیزیکی اجزاء (شیشه، فریم آلومینیومی، جعبه اتصال) با هزینه نسبتاً پایین و سازگار با ظرفیت صنعتی موجود در ایران.
- فرآیندهای حرارتی^۱: برای حذف لایه‌های پلیمری و جداسازی سلول‌های سیلیکونی، نیازمند کوره‌های کنترل شده است.
- فرآیندهای شیمیایی^۲: به منظور استخراج فلزاتی مانند نقره، مس و سرب. این روش دقت بالا دارد اما نیازمند مدیریت پسماند خطرناک و کنترل آلاینده‌گی است (Sánchez et al., 2024; Chowdhury et al., 2026).

ترکیب این سه روش به صورت مرحله‌ای، می‌تواند یک راه‌حل بهینه برای ایران باشد. به‌ویژه اگر اولویت با بازیابی سیلیکون و شیشه با خلوص بالا باشد.

^۱ Thermal/Pyrolysis

^۲ Chemical/Leaching

طراحی مراکز منطقه‌ای بازیافت

پیشنهاد می‌شود مراکز بازیافت با اولویت در استان‌هایی تأسیس شوند که بیشترین ظرفیت نصب پنل‌های خورشیدی را دارند، مانند:

۱. کرمان و یزد (به دلیل پتانسیل تابش بالا)
 ۲. تهران و البرز (به خاطر تمرکز شرکت‌های تولید و نصب)
 ۳. فارس و خراسان جنوبی (دارای پروژه‌های مقیاس بزرگ)
- هر مرکز می‌تواند بر اساس مدل PPP مشارکت دولتی-خصوصی با سرمایه‌گذاری مشترک بین دولت، شرکت‌های بازیافت و بخش خصوصی اجرا شود. تجهیزات پایه‌ای شامل خطوط خردایش، جداساز مغناطیسی، سیستم‌های حرارتی و واحد استخراج شیمیایی خواهد بود.

تحلیل اقتصادی زنجیره ارزش بازیافت

از منظر اقتصادی، اجزای پنل‌های خورشیدی ارزش بالقوه‌ای دارند:

- شیشه (بیش از ۷۰ درصد وزن ماژول): قابل بازیابی با کیفیت بالا
 - آلومینیوم فریم: ارزش افزوده صنعتی و بازیافت آسان
 - نقره و مس: قیمت بالا و تقاضای زیاد در بازار
 - سیلیکون: اگر خالص بازیابی شود، در صنایع نیمه‌هادی قابل استفاده است (Heath et al., 2020).
- براساس گزارش IRENA & ITU (2023)، هر تن پنل خورشیدی ممکن است تا ۲۵۰ دلار ارزش بازیافتی بالقوه داشته باشد، در صورتی که فرآیند بازیافت بهینه و تجاری باشد. با تعریف نظام حمایتی (یارانه، معافیت گمرکی تجهیزات بازیافت، خرید تضمینی مواد بازیافتی)، این زنجیره می‌تواند برای ایران سودآور باشد و حتی اشتغال محلی ایجاد کند.
- نقش ذی‌نفعان، مشارکت مردمی و فرهنگ‌سازی
- یکی از عناصر کلیدی موفقیت در مدیریت پایدار پسماند پنل‌های خورشیدی، مشارکت فعال همه ذی‌نفعان از مرحله تولید تا پایان عمر ماژول‌ها است (Suffian, 2026). بدون درگیرسازی مؤثر تولیدکنندگان، نهادهای دولتی، شهرداری‌ها، شرکت‌های نصب، مراکز بازیافت و مهم‌تر از همه، شهروندان، هیچ سیاستی در حوزه بازیافت PV به نتیجه نخواهد رسید.

نقش دولت‌ها و سیاست‌گذاران

دولت، به عنوان تنظیم‌گر اصلی، وظیفه دارد با وضع قوانین الزام‌آور نظیر مدل مسئولیت تولیدکننده، تولیدکنندگان و واردکنندگان را ملزم به جمع‌آوری و بازیافت محصولات خود پس از پایان عمر کند. همچنین، طراحی نظام مشوق‌ها (مانند معافیت مالیاتی برای شرکت‌های بازیافتی، یارانه برای مصرف‌کنندگان پنل‌های قابل بازیافت، یا تسهیلات خرید تجهیزات) از ابزارهای مهم برای ارتقای مشارکت بازار است (Khakpour et al., 2025).

