



بهبود راندمان اقتصادی و زیست محیطی بازیافت پنل های فتوولتائیک با استفاده از ترکیب هزینه یابی جریان مواد

مهرداد رنجبرنژاد آذری¹، مهدی یوسفی نژاد عطاری^{2*}، حسین غصنفری³

1 و 3- گروه مهندسی صنایع، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

2- گروه مهندسی صنایع، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران (نویسنده مسئول)

*E-Mail: 1689597631@iau.ir

چکیده

رشد سریع فناوری های انرژی تجدیدپذیر، به ویژه سیستم های فتوولتائیک، مدیریت پایان عمر این تجهیزات را به چالشی مهم در حوزه محیط زیست و اقتصاد تبدیل کرده است. اگرچه بازیافت پنل های خورشیدی در مرحله پایان عمر آنها منبعی ارزشمند از مواد قابل بازیافت به شمار می رود، اما فرآیندهای بازیافت موجود غالباً از کارایی پایینی برخوردارند و منجر به اتلاف قابل توجهی در انرژی، مواد و هزینه ها می شوند. این پژوهش، از روش هزینه یابی جریان مواد به عنوان ابزاری تحلیلی مؤثر برای بررسی فرآیند بازیافت پنل های فتوولتائیک استفاده می کند روش هزینه یابی جریان مواد با شفاف سازی هزینه ها و بهینه سازی سیستم، جریان های مواد با ارزش و بی ارزش را شناسایی کرده و به ارتقای عملکرد کمک می نماید. هم چنین، با تلفیق مفهوم زنجیره تأمین حلقه بسته چارچوبی ارائه می شود، که در آن بازیافت به جزء جدایی ناپذیری از کل زنجیره تأمین تبدیل می گردد. هدف اصلی این پژوهش، توسعه رویکردی جامع برای بهبود عملکرد اقتصادی و زیست محیطی بازیافت پنل های فتوولتائیک از طریق کاربرد تلفیقی روش های روش هزینه یابی جریان مواد و زنجیره تأمین حلقه بسته است. مدل پیشنهادی زنجیره تأمین حلقه بسته نشان می دهد که ایجاد مراکز جمع آوری محلی و اعمال مشوق های اقتصادی می تواند بهره وری بازیافت را افزایش دهد. در این مطالعه توجه به شرایط اقلیمی و محیطی از جمله مهمترین محدودیت های تحقیق به شمار می رود. سه مرکز کمی تعریف شده، دمونتاژ، عملیات حرارتی و شیمیایی و استفاده مجدد صنعتی به ترتیب 30٪، 28٪، 25.2٪ تلفات را در هزینه یابی بازیافت پنل های فتوولتائیک نشان می دهند.

کلیدواژه ها: فتوولتائیک، هزینه یابی جریان مواد، زنجیره تأمین حلقه بسته، بازیافت، ارزیابی چرخه عمر

Improving the economic and environmental efficiency of photovoltaic panel recycling using material flow costing

Mehrdad Ranjbar Nejad Azari¹, Mahdi Yousefi Nejad Attari^{2*}, Hossein Ghazanfari³

1,3-Department of Industrial Engineering, Ro.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran

2- Department of Industrial Engineering, Bon.C., Islamic Azad University, Bonab, Iran

*E-Mail: 1689597631@iau.ir

Received: 30 October 2025 Accepted: 28 June 2026

Abstract

The rapid growth of renewable energy technologies, especially photovoltaic systems, has made end-of-life management of this equipment a major environmental and economic challenge. Although recycling solar panels at the end of their life is a valuable source of recyclable materials, existing recycling processes are often inefficient and result in significant waste of energy, materials, and costs. This study uses material flow costing as an effective analytical tool to examine the recycling process of photovoltaic panels. By making costs transparent and optimizing the system, material flow costing identifies valuable and worthless material flows and helps improve performance. Also, by incorporating the concept of a closed-loop supply chain, a framework is presented in which recycling becomes an integral part of the entire supply chain. The main objective of this research is to develop a comprehensive approach to improve the economic and environmental

performance of photovoltaic panel recycling through the combined application of material flow costing and closed-loop supply chain methods. The proposed closed-loop supply chain model shows that the establishment of local collection centers and the application of economic incentives can increase the efficiency of recycling. In this study, attention to climatic and environmental conditions is considered to be one of the most important limitations of the research. The three quantitatively defined centers, disassembly, thermal and chemical treatment, and industrial reuse, show 30%, 28%, and 25.2% losses in the costing of photovoltaic panel recycling, respectively.

Keywords: Photovoltaics, material flow cost accounting, closed-loop supply chain, recycling, life cycle assessment

1- مقدمه

رشد سریع جمعیت جهانی، توسعه صنعتی و افزایش مصرف انرژی، چالش‌های جدی در تأمین منابع پایدار انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ایجاد کرده است. در میان راه‌حل‌های موجود، انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی خورشیدی به عنوان یکی از مؤثرترین پاسخ‌ها به این نیازها ظاهر شده‌اند. سیستم‌های فتوولتائیک، به دلیل ظرفیت بالای تبدیل انرژی خورشیدی به برق و مقیاس‌پذیری آن‌ها، با سرعتی فزاینده در حال گسترش هستند. با این حال، هم‌زمان با رشد نمایی بازار پنل‌های خورشیدی، نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با مدیریت مرحله پایان عمر این پنل‌ها نیز اهمیت فزاینده‌ای یافته‌اند، بازیافت پنل‌های فتوولتائیک که به پایان عمر خود رسیده‌اند. به عنوان یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی و اقتصادی در جهان شناخته می‌شود [1].

پنل خورشیدی به یک ماژول فتوولتائیک گفته می‌شود یا یک پنل آب گرم خورشیدی، یا به یک مجموعه از ماژول‌های فتوولتائیک خورشیدی که به لحاظ الکتریکی، روی یک ساختار تکیه گاهی مونتاژ شده‌اند. یک مدل فتوولتائیک، مجموعه‌ای از سلول‌های خورشیدی است که به هم متصل شده‌اند. پنل‌های خورشیدی را می‌توان به عنوان مؤلفه‌ای از یک سامانه فتوولتائیک بزرگ‌تر، برای تولید و ذخیره الکتریسیته در کاربردهای تجاری و مسکونی، استفاده کرد. هر ماژول با یک توان خروجی، درجه‌بندی شده است که تحت شرایط تست استاندارد عمل می‌کنند و نوعاً از ۳۲۰ - ۱۰۰ وات دامنه و تنوع دارند. راندمان یک ماژول، مساحت ماژول (با خروجی مشابه درجه بندی شده) را تعیین می‌کند - ماژولی ۲۳۰ وات با راندمان ۸٪ دارای دو برابر مساحت یک ماژول ۲۳۰ وات با راندمان ۱۶ درصد است - تعداد اندکی از پنل‌های خورشیدی وجود دارند که راندمانشان / بازده‌شان بیش‌تر از ۱۹ درصد باشد. یک ماژول خورشیدی منفرد می‌تواند تنها به میزان محدودی توان تولید کند، اکثر تأسیسات حاوی ماژول‌های چندگانه هستند. یک سامانه فتوولتائیک نوعاً شامل یک پنل یا آرایه‌ای از ماژول‌های خورشیدی، یک مبدل و سیم پیچی درونی است.

دستیابی به توسعه پایدار در بخش انرژی، نیازمند هم‌زمانی استفاده از منابع تجدیدپذیر و مدیریت مسئولانه پسماند حاصل از این منابع است. بازیافت مؤثر پنل‌های خورشیدی نه تنها باعث حفظ منابع طبیعی و انرژی می‌شود، بلکه آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از دفع ناصحیح این تجهیزات را نیز کاهش می‌دهد و به گسترش اقتصاد چرخشی کمک می‌کند. بنابراین، این مطالعه به یک نیاز حیاتی و به‌موقع در حوزه انرژی‌های نو پاسخ می‌دهد. هدف اصلی این تحقیق تحلیل فرآیندهای بازیافت پنل‌های فتوولتائیک پایان عمر و طراحی یک مدل بهینه‌شده از زنجیره تأمین حلقه بسته است. هم‌چنین می‌توان به شناسایی

فرآیندهای موجود بازیافت، بررسی چالش‌ها و موانع اجرای این فرآیندها، ارزیابی کارایی اقتصادی و زیست‌محیطی با استفاده از روش هزینه‌یابی جریان مواد و ارزیابی چرخه عمر^۱ ارائه چارچوب مفهومی زنجیره تأمین حلقه بسته، تحلیل نقش سیاست‌های حمایتی دولت‌ها و بررسی فناوری‌های نوین مؤثر بر بهبود قابلیت بازیافت به عنوان سایر اهداف تحقیق پیش‌رو اشاره نمود.

مقالات متعددی در زمینه زنجیره تأمین حلقه بسته با رویکرد بازیافت مورد توجه قرار گرفته است. که می‌توان به زنجیره تأمین حلقه بسته دارویی [2]، شناسایی و ارزیابی راهبردهای مرتبط با کاهش هدر رفت گروه میوه و سبزیجات [3] و ارائه مدل پویای سیستم تأمین انرژی الکتریکی ایران مبتنی بر پیوند آب-غذا-انرژی -تغییر اقلیم [4] اشاره نمود.

این تحقیق از نوع تحقیقات کاربردی، با رویکرد توصیفی - تحلیلی است. داده‌های استفاده شده در این تحقیق با مرور منابع علمی و تحلیل اسناد مرتبط حاصل شده است. که می‌توان به نمونه مورد مطالعه پروژه‌های جهانی مرتبط با بازیافت پنل‌های فتوولتائیک در این خصوص اشاره نمود. تحلیل محتوای کیفی، مدل‌سازی مفهومی، هزینه‌یابی جریان مواد و ارزیابی چرخه عمر، ابزار استفاده شده جهت تحلیل و بررسی با روش تحلیل تطبیقی و مدل‌سازی ساختاری است. در ادامه این مقاله در بخش بعدی مرور مقالات قبلی در خصوص بازیافت پنل‌های فتوولتائیک ارائه شده است. در بخش سوم به روش‌شناسی تحقیق پرداخته شده است. در قسمت چهارم به تجزیه و تحلیل مدل و نهایتاً به ارائه نتایج پرداخته شده است.

2- مرور ادبیات

بازیافت پنل‌های فتوولتائیک از حدود سال ۲۰۰۹ آغاز شد، خصوصاً در کشورهایی مانند هند و کشورهای جنوب آسیا که در آن‌ها برای نخستین بار به مسائل لجستیک معکوس و چالش‌های زنجیره تأمین پرداخته شد [5]. در اوایل دهه ۲۰۱۰، تمرکز پژوهشگران در ایالات متحده و اروپا به تحلیل چرخه عمر فناوری‌های فتوولتائیک، انتشار گازهای گلخانه‌ای، و مزایا و معایب زیست‌محیطی انرژی خورشیدی معطوف شد [1، 6]. در همین زمان، چین با رشد سریع نصب پنل‌های خورشیدی، در گزارش‌های تجربی عملکرد ماژول‌های سیلیکونی پیش‌تاز بود [7]. از سال ۲۰۱۵ به بعد، رویکردهای اقتصادی و سیاست‌محور در پژوهش‌ها گسترش یافتند. تحلیل‌های هزینه-فایده در کشورهای جنوب اروپا [8، 9] و مدل‌های اقتصاد چرخشی در شمال اروپا به‌طور ویژه مورد توجه قرار گرفتند [10]. از سال ۲۰۱۸ به این سو، موضوعات سیاست‌گذاری با تمرکز بر طراحی شبکه‌های لجستیکی، استراتژی‌های سرمایه‌گذاری، و چارچوب‌های ملی بازیافت، به‌ویژه در چین، استرالیا و اتحادیه اروپا، توسعه یافته‌اند [11-13].

¹ LCA: Life cycle assessment

انرژی خورشیدی به دلیل ماهیت تجدیدپذیر و پاک خود، جایگاه محوری در راهبردهای توسعه پایدار یافته است از سوی دیگر کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری سیستم‌های فتوولتائیک موجب گسترش استفاده از آن‌ها شده است [14]. در نتیجه، مدیریت پنل‌های پایان عمر از منظر زیست‌محیطی و اقتصادی به موضوعی حیاتی تبدیل شده است [15].

پنل‌های خورشیدی معمولاً دارای طول عمر مفید ۲۵ تا ۳۰ سال هستند و پس از آن در دسته زباله‌های الکترونیکی قرار می‌گیرند. برآوردها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۷۸ میلیون تن زباله پنل‌های فتوولتائیک تولید خواهد شد [16]. این پنل‌ها حاوی مواد با ارزشی نظیر شیشه، سیلیکون، نقره، آلومینیوم و پلیمرها هستند که ظرفیت بالایی برای بازیافت دارند [17]. در مطالعات متعددی، به بررسی راهکارهای بازیافت، بازیابی نقره و بازاستفاده از شیشه پرداخته شده است [8، 17، 18].

روش‌های متداول بازیافت شامل بازیافت مکانیکی (خردکردن و جداسازی فیزیکی)، حرارتی (سوزاندن پلیمرها)، و شیمیایی (استخراج ترکیب) جهت بازیافت استفاده شده است. ارتقا بخشی در روش‌های بازیافت، شامل بازیابی مواد و استفاده مجدد آن‌ها برای تولید محصولات با ارزش افزوده بالاتر است. برای مثال، برخی از مواد بازیافتی از پنل‌های فتوولتائیک برای ساخت آند باتری‌های لیتیوم-یون مورد استفاده قرار می‌گیرند [17، 19].

با توجه به پیچیدگی‌های فنی مرتبط با بازیافت پنل‌های پایان عمر، در ادامه به نقش زنجیره تأمین حلقه بسته در بهینه‌سازی این فرآیند پرداخته می‌شود.

زنجیره تأمین حلقه بسته به مدل‌هایی از زنجیره تأمین اشاره دارد که شامل جریان مواد در هر دو جهت رفت (از تولید تا مصرف) و برگشت (از مصرف این مدل‌ها شامل مراحل جمع‌آوری، جداسازی، به تولید مجدد) هستند [17]. بازیافت و بازتولید پنل‌ها با استفاده از مواد بازیافتی می‌باشند. این زنجیره‌ها به کاهش هزینه تولید و اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کنند [19]. از جمله چالش‌های کلیدی می‌توان به هزینه بالای جمع‌آوری و فقدان طراحی استاندارد برای پنل‌ها اشاره نمود. گسترش بازار مواد بازیافتی، توسعه فناوری‌های نوین بازیافت از جمله مهم‌ترین فرصت‌ها این موضوع به شمار می‌رود [20].

هزینه‌یابی جریان مواد که در استاندارد ISO 14051 تعریف شده است، به شناسایی هزینه‌های پنهان ناشی از اتلاف مواد و منابع می‌پردازد. روش هزینه‌یابی جریان مواد با طبقه‌بندی خروجی‌های مثبت (محصولات) و منفی (اتلاف‌ها) و تخصیص هزینه به آن‌ها، باعث ارتقای بهره‌وری در فرآیندهای بازیافت می‌شود [21].

هزینه‌های بالا اغلب ناشی از جداسازی دستی، مصرف انرژی حرارتی، و فقدان اتوماسیون هستند [22-23]. بدون یارانه یا مالیات بر دفن زباله، بازیافت اقتصادی امکان‌پذیر نیست مگر آن‌که مواد باارزشی نظیر نقره و سیلیکون خالص استخراج شوند [13-14]. ارزیابی چرخه عمر نیز ابزاری کلیدی برای سنجش اثرات زیست‌محیطی در کل چرخه عمر پنل‌های فتوولتائیک محسوب می‌شود. این روش به بهبود طراحی و فرآیندهای بازیافت کمک می‌کند [24]. فناوری‌هایی نظیر چسب‌های رسانای الکتریکی، نوارهای بدون سرب، سیستم‌های ترکیبی فتوولتائیک و برچسب‌گذاری فرکانس‌های رادیویی از

جمله نوآوری‌هایی هستند که قابلیت بازیافت‌پذیری و پایداری را افزایش می‌دهند [17، 19]. کشورهای در حال توسعه مانند هند، چین، بنگلادش و استرالیا با چالش‌هایی نظیر ضعف زیرساخت، هزینه‌های بالا و عدم وجود سیستم‌های محلی مواجه‌اند. برای مثال، در بنگلادش تجمع پنل‌های فتوولتائیک مستعمل به دلیل نبود سامانه جمع‌آوری گزارش شده است [25].