نقش شهرداری‌ها و نهادهای محلی

شهرداری‌ها به دلیل نزدیکی به مردم، می‌توانند در خط مقدم جمع‌آوری و سامان‌دهی پنل‌های خورشیدی فرسوده عمل کنند (Ramezani et al., 2025). ایجاد ایستگاه‌های تحویل پنل فرسوده در نواحی شهری، همکاری با شرکت‌های نصب برای شناسایی مصرف‌کنندگان قدیمی، و اتصال به سامانه‌های پایش ملی، از جمله نقش‌های شهرداری در این سیستم خواهد بود.

نقش شرکت‌های خصوصی و استارت‌آپ‌ها

بخش خصوصی می‌تواند از طریق نوآوری در فناوری‌های بازیافت، طراحی مجدد مازول‌های قابل جداسازی و ایجاد پلتفرم‌های دیجیتال برای ردیابی پنل‌ها، سهم چشم‌گیری در توسعه این صنعت ایفا کند. استارت‌آپ‌هایی که با هوش مصنوعی، بلاک‌چین یا اپلیکیشن‌های ردیابی تجهیزات کار می‌کنند، می‌توانند پل ارتباطی میان مصرف‌کننده و مراکز بازیافت باشند (Sánchez et al., 2024; Jiang & Bateer, 2025).

نقش نهادهای آموزشی، رسانه‌ها و سازمان‌های مردم‌نهاد

یکی از مهم‌ترین خلأهای موجود، ضعف آگاهی عمومی درباره خطرات محیط‌زیستی پسماند پنل‌ها و اهمیت بازیافت آن‌هاست. تدوین محتوای آموزشی برای مدارس، برگزاری کارگاه در جوامع محلی، تولید برنامه‌های تلویزیونی و رسانه‌ای، و استفاده از شبکه‌های اجتماعی، همگی ابزارهایی برای ارتقای فرهنگ عمومی در این زمینه هستند (Prasad et al., 2025; Babaei & Nasr Esfahani, 2024). همچنین، همکاری با سمن‌های محیط‌زیستی می‌تواند منجر به مطالبه‌گری مردمی در جهت تدوین سیاست‌های مسئولانه‌تر شود.

نقش شهروندان و مصرف‌کنندگان نهایی

در نهایت، رفتار مصرف‌کنندگان نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت سیستم بازیافت دارد. آموزش نحوه تفکیک پنل فرسوده، ثبت در سامانه آنلاین بازیافت و تحویل به مراکز مجاز باید به‌عنوان مسئولیت اجتماعی هر کاربر شناخته‌شود. ارائه مشوق‌هایی مانند تخفیف در نصب پنل جدید یا دریافت گواهی «مصرف‌کننده سبز» می‌تواند مشارکت داوطلبانه را افزایش دهد (Chowdhury et al., 2022; IRENA & ITU, 2023; Babaei & Nasr Esfahani, 2024).

نتیجه‌گیری

رشد سریع نصب سیستم‌های فتوولتائیک در دهه‌های اخیر، به‌ویژه در راستای سیاست‌های جهانی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و عبور از سوخت‌های فسیلی، موجب افزایش حجم قابل‌توجهی از پنل‌های خورشیدی در مدار مصرف شده‌است. با رسیدن این پنل‌ها به پایان عمر مفید خود (معمولاً در بازه ۲۵ تا ۳۰ سال)، مدیریت اصولی پسماند حاصل از آن‌ها به‌عنوان یک چالش پیچیده و چندبعدی مطرح شده‌است. پسماند پنل‌های PV شامل مواد باارزش مانند نقره، سیلیکون، آلومینیوم و شیشه و در عین حال مواد خطرناک مانند سرب یا کادمیوم است که در صورت رهاسازی یا دفع نادرست می‌تواند منجر به آلودگی‌های جدی آب، خاک و سلامت انسان شود.