مطالعات هم‌چنین بر اهمیت بازیابی فلزات حیاتی برای آینده انرژی پاک تأکید دارند [26]. یکی از چالش‌های ساختاری، نبود هماهنگی میان سیاست‌گذاران و بازیافت‌کنندگان است [5]. مطالعات ارزیابی چرخه عمر نیز بر لزوم ادغام بازیافت در استراتژی‌های کلی زیست‌محیطی تأکید دارند [27].

توسعه هم‌زمان بازیافت پنل‌های فتوولتائیک، زنجیره تأمین حلقه بسته، فناوری‌های نوآورانه، و سیاست‌های حمایتی، به‌صورت جمعی می‌تواند به پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی صنعت فتوولتائیک کمک نمایند [20].

با بررسی مطالعات ارائه شده پیشین می‌توان بیان نمود، مطالعات موجود فاقد چارچوبی جامع هستند که به‌صورت هم‌زمان، روش هزینه‌یابی جریان مواد و زنجیره تأمین حلقه بسته را برای اندازه‌گیری تأثیرات اقتصادی و زیست‌محیطی در کنار هم به کار گیرد. ضرورت این اندازه‌گیری در زنجیره تأمین محصولات مختلف بخصوص محصولات جدید اهمیت زیادی دارد. لذا به منظور هزینه‌یابی و تعیین میزان اتلاف بازیافت پنل‌های فتوولتائیک در بخش بعدی به شرح روش‌شناسی تحقیق و ساختار تحلیلی مطالعه با رویکرد هزینه‌یابی اختصاص یافته است.

3- روش‌شناسی پژوهش

در این بخش، مسأله پژوهش، روش‌شناسی، و چارچوب کلی تحلیل معرفی می‌شود. با توجه به افزایش سریع نصب جهانی سیستم‌های فتوولتائیک و پایان عمر طبیعی این سیستم‌ها پس از حدود ۲۵ تا ۳۰ سال، پیش‌بینی می‌شود که حجم عظیمی از پسماند پنل‌های فتوولتائیک تولید شود. برآوردها حاکی از آن است که تا سال ۲۰۵۰، حجم این پسماندها به بیش از ۷۸ میلیون تن خواهد رسید [16]. در صورت مدیریت ناصحیح، این پسماند می‌تواند منجر به اثرات زیست‌محیطی شدید و برگشت‌ناپذیر شود.

پنل‌های فتوولتائیک از موادی با ارزش بالا مانند شیشه، آلومینیوم، سیلیکون، و فلزات گران‌بها تشکیل شده‌اند [17]. علیرغم ارزش اقتصادی بالای این مواد، نرخ بازیافت برای اجزای مختلف به‌شدت متغیر است. براساس اعداد بیان شده در این مرجع [17] ترکیب و نرخ بازیافت اجزای پنل‌های فتوولتائیک مطابق جدول (1) است.

جزء	نرخ بازیافت (%)	سهم وزنی (%)
شیشه	70	70-75
قاب آلومینیومی	70	10
پلیمرها	74	10
سیلیکون	4	3-5
فلزات گران‌بها	70	کمتر از 0.5%

[17]

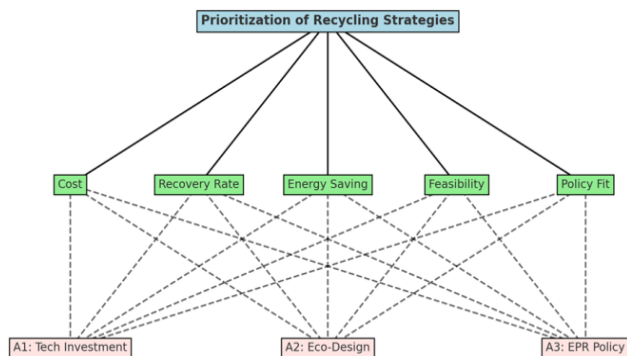
¹ Upcycling

طبق مقالات مرور شده مطابق با موضوع این تحقیق معیارهایی که برای ارزیابی راهبرد بازیافت پل‌های خورشیدی استفاده شده‌اند، عبارتند از [17-26]:

- C1: هزینه اجرا: سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی برای اجرای هر راهبرد
- C2: تأثیر بر نرخ بازیافت: میزان اثربخشی هر راهبرد در افزایش نرخ بازیابی مواد
- C3: صرفه‌جویی انرژی: توان هر راهبرد در کاهش مصرف انرژی طی فرآیند بازیافت
- C4: امکان‌پذیری صنعتی: سطح آمادگی و پذیرش صنعتی برای اجرای راهبرد
- C5: هم‌راستایی با سیاست‌های زیست‌محیطی: میزان انطباق با اهداف و مقررات ملی زیست‌محیطی

فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌صورت گام‌به‌گام و طبق مراحل زیر انجام شده است:

- ساختاردهی سلسله‌مراتب تصمیم (هدف → معیارها → گزینه‌ها)
- تشکیل ماتریس مقایسه‌های زوجی برای معیارها با استفاده از مقیاس ۱ تا ۹ ساعتی
- محاسبه وزن معیارها از طریق نرمال‌سازی و میانگین هندسی
- مقایسه زوجی گزینه‌ها در هر معیار
- تجمیع وزن‌ها برای محاسبه امتیاز نهایی هر گزینه
- ارزیابی نرخ سازگاری جهت اطمینان از اعتبار قضاوت‌ها
- ساختار سلسله‌مراتبی تصمیم‌گیری در شکل (1) نمایش داده شده است:



شکل 1 سلسله‌مراتب تصمیم برای اولویت‌بندی راهبردهای بازیافت پل‌های فتوولتائیک با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره [17-26]

با توضیحات ارائه شده می‌توان مراحل انجام تحقیق را بدین شکل بیان نمود. در گام نخست، با استفاده از هزینه‌یابی جریان مواد، فرآیند بازیافت پایان عمر پل‌های فتوولتائیک به‌صورت مرحله‌به‌مرحله مورد تحلیل قرار گرفت.

- شاخص‌های کلیدی عملکرد شامل موارد زیر بودند:
- اتلاف مواد
 - هزینه‌های پنهان

علی‌رغم پیشرفت‌های فناورانه در حوزه بازیافت، چالش‌هایی نظیر نبود زیرساخت مناسب، هزینه بالای جمع‌آوری و پردازش، فقدان طراحی استاندارد برای تسهیل بازیافت، و کمبود حمایت‌های سیاستی، همچنان مانع از شکل‌گیری زنجیره تأمین حلقه بسته مؤثر برای پل‌های فتوولتائیک، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، شده‌اند [18، 24]. با توجه به اهمیت حیاتی پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی، به‌کارگیری ابزارهای روش هزینه‌یابی جریان مواد بر اساس استاندارد ISO 14051 و چارچوب‌های زنجیره تأمین حلقه بسته برای ارتقای کارایی بازیافت و کاهش هزینه‌های مرتبط ضروری است [17]. بر همین اساس می‌توان در جهت حصول اهداف تحقیق سوال‌های زیر را مطرح نمود و سعی در پاسخ به این سوالات برآمد:

- چگونه می‌توان بازیافت اجزای پل‌های فتوولتائیک را با استفاده از مدل‌های روش هزینه‌یابی جریان مواد و زنجیره تأمین حلقه بسته بهینه‌سازی کرد؟
- کدام یک از اجزای پل‌های فتوولتائیک بیش‌ترین ارزش اقتصادی را در بازیافت دارند و چه راهبردهایی می‌تواند نرخ بازیافت آن‌ها را افزایش دهد؟
- نرخ‌های بازیافت فعلی اجزای مختلف پل‌های خورشیدی چقدر است؟
- کدام فناوری‌ها و رویکردها در بهبود عملکرد بازیافت مؤثرتر هستند؟
- روش هزینه‌یابی جریان مواد چگونه می‌تواند نقاط اتلاف منابع را شناسایی و کاهش دهد؟
- کدام مکانیزم‌های سیاستی بیش‌ترین اثر را در بهبود سیستم‌های بازیافت فتوولتائیک دارند؟

تحلیل سلسله‌مراتبی¹

علاوه بر به‌کارگیری روش هزینه‌یابی جریان مواد برای شناسایی ناکارآمدی‌ها و ارزیابی جنبه‌های اقتصادی فرآیند بازیافت، در این پژوهش از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی نیز به منظور ارتقای تصمیم‌گیری در سطوح مدیریتی و سیاست‌گذاری استفاده شده است.

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که برای انتخاب گزینه‌های بهینه در شرایطی که تصمیم‌گیرنده با معیارها و گزینه‌های متضاد مواجه است، طراحی شده است. این روش توسط توماس ساعتی [28] ارائه شده و بر مقایسه‌های زوجی برای استخراج وزن نسبی هر معیار و گزینه استوار است.

در این پژوهش، تصمیم‌گیری چندمعیاره برای اولویت‌بندی سه راهبرد کلیدی به منظور بهبود فرآیند بازیافت پایان عمر پل‌های فتوولتائیک به کار گرفته شده است. راهبردهای مورد ارزیابی عبارتند از:

- A1: سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پیشرفته بازیافت حرارتی/شیمیایی
- A2: طراحی پل‌های فتوولتائیک با ساختار ماژولار و قابل بازیافت (اکو-دیزاین)
- A3: اجرای سیاست مسئولیت توسعه‌یافته تولیدکننده برای مدیریت کل چرخه عمر پل‌های فتوولتائیک

¹ AHP: Analytical Hierarchy Process

• کارایی فرآیند بازیافت

فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره امکان شناسایی نقاط اتلاف و برآورد دقیق‌تر هزینه‌های واقعی تولید و بازیافت را فراهم نمود.

در ادامه، مدل زنجیره تأمین حلقه بسته به‌عنوان چارچوب مکمل معرفی شد تا علاوه بر ارزیابی جریان مواد، در تصمیم‌گیری‌های کلان نیز مورد استفاده قرار گیرد. این مدل، چرخه کامل عمر پنل‌های فتوولتائیک از تولید تا بازیافت و بازگشت به مصرف را مورد بررسی قرار داد.

در نهایت، روش تحلیل سلسله‌مراتبی برای اولویت‌بندی راهبردهای بهبود، در قالب یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌کار گرفته شد. این روش امکان ارزیابی ساختاریافته با در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و عملیاتی را فراهم کرد. سه گزینه راهبردی مورد ارزیابی شامل: سرمایه‌گذاری فناوریانه، طراحی زیست‌سازگار (اکو-دیزاین)، و سیاست مسئولیت تولیدکننده بودند که از طریق مقایسه زوجی و وزن‌دهی، رتبه‌بندی شدند. نتیجه این تحلیل ترکیبی، یک رویکرد مدیریت‌محور و جامع برای بهبود بازیافت پنل‌های فتوولتائیک ارائه می‌دهد.

گام اول: روش‌شناسی و تحلیل مبتنی بر روش هزینه‌یابی جریان مواد در بازیافت پنل‌های فتوولتائیک

در این تحقیق روش هزینه‌یابی جریان مواد برای تحلیل زنجیره بازیافت پنل‌های فتوولتائیک پایان‌عمر یافته، مطابق با استاندارد بین‌المللی ISO 14051 به‌کار گرفته شده است. هدف اصلی از به‌کارگیری روش هزینه‌یابی جریان مواد، شناسایی کمی و ریالی مواد مفید (محصول)، خروجی‌های غیرمحمولی و بهینه‌سازی هزینه‌ها در هر مرحله از فرآیند بازیافت است. چارچوب تحلیل، روش هزینه‌یابی جریان مواد را با مدل زنجیره تأمین حلقه بسته تلفیق کرده و هر مرحله از بازیافت را در قالب مراکز کمی¹ مورد بررسی قرار می‌دهد.

در مدل روش هزینه‌یابی جریان مواد هر مرحله از فرآیند بازیافت به‌صورت یک مرکز کمی تعریف می‌شود که در آن ورودی‌ها، خروجی‌های مفید (محصولات) و خروجی‌های غیرمحمولی (اتلاف‌ها) هم از نظر وزنی و هم از نظر مالی ارزیابی می‌شوند.

عناصر اصلی هزینه‌ای در هر مرحله عبارتند از:

- هزینه مواد
- هزینه انرژی
- هزینه‌های سیستمی
- هزینه مدیریت ضایعات

در هر مرحله، نرخ بازیافت و نرخ اتلاف مواد به‌صورت جداگانه محاسبه می‌گردد.

پیش از اجرای تحلیل روش هزینه‌یابی جریان مواد ساختار کلی زنجیره تأمین حلقه بسته برای بازیافت پنل‌های فتوولتائیک معرفی می‌شود. این ساختار مراحل زیر را دربر می‌گیرد:

- مدیریت پایان‌عمر
- جداسازی اجزا
- بازیافت حرارتی/ شیمیایی

• ارتقابخشی صنعتی

با توجه به این‌که در سال 2026، پنل‌های فتوولتائیک 550 وات مونو کریستال یکی از رایج‌ترین سایزها به شمار می‌رود این سایز به‌عنوان مبنا هزینه جریان مواد در بازیافت پنل‌های فتوولتائیک انتخاب شده است. از طرفی در بازار جهانی حدود 0/18 تا 0/25 دلار بر هر وات هزینه در هر پنل در نظر گرفته می‌شود. لذا یک پنل 550 واتی تقریباً 99 تا 138 دلار قیمت خواهد داشت. [28]

لذا در این مطالعه به‌صورت کاملاً واقعی یک پنل 550 دلاری با قیمت 138 دلار برای پیاده‌سازی هزینه‌یابی جریان مواد بازیافت در نظر گرفته شده است. قیمت هر جزء نیز با ضرب وزن هر جزء براساس سهم هر ماده در محصول نهایی بر طبق مرجع [17] در قیمت این پنل بدست می‌آید. در جدول (2) این مقادیر ارائه شده است.

جدول (2): قیمت اجزاء یک پنل فتوولتائیک 550 واتی بر حسب دلار

قیمت هر جزء (دلار)	سهم وزنی (%)	جزء
96.6-103/5	70-75	شیشه
13/8	10	قاب آلومینیومی
13/8	10	پلیمرها
4/14 – 6/9	3-5	سیلیکون
کمتر از 6.9	کمتر از 0.5%	فلزات گرانبها

[17]

سپس این ساختار به سه مرکز کمی تفکیک شده و تحلیل روش هزینه‌یابی جریان مواد برای هر بخش به‌صورت درصد اعمال می‌شود.

مرکز کمی 1- مرحله جداسازی²

- ورودی: پنل‌های فتوولتائیک پایان‌عمر یافته
- خروجی مفید: شیشه و آلومینیوم (۷۰٪ وزن ورودی این مرحله براساس سهم این مواد در محصول نهایی)
- شیشه شکسته (۳۰٪ وزن ورودی این مرحله براساس سهم این ماده در محصول نهایی)
- تحلیل: کارایی بازیافت نسبتاً بالا، اما چسبندگی و شکستگی شیشه نیازمند بهینه‌سازی فرآیند هستند.

مرکز کمی 2: بازیافت حرارتی/ شیمیایی:

- ورودی: اجزای خروجی از مرکز کمی 1
- خروجی مفید: نقره و سیلیکون (۶۰٪ وزن ورودی این مرحله)
- لجن شیمیایی، گازهای آلاینده (۴۰٪ وزن ورودی این مرحله)
- تحلیل: هزینه‌های انرژی و سیستم در این مرحله بالا است؛ روش هزینه‌یابی جریان مواد نقاط پرهزینه را شناسایی کرده و بهبودهای فناوریانه را پیشنهاد می‌دهد.

² Disassembly¹ QCs: Quantitative Centers

• تحلیل: این مرحله دارای بالاترین نرخ اتلاف است؛ نیاز به تحقیق و

توسعه برای کاهش ضایعات و افزایش بهره‌وری وجود دارد.