این مقاله با مروری جامع بر ادبیات علمی و تجربیات جهانی، نشان داد که چالش‌های موجود در مدیریت پسماند PV را می‌توان در پنج دسته عمده خلاصه کرد: چالش‌های فنی (مانند تنوع فناوری پنل‌ها و دشواری جداسازی اجزا)، اقتصادی (هزینه‌بر بودن بازیافت نسبت به ارزش مواد بازیافتی)، نهادی و قانونی (فقدان مقررات الزام‌آور و ناهماهنگی بین‌نهادی)، فرهنگی و آگاهی عمومی (نبود فرهنگ بازگردانی و تحویل پنل‌های فرسوده) و در نهایت، تنوع فناوری‌های نوظهور که آینده بازیافت را پیچیده‌تر کردند. همچنین تحلیل‌های انجام‌شده حاکی از آن است که فرصت‌هایی همچون توسعه فناوری‌های بازیافت سبز، بازطراحی پنل‌ها بر مبنای بازیافت‌پذیری، تقویت نظام EPR، ایجاد پایگاه داده ملی و مشارکت فعال بخش خصوصی می‌تواند مسیر گذار به اقتصاد چرخشی در صنعت خورشیدی را هموار سازد.

در این میان، وضعیت ایران نیز مورد توجه قرار گرفت. اگرچه کشور ما در سال‌های اخیر گام‌هایی برای توسعه انرژی خورشیدی برداشته‌است، اما هنوز فاقد سیاست‌های رسمی برای مدیریت پایان عمر این پنل‌ها است. نبود سامانه‌های جمع‌آوری، دفن غیرمجاز و بی‌اطلاعی مصرف‌کنندگان از اهمیت تحویل پنل‌های فرسوده، مهم‌ترین چالش‌های جاری در کشور هستند. از سوی دیگر، ظرفیت بالقوه خوبی برای توسعه زیرساخت‌های بازیافت، تشکیل نهاد هماهنگ‌کننده،

استفاده از روش‌های بومی‌شده بازیافت (مکانیکی، حرارتی و شیمیایی) و راه‌اندازی کمپین‌های آگاه‌سازی مردمی وجود دارد که در صورت طراحی مدل ملی یکپارچه، می‌تواند به شکل‌گیری صنعت بازیافت پنل‌های خورشیدی منجر شود. نتیجه‌گیری کلیدی مقاله آن است که مدیریت پسماند پنل‌های فتوولتائیک، نه یک چالش صرفاً محیط‌زیستی، بلکه یک مسئله راهبردی برای توسعه پایدار است که در آن سیاست‌گذاری هوشمند، نوآوری فناورانه، همکاری بین‌نهادی، مشارکت مردمی و فرهنگ‌سازی نقش محوری دارند. اگر کشورهایی مانند ایران بتوانند در زمان مناسب نسبت به این مسئله واکنش نشان دهند و مدل‌های جهانی را به‌درستی بومی‌سازی کنند، نه تنها از تهدیدات محیط‌زیستی آینده جلوگیری خواهند کرد، بلکه فرصت‌های نوینی در حوزه اقتصاد سبز، اشتغال و بهره‌وری منابع برای‌شان فراهم خواهند شد.