نمودار شکل 2، جریان کلی مواد، هزینه‌ها، و نرخ اتلاف را در سه مرکز کمی

برای تحلیل روش هزینه‌یابی جریان مواد نشان می‌دهد.

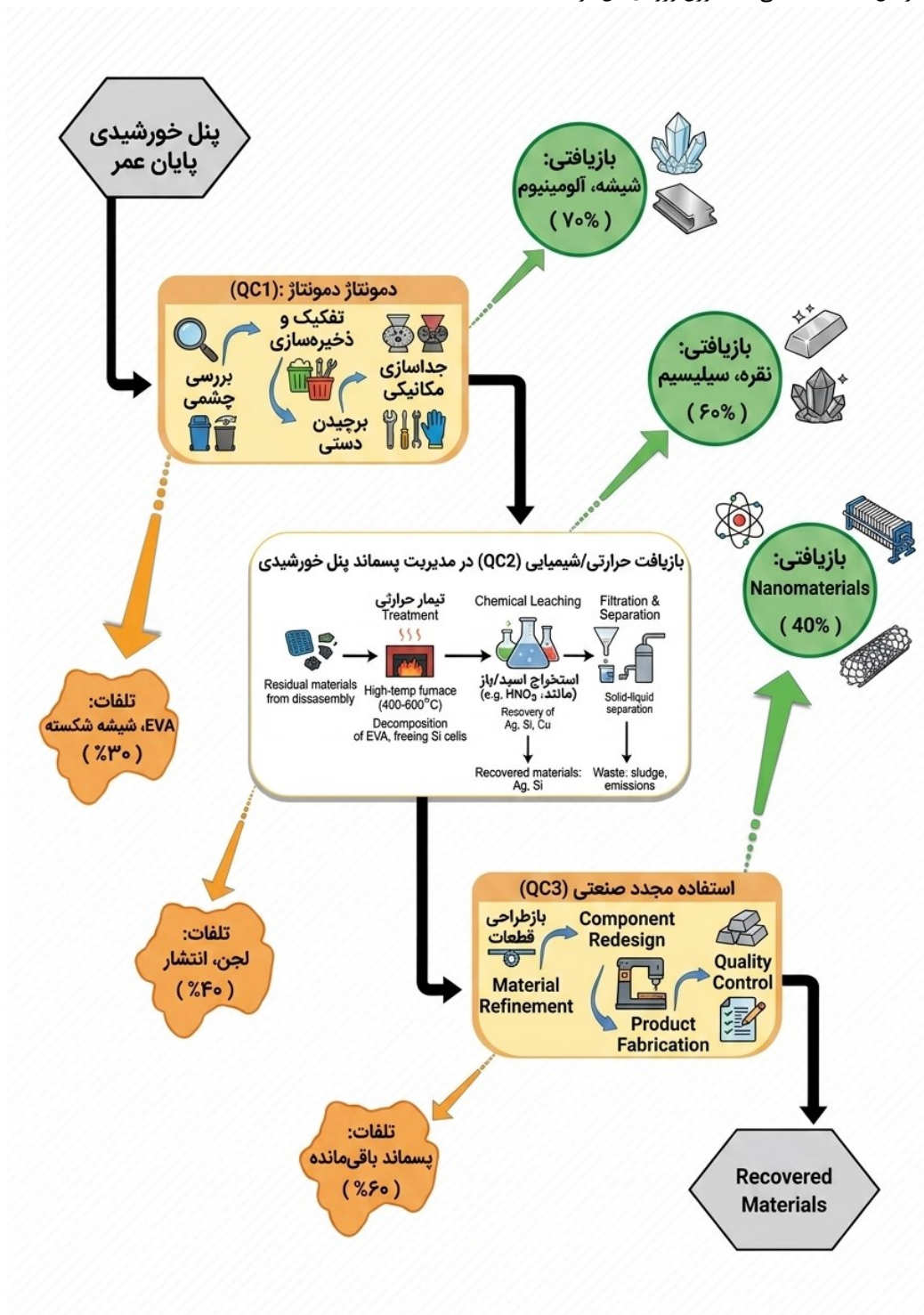
مرکز کمی 3: استفاده مجدد صنعتی¹

• ورودی: مواد بازیافتی از QC2

• خروجی مفید: نانومواد، ویفرهای سیلیکونی (40٪ وزن ورودی این

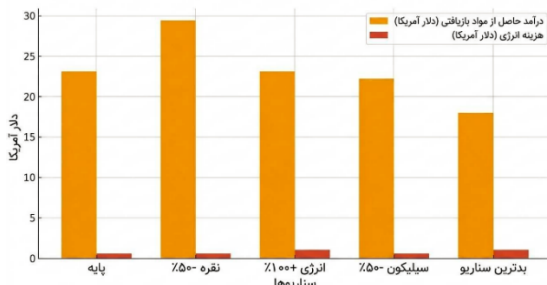
مرحله براساس سهم این مواد در محصول نهایی)

• ضایعات غیرقابل استفاده صنعتی (60٪ وزن ورودی این مرحله)



¹ Upcycling

شکل 2 جریان روش هزینه‌یابی جریان مواد و خلاصه‌ی خروجی‌ها در بازیافت پنل‌های فتوولتائیک براساس محاسبات تحقیق



شکل (3): مقایسه درآمد بازیافت و هزینه انرژی حاصل از بازیافت

لذا می‌توان بیان نمود:

- قیمت نقره بیش‌ترین اثر را بر درآمد کل دارد؛ افزایش ۳۰٪ آن، سود بازیافت را به‌طور قابل توجهی بالا می‌برد.
- دو برابر شدن هزینه انرژی، باعث افزایش زیان عملیاتی در مراحل انرژی‌بر (مثل بازیافت حرارتی) می‌شود.
- کاهش قیمت سیلیکون تأثیر متوسطی دارد، اما در صورت ترکیب با سایر عوامل منفی (سناریوی بدبینانه)، پایداری اقتصادی به‌شدت آسیب می‌بیند. این تحلیل نشان داد که ثبات در بازار مواد اولیه و بهینه‌سازی مصرف انرژی از عوامل حیاتی در پایداری سیستم‌های بازیافت فتوولتائیک هستند.

گام سوم: تحلیل AHP و رتبه‌بندی راهبردها

برای اولویت‌بندی راهبردهای بهبود فرآیند بازیافت پنل‌های فتوولتائیک، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد. این روش امکان ارزیابی هم‌زمان چندین معیار را فراهم کرده و انتخاب بهینه‌ترین گزینه راهبردی را تسهیل می‌کند. روش تحلیل سلسله‌مراتبی که توسط ساعتی معرفی شده، یکی از روش‌های معتبر برای اولویت‌بندی گزینه‌ها در شرایط تصمیم‌گیری چندمعیاره است [28].

در ابتدا، پنج معیار تصمیم‌گیری زیر تعریف شد:

- هزینه اجرا (C1)
- تأثیر بر نرخ بازیافت (C2)
- صرفه‌جویی انرژی (C3)
- امکان‌پذیری صنعتی (C4)
- انطباق با سیاست‌های زیست‌محیطی (C5)

طبق معیارهای استخراج شده از منابع 17 تا 26 این مطالعه و بر اساس نظرات خبرگان به صورت گروهی حوزه‌های بازیافت، انرژی، و سیاست‌گذاری محیط‌زیستی، مقایسات زوجی میان معیارها انجام شد. نتیجه‌ی این مقایسات در جدول (3) آمده است.

جدول 3 ماتریس مقایسه زوجی معیارهای ارزیابی در مدل تحلیل سلسله‌مراتبی

معیار	C1	C2	C3	C4	C5
هزینه اجرا (C1)	1	0/5	1	2	1
نرخ بازیافت (C2)	2	1	2	3	2
صرفه‌جویی انرژی (C3)	1	0/5	1	1	1

این محاسبات نشان می‌دهند که بخش قابل‌توجهی از هزینه‌ها در طی فرآیند بازیافت از دست می‌رود، به‌ویژه در مراحل مرکز کمی 1 و مرکز کمی 2 بنابراین، بهینه‌سازی این مراحل برای افزایش کارایی کلی سیستم بازیافت ضروری است. تحلیل روش هزینه‌یابی جریان مواد مطابق با دستورالعمل‌های استاندارد ISO 14051 پیاده‌سازی شده است. تمام محاسبات مربوط به عناصر هزینه و نرخ‌های بازیافت برای هر مرکز کمی به‌صورت سیستماتیک انجام شده است.