References

- Askari Shayegan, M., et al. (2024). Solar Photovoltaics Value Chain and End-of-Life Management Practices: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 16(16), 7038. <https://doi.org/10.3390/su16167038>
- Babaei, A., & Nasr Esfahani, A. (2024). A review of photovoltaic waste management from a sustainable perspective. *Electricity*, 5(4), Article 36. <https://doi.org/10.3390/electricity5040036>
- Billewar, S. R., Londhe, G., & Mane, P. S. (2023). World energy demand. *Integrated Green Energy Solutions Volume 2*, 275-316. <https://doi.org/10.1002/9781394193738.ch36>
- Celep, O., Devenci, H., & Yazici, E. Y. (2025). A comprehensive review on recycling end-of-life solar photovoltaic panels. *Waste Management*, 206, 115092. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115092>
- Chowdhury, H., Chang, N. L., Song, S., Xie, Z., Zuo, J., & Shen, Y. (2026). Life cycle assessment and techno-economic analysis of a laser-based end-of-life solar panel recycling process. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 302, 114358. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2026.114358>
- Chowdhury, M. S., Sumita, U., Islam, A., & Bedja, I. (2022). Sustainable solutions for end-of-life photovoltaic waste: A global review of policies, practices and progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112322>
- Das, H. J., & Sarmah, N. (2025). Photovoltaic module recycling: A review on material recovery methods and waste management approach. *Solar Energy*, 286, 113708. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113708>
- Gerold, E., & Antrekowitsch, H. (2024). Advancements and Challenges in Photovoltaic Cell Recycling: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 16(6), 2542. <https://doi.org/10.3390/su16062542>
- Heath, G. A., Silverman, T. J., Kempe, M., et al. (2020). Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy. *Nature Energy*, 5, 502–510. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0645-2>
- International Energy Agency (IEA). (2024). *World Energy Outlook 2024*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- International Energy Agency. (2023). *Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028*.
- International Renewable Energy Agency, & International Telecommunication Union. (2023). *End-of-life management of solar photovoltaic panels: Circular economy perspectives*.
- Jiang, X., & Bateer, B. (2025). A systematic review of plastic recycling: technology, environmental impact and economic evaluation. *Waste Management & Research*, 43(8), 1159-1178. <https://doi.org/10.1177/0734242X241310658>
- Khakpour, S., Akbari, M., & Ferrara, C. (2025). The solar waste challenge: Estimating and managing end-of-life photovoltaic panels in Italy. *Energies*, 18(9), 2219. <https://doi.org/10.3390/en18092219>
- Mohebbi, H. (2026). Comprehensive Assessment of Solar Cell Technology Localization in Iran: Challenges and Development Strategies. *Advances in Sustainable Energies and Environment*, 1(02), 33-45. <https://doi.org/10.22034/a-see.2026.2075408.1017>
- Piedrahita, D., Cárdenas, J., & Zapata, M. (2025). Solar panel waste management: Challenges, opportunities, and the path to a circular economy. *Energies*, 18(1), 123. <https://doi.org/10.3390/en18010123>

Ramezani, N., Tamošaitienė, J., Sarvari, H., & Golestanizadeh, M. (2025). Determining essential indicators for feasibility assessment of using initiative green building methods in revitalization of worn-out urban fabrics. *Sustainability*, 17(8), 3389. <https://doi.org/10.3390/su17083389>

Prasad, R. D., Chand, D. A., Lata, S. S., & Kumar, R. S. (2025). Beyond energy access: how renewable energy fosters resilience in island communities. *Resources*, 14(2), 20. <https://doi.org/10.3390/resources14020020>

Sánchez, A., Müller, T., & Kim, J. (2024). From waste to resource: Exploring the current challenges and recovery techniques in PV module recycling. *Journal of Cleaner Production*, 435, 140022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140022>

Sandanayake, M., Li, L., Zhao, J., & Joseph, P. (2022). Applications of solar panel waste in pavement construction—an overview. *Sustainability*, 14(22), 14823. <https://doi.org/10.3390/su142214823>

Suffian, H. M. (2026). Stakeholder management in project management: a context-sensitive framework for solar energy projects (Doctoral dissertation, Vilniaus universitetas.).

Tavanir. (2023). Gozaresh-e tose'e-ye nirugah-haye khorshidi-ye khanegi dar Iran [Report on the development of residential solar power plants in Iran]. Tavanir Holding Company.

Tripathi, A. K., Aruna, M., Thandlam, A. K., Sharma, S., Jhalani, A., & Kumar, R. (2026). Recovery strategies for EoL solar panels: sustainable and circular economy practices. *Green Materials*, 14(2), 165-174. <https://doi.org/10.1680/jgrma.24.00153>

Wambach, K., Libby, H., & Shaw, R. (2024). Advances in photovoltaic module recycling: Literature review and update to LCI data (IEA-PVPS Task 12 Report). IEA Photovoltaic Power Systems Programme.

Wei, G., Zhou, Y., Hou, Z., Li, Y., Liu, Q., Chen, J., & He, D. (2025). Review of c-Si PV module recycling and industrial feasibility. *EES Solar*, 1, 9–29. <https://doi.org/10.1039/D4EL00017J>