گام دوم: چارچوب زنجیره تأمین حلقه بسته در زنجیره بازیافت

تحلیل روش هزینه‌یابی جریان مواد نشان داد که برخی از اجزای پنل‌ها دارای بالاترین نرخ اتلاف و کم‌ترین کارایی (نسبت خروجی به ورودی) در بازیافت هستند. به‌طور خاص:

- لایه پشتی: به‌دلیل چسبندگی بالا و ترکیب پلیمری پیچیده، نرخ بازیافت آن بسیار پایین است.
- سلول‌های سیلیکونی: با وجود ارزش بالای مادی، بازیافت آن‌ها با دشواری‌های فنی روبرو است.
- نقره: بازیافت نقره مستلزم عملیات دقیق شیمیایی و حرارتی است که هزینه‌بر می‌باشد.

این یافته‌ها بر ضرورت به‌کارگیری فناوری‌های جدید و نیز اعمال سیاست‌های حمایتی قوی برای ارتقاء نرخ بازیافت و کاهش اتلاف‌ها تأکید دارند.

برای ارزیابی پایداری مدل روش هزینه‌یابی جریان مواد و شناسایی عوامل اقتصادی بحرانی در زنجیره بازیافت پنل‌های فتوولتائیک، یک تحلیل حساسیت بر اساس سه متغیر کلیدی انجام شد:

- قیمت نقره
- قیمت سیلیکون
- هزینه انرژی

این متغیرها به‌دلیل تأثیر زیاد بر درآمد حاصل از بازیافت و هزینه‌های عملیاتی (به‌ویژه در مراحل حرارتی/شیمیایی) انتخاب شدند.

مطابق شکل (3)، در هر سناریو، درآمد حاصل از بازیافت نقره و سیلیکون و هزینه انرژی برای پردازش پنل فتوولتائیک 550 واتن پایان عمر مجدداً محاسبه شد. در این شکل سناریو پایه مبین ثابت ماندن قیمت همه اجزا پنل‌هاست. در سناریو دوم نقره با افزایش 50 درصدی مواجه شده است. در سناریو سوم همه اجزا و انرژی مصرف شده به میزان 100 درصد افزایش قیمت داشته‌اند. در سناریو چهارم تنها سیلیکون با افزایش 50 درصدی همراه شده است. و نهایتاً در پنجمین احتمال ممکن درآمد حاصل از مواد بازیافتی نسبت به حالت پایه کاهش داشته است.

• افزایش هزینه انرژی (دو برابر شدن) باعث افت چشم‌گیر سودآوری می‌شود.

• کاهش ارزش سیلیکون تأثیر متوسطی دارد، اما در ترکیب با عوامل منفی دیگر موجب تهدید پایداری اقتصادی کل سیستم می‌شود. بر اساس ارزیابی چندمعیاره، گزینه طراحی سازگار با محیط زیست بالاترین امتیاز را به‌دست آورد. این راهبرد در معیارهای کلیدی مانند کارایی بازیافت، هزینه اجرا و انطباق با سیاست‌های زیست‌محیطی عملکرد برتری داشت. این هم‌سویی بین یافته‌های روش هزینه‌یابی جریان مواد (که نشان‌دهنده بازیافت مؤثر در مرحله جداسازی بود) و نتایج تحلیل سلسبه مراتبی (که بر ضرورت طراحی قابل جداسازی تأکید داشت) نشان‌دهنده قدرت ترکیبی این دو روش در پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های صنعتی و سیاست‌گذاری است.

هم‌چنین تحلیل داده‌های انجام شده نشان می‌دهد:

• بیش‌ترین نرخ بازیافت در مرحله جداسازی با حدود ۷۰٪ ثبت شده است.

• بیش‌ترین اتلاف مواد در مرحله استفاده مجدد صنعتی با نرخ اتلاف ۶۰٪ اتفاق می‌افتد.

• بهره‌وری تجمعی مواد در کل زنجیره بازیافت حدود ۷۱.۷٪ برآورد شد.

این نسبت‌ها و نتایج حاصل از تصمیم‌گیری چند معیاره، پتانسیل بالایی را برای مدیریت بهتر انرژی و هزینه‌های سیستمی در مراحل پایین‌دست بازیافت نشان می‌دهد. در کل، حدود ۳۰٪ از کل هزینه‌های فرآیند مربوط به اتلاف‌هاست که فرصتی جدی برای صرفه‌جویی اقتصادی فراهم می‌سازد. تمامی برآوردهای هزینه‌ای در این بخش، از ترکیب داده‌های بازار (قیمت مواد مانند نقره و سیلیکون)، هزینه انرژی، تعرفه‌های سیستمی، و نرخ دستمزد نیروی کار، با استناد به مطالعات پیشین [17، 23] و داده‌های سال ۲۰۲۳ به‌دست آمده‌اند. نتایج نشان داد که برخی از اجزا دارای نرخ بازیافت بالا هستند، در حالی که برخی دیگر به‌دلیل پیچیدگی‌های ساختاری و چالش‌های فناورانه با مشکلات جدی در فرآیند بازیافت مواجه‌اند.

هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که در حالی‌که اجزایی مانند شیشه و آلومینیوم نرخ بازیافت مناسبی دارند، لایه‌های پلیمری و سلول‌های سیلیکونی به‌دلیل پیچیدگی فنی و چسبندگی شدید، نیازمند راهکارهای فناورانه پیشرفته‌تری هستند.

اگرچه بازیافت پنبه‌های خورشیدی در ایران با چالش‌هایی جدی مانند زیرساخت ناکافی و اتلاف بالا روبرو است، اما وجود مواد ارزشمند، فرصت‌های فناورانه، و امکان تدوین سیاست‌های حمایتی، زمینه مناسبی برای توسعه یک سیستم پایدار فراهم کرده است. با تقویت فناوری‌های بازیافت، اصلاح طراحی پنبه‌ها و پشتیبانی سیاستی، می‌توان از تهدیدهای موجود عبور کرد و نقاط قوت را به مزیت رقابتی تبدیل نمود.

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل روش هزینه‌یابی جریان مواد و بررسی‌های کیفی، مجموعه‌ای از اقدامات برای بهبود عملکرد زنجیره بازیافت پنبه‌های فتوولتائیک پیشنهاد می‌گردد. این پیشنهادها در سه سطح فناورانه، سیاست‌گذاری، و اجرایی تنظیم شده‌اند:

- توسعه فناوری‌های پیشرفته جداسازی حرارتی
- ارائه یارانه‌های دولتی برای تسهیل بازیافت نقره و سلول‌های سیلیکونی

امکان‌پذیری صنعتی (C4)	0/5	0.33	1	1	1
انطباق با سیاست‌های زیست‌محیطی (C5)	1	0/5	1	1	1

پس از نرمال‌سازی و محاسبه وزن معیارها، مشخص شد که نرخ بازیافت (C2) بیش‌ترین وزن را دارد (۰.۲۵)، و سپس هزینه اجرا (C1) و انطباق با سیاست‌ها (C5) با وزن ۰.۲۰ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. سه گزینه راهبردی که تحت این معیارها ارزیابی شدند:

- A1: سرمایه‌گذاری در فناوری بازیافت پیشرفته
- A2: طراحی زیست‌سازگار (اکو-دیزاین)
- A3: سیاست مسئولیت توسعه‌یافته تولیدکننده

ادامه محاسبات در جداول (4) و (5) نشان داده شده است.

جدول (4): وزن معیارها و ارزیابی گزینه‌ها بر اساس هر معیار					
گزینه	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0.15	0.20	0.25	0.10	0.07
A2	0.35	0.40	0.45	0.30	0.30
A3	0.50	0.40	0.30	0.60	0.63

جدول (5): امتیاز نهایی و رتبه‌بندی گزینه‌ها		
رتبه	امتیاز نهایی	معیار
اول	0.457	A2
دوم	0.372	A3
سوم	0.171	A1

نرخ سازگاری (تقسیم شاخص سازگاری به ناسازگاری تصادفی) محاسبه‌شده کم‌تر از 0/1 بود که نشان‌دهنده اعتبار بالای قضاوت‌های کارشناسان است. بنابراین، طراحی سازگار با محیط زیست (A2) به‌عنوان راهبرد برتر شناسایی شد؛ زیرا هم در بهبود نرخ بازیافت و هم در انطباق با سیاست‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های اجرا عملکرد مطلوبی دارد.

4- پیاده‌سازی و تحلیل

در این بخش، نتایج یکپارچه‌ای حاصل از تحلیل روش هزینه‌یابی جریان مواد و ارزیابی‌های تکمیلی به‌منظور بررسی عملکرد و پایداری اقتصادی فرآیند بازیافت پنبه‌های فتوولتائیک پایان‌عمر ارائه می‌شود. در گام نخست، هزینه‌یابی جریان مواد برای ارزیابی سه مرحله اصلی بازیافت در مراکز کمی اول تا سوم به‌کار گرفته شد. این تحلیل شامل بررسی جریان مواد، کارایی بازیافت، میزان اتلاف‌ها، و توزیع هزینه‌ها بود. نتایج روش هزینه‌یابی جریان مواد نشان داد:

- بالاترین نرخ بازیافت مربوط به مرحله جداسازی است.
- بالاترین میزان اتلاف و پایین‌ترین کارایی در مرحله استفاده مجدد صنعتی مشاهده شد.
- بیش از ۳۰٪ کل هزینه‌های فرآیند به اتلاف‌های قابل اجتناب مربوط می‌شود.

در ادامه، تحلیل حساسیت برای بررسی اثر تغییرات در متغیرهای کلیدی اقتصادی مانند قیمت نقره، قیمت سیلیکون و هزینه انرژی انجام شد. یافته‌ها نشان داد:

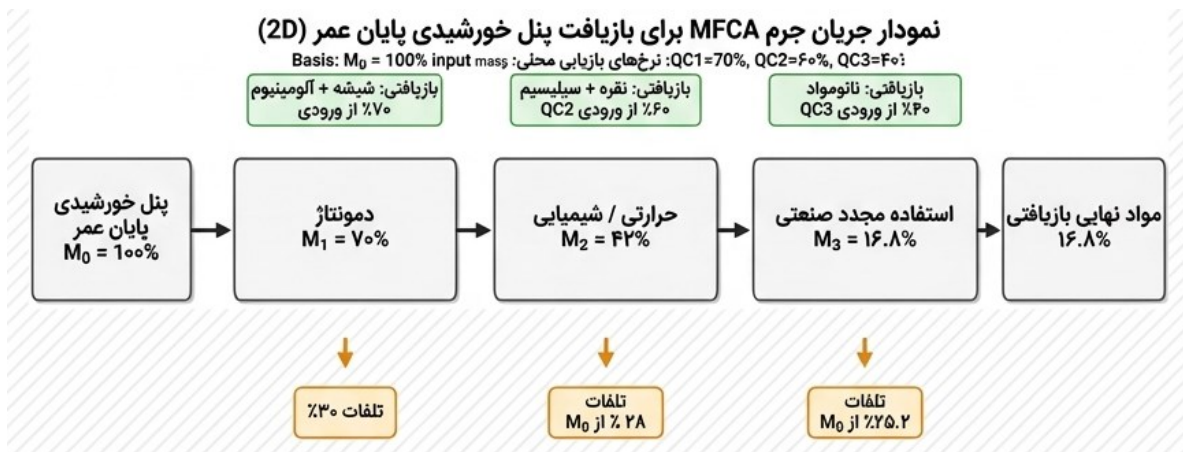
- افزایش قیمت نقره می‌تواند درآمد حاصل از بازیافت را به‌طور معنی‌دار افزایش دهد.

در جدول (۸) خلاصه خروجی‌های ماده و انرژی به تفکیک مراکز کنترل کیفیت نشان داده است. این نتایج نشان می‌دهد در هر مرکز کمی روش هزینه‌یابی جریان مواد چه خروجی‌های مثبت و منفی وجود دارد و چه نوعی از انرژی برای انجام بازیافت لازم است.

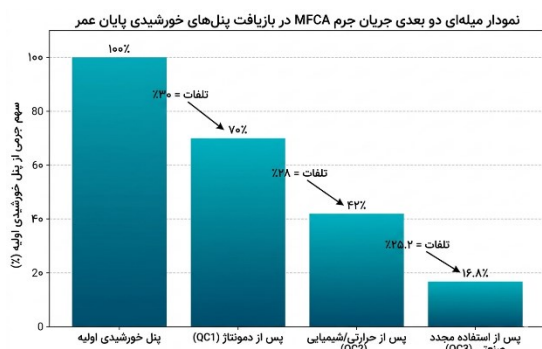
- اجرای اصول طراحی سازگار با محیط زیست برای تولید پنبه‌های مازولار و قابل بازیافت
- ارتقاء توان تخصصی نیروی انسانی در واحدهای بازیافت از طریق آموزش روش هزینه‌یابی جریان مواد
- ایجاد بانک اطلاعات ملی برای رصد نرخ اتلاف مواد و هزینه‌های زیست‌محیطی در مراکز بازیافت

جدول ۸ خلاصه خروجی‌های ماده و انرژی به تفکیک مراکز کنترل کیفیت براساس نتایج تحقیق

مرکز QC	محصول مثبت	خروجی منفی	انرژی مصرفی	مصرف مواد	هزینه‌های سیستمی
QC1	شیشه / آلومینیوم (kg)	EVA (kg) / شیشه شکسته (kg)	انرژی مکانیکی برای جداسازی	ابزار / تجهیزات مکانیکی	نیروی انسانی / تجهیزات (USD)
QC2	نقره (گرم) / سیلیکون (کیلو گرم)	لجن شیمیایی/گازهای آلاینده (SO ₂ , CO ₂)	انرژی حرارتی / واکنش شیمیایی	اسیدها / سوخت‌ها (L)	انرژی/مواد شیمیایی (USD)
QC3	نانو مواد بازیافتی (گرم)	ضایعات غیر قابل استفاده (کیلوگرم)	انرژی صنعتی/حمل و نقل	مواد جانبی / فرآیند (کیلوگرم)	پردازش/باز استفاده (USD)



شکل (4): محاسبات نهایی روش هزینه‌یابی جریان مواد بازیافت پنبه‌های فتوولتائیک 550 وات براساس نتایج تحقیق



شکل (5): مقایسه محصولات منفی مراکز کمی بازیافت براساس نتایج تحقیق

در این پژوهش، یک رویکرد تلفیقی مبتنی بر هزینه‌یابی جریان مواد و تحلیل سلسله‌مراتبی برای ارزیابی پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی زنجیره بازیافت پنبه‌های فتوولتائیک ارائه شد.

در شکل (4) محاسبات نهایی روش هزینه‌یابی جریان مواد بازیافت پنبه‌های فتوولتائیک 550 وات نشان داده شده است. میزان M_0 وزن این پنبه‌ها را به درصد نشان می‌دهد. در هر مرحله میزان تلفات و محصولات قابل استفاده محاسبه و نشان داده شده است. در شکل (5) نمودار مقایسه‌ای مراکز نشان داده است.

5- نتیجه‌گیری

روش هزینه‌یابی جریان مواد نشان داد که مراحل QC2 (بازیافت شیمیایی) و QC3 (استفاده مجدد صنعتی) بیش‌ترین سهم را در اتلاف منابع و هزینه‌های پنهان دارند؛ در حالی که مرکز کمی 1 (جداسازی) بالاترین راندمان و کم‌ترین اتلاف را داراست.

تحلیل تحلیل سلسله مراتبی مشخص کرد که از میان سه گزینه‌ی راهبردی پیشنهادی، «طراحی سازگار با محیط زیست (Eco Design)» بالاترین اولویت را دارد، چراکه هم از نظر هزینه اجرا و هم از منظر انطباق با اهداف زیست‌محیطی عملکرد بهتری دارد.

تحلیل حساسیت نشان داد که قیمت نقره و هزینه انرژی متغیرهای اقتصادی کلیدی هستند که می‌توانند سودآوری یا عدم پایداری سیستم بازیافت را تعیین کنند.

با وجود تهدیدهای فناورانه و بازار ناپایدار، فرصت‌هایی هم‌چون رشد انرژی تجدیدپذیر و امکان سیاست‌گذاری مؤثر، می‌توانند به تحول در سیستم بازیافت فتوولتائیک منجر شوند.

در مجموع، این مطالعه اثبات می‌کند که استفاده هم‌زمان از ابزارهای کمی (مانند) روش هزینه‌یابی جریان مواد و تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند بنیانی دقیق برای تصمیم‌سازی، طراحی مجدد زنجیره تأمین، و ارتقاء بهره‌وری زیست‌محیطی استفاده از پنبه‌های فتوولتائیک فراهم کند.

با توجه به یافته‌ها و محدودیت‌های پژوهش، مسیرهای زیر برای توسعه‌ی آینده پیشنهاد می‌شوند:

- افزایش دقت داده‌های محلی: اجرای پروژه‌های آزمایشی در صنایع بازیافت پنبه‌های فتوولتائیک در ایران جهت فراهم‌سازی داده‌های واقعی برای روش هزینه‌یابی جریان مواد
 - تحلیل چرخه عمر کامل: تلفیق روش هزینه‌یابی جریان مواد با روش‌های ارزیابی زیست‌محیطی مانند تحلیل چرخه عمر برای بررسی جامع‌تر اثرات بلندمدت
 - توسعه مدل‌های شبیه‌سازی دینامیک سیستم: بررسی رفتار بلندمدت بازار، سیاست‌ها و اثرات زیست‌محیطی بازیافت
 - ارزیابی سیاست‌های دولتی: شبیه‌سازی اثرات مالیاتی، یارانه‌ای یا سیاست مسئولیت تولیدکننده بر میزان بازیافت و پایداری اقتصادی
- طراحی بهینه زنجیره تأمین حلقه بسته: استفاده از روش‌های بهینه‌سازی و الگوریتم‌های تصمیم‌گیری برای طراحی شبکه بهینه لجستیک معکوس

منابع

- [1] Fthenakis VM, Kim HC. Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy*. 2011 Aug 1;85(8):1609-28.
- [2] Mozafari M, Savari J. Designing a green closed-loop supply chain network for pharmaceutical products using cuckoo search algorithm. *System Engineering and Productivity*. 2025 May 22;5(1):135-53.
- [3] Pishdar M, Seyyed Hashemi MR, Pourghader Chobar A, Sadri MS. Identify and Evaluate Strategies Related to Reducing Fruit and Vegetable Waste at the Retail and Consumer Levels. *System Engineering and Productivity*. 2024 Sep 21;4(2):17-30. <https://doi.org/10.22034/msb.2024.2031452.1213>. (in Persian)
- [4] Razzaghy S, Ahmadvand AM, Samadi Foroushani M. Presenting a Dynamic Model of Iran's Electrical Energy Supply System Based on the Water-Food-Energy-Climate Change Nexus. *System Engineering and Productivity*. 2024 Mar 15;3(4):36-80.
- [5] Sasikumar P, Kannan G. Issues in reverse supply chain, part III: classification and simple analysis. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2009 Mar 1;2(1):2-7.
- [6] Hsu DD, O'Donoghue P, Fthenakis V, Heath GA, Kim HC, Sawyer P, Choi JK, Turney DE. Life cycle greenhouse gas emissions of crystalline silicon photovoltaic electricity generation: systematic review and harmonization. *Journal of Industrial Ecology*. 2012 Apr;16:S122-35.
- [7] Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S. A review on energy and exergy analysis of solar drying systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012 Jun 1;16(5):2812-9.
- [8] Dai J, Chen B, Hayat T, Alsaedi A, Ahmad B. Sustainability-based economic and ecological evaluation of a rural biogas-linked agro-ecosystem. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2015 Jan 1;41:347-55.
- [9] Dai J, Chen B, Hayat T, Alsaedi A, Ahmad B. Sustainability-based economic and ecological evaluation of a rural biogas-linked agro-ecosystem. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2015 Jan 1;41:347-55.
- [10] Dai J, Chen B, Hayat T, Alsaedi A, Ahmad B. Sustainability-based economic and ecological evaluation of a rural biogas-linked agro-ecosystem. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2015 Jan 1;41:347-55.
- [11] Burg V, Bowman G, Haubensak M, Baier U, Thees O. Valorization of an untapped resource: Energy and greenhouse gas emissions benefits of converting manure to biogas through anaerobic digestion. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018 Sep 1;136:53-62.
- [12] Xi H, Jiang H, Zhao D, Zhang AH, Fan B, Yang Y, Zhang J. Highly selective adsorption of phosphate from high-salinity water environment using MgO-loaded and sodium alginate-immobilized bentonite beads. *Journal of Cleaner Production*. 2021 Sep 1;313:127773.
- [13] He J, Li J, Zhao D, Chen X. Does oil price affect corporate innovation? Evidence from new energy vehicle enterprises in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022 Mar 1;156:111964.
- [14] Shahir NS, Masjuki NH, Kalam MA, Imran A, Ashraf AM. Performance and emission assessment of diesel-biodiesel-ethanol/bioethanol blend as a fuel in diesel engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015 Aug 1;48:62-78.
- [15] Dunant CF, Drewniok MP, Sansom M, Corbey S, Cullen JM, Allwood JM. Options to make steel reuse profitable: An analysis of cost and risk distribution across the UK construction value chain. *Journal of cleaner production*. 2018 May 10;183:102-11.
- [16] Weckend S, Wade A, Heath GA. End of life management: solar photovoltaic panels. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, Golden, CO (United States); 2016 Jun 1.
- [17] D. Swies, G. Cecere, I. Mignon, Recycling silicon photovoltaic panels: Insights from empirical data and scenario analysis, *Resources, Conservation & Recycling*, Vol. 181, 106239, 2022.
- [18] Buker MS, Riffat SB. Building integrated solar thermal collectors—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015 Nov 1;51:327-46.
- [19] Liu P, Gao Y, Wang F, Yang L. Preparation of pervious concrete with 3-thiocyanatopropyltriethoxysilane modified fly ash and its use in Cd (II) sequestration. *Journal of Cleaner Production*. 2019 Mar 1;212:1-7.
- [20] Herez A, El Hage H, Lemenand T, Ramadan M, Khaled M. Parabolic trough photovoltaic thermoelectric hybrid system: Thermal modeling, case studies and economic and environmental analyses. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021 Oct 1;47:101368.
- [21] Onishi Y, Kokubu K, Nakajima M. Implementing material flow cost accounting in a pharmaceutical company. In *Environmental management accounting for cleaner production 2008* Oct 10 (pp. 395-409). Dordrecht: Springer Netherlands.
- [22] Wang Y, Zhang D, Ji Q, Shi X. Regional renewable energy development in China: A multidimensional assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020 May 1;124:109797.
- [23] Diaz-Farina E, Diaz-Hernández JJ, Padrón-Fumero N. The contribution of tourism to municipal solid waste generation: A

- mixed demand-supply approach on the island of Tenerife. *Waste Management*. 2020 Feb 1;102:587-97.
- [24] Su R, Lough JM, Sun D. Variations in massive Porites growth rates at Hainan Island, northern South China Sea. *Marine Ecology Progress Series*. 2016 Mar 21;546:47-60.
- [25] N. A. Chowdhury, S. Rahman, E-waste management and recycling in developing countries, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 24, No. 27, pp. 21460–21474, 2017.
- [26] Grandell L, Lehtilä A, Kivinen M, Koljonen T, Kihlman S, Lauri LS. Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies. *Renewable energy*. 2016 Sep 1;95:53-62.
- [27] Peng J, Lu L, Yang H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2013 Mar 1;19:255-74.
- [28] T.L. Saaty, The analytic hierarchy process mcgraw hill, New York. *Agricultural Economics Review*, No. 70(804), pp. 10-21236, 1980.
- [29] Akinola AO, Osasona AB, Aina OA, Sholesi JB, Dunmoye OJ. Design of the Charging, Power Train and Control System of a Solar-Powered Geared Tricycle. *Engineering Headway*. 2026 Feb 20;33:267-75.