

Polymerization  
Quarterly, 2021  
Volume 10, Number 4  
Pages 69-85  
ISSN: 2252-0449

# Economic Estimation of Polymeric Solar Cells Fabrication

Amirhosein Berendjchi, Ali Akbar Yousefi\*, and Samira Fallahdoost

Moghadam

Energy Division, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box 14975-112,  
Tehran, Iran

Received: 19 February 2020, Accepted: 12 May 2020

## Abstract

Polymeric solar cells are a relatively new generation of photovoltaics that have received much attention in recent years. Due to advantages such as the abundance of raw materials, the ability to produce in different colors according to customer demand, flexibility, light weight and low production cost, this generation of solar cells has a great potential for commercialization and production on large scale. In order to commercialize the polymer solar cells, it is important to evaluate the costs and economic aspects of their industrial production, and so far few studies have been done in this regard. In this paper, the costs of raw materials, production process and finally the installation and commissioning of electricity generating systems based on polymeric solar cells has been estimated. The results show that despite the lower efficiency of solar energy conversion into electrical energy in these systems, due to the adaptability of their manufacturing process with roll-to-roll printing, the cost is very low. Polymer solar cells also compete not only with commercial products in this field, such as silicon-based solar cells, but also with other electricity generating systems, such as wind and water-based systems.

## Key Words

polymeric solar cell,  
mass production,  
materials,  
fabrication process,  
module expenses

(\*) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: a.yousefi@ippi.ac.ir

## برآورد اقتصادی ساخت سلول‌های خورشیدی پلیمری

امیرحسین برنج‌چی، علی اکبر یوسفی\*، سمیرا فلاحدوست مقدم  
تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، هسته انرژی، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۳۰، پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۲۳

سلول‌های خورشیدی پلیمری نسل نسبتاً جدیدی از مبدل‌های فوتوولتایی هستند که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نسل از سلول‌های خورشیدی به دلیل مزیت‌هایی همچون فراوانی مواد خام اولیه، امکان تولید در رنگ‌های مختلف براساس خواست مشتری، انعطاف‌پذیری، وزن سبک و هزینه کم تولید، قابلیت بسیار زیادی را برای تجاری‌شدن و تولید در مقیاس صنعتی نشان می‌دهند. برای تجاری‌شدن سلول‌های خورشیدی پلیمری، هزینه تمام‌شده و ارزیابی جنبه‌های اقتصادی تولید صنعتی آن‌ها بسیار حائز اهمیت بوده و تاکنون مطالعات اندکی در این باره انجام شده است. در این مقاله، برآوردی از هزینه‌های مواد اولیه، فرایند تولید و در نهایت نصب و راه‌اندازی سامانه‌های تولیدکننده انرژی الکتریکی برپایه سلول‌های خورشیدی پلیمری انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، با وجود کم‌تر بودن بازده تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی در این سامانه‌ها، به دلیل سازگاری فرایند ساخت آن‌ها با چاپ رول‌به‌رول، هزینه تمام‌شده بسیار کم است. همچنین سلول‌های خورشیدی پلیمری، نه تنها با محصولات تجاری‌شده در این حوزه نظیر نوع سیلیکونی، بلکه با سایر سامانه‌های تولیدکننده انرژی الکتریکی نظیر سامانه‌های برپایه انرژی باد و آب نیز رقابت می‌کنند.

### چکیده



امیرحسین برنج‌چی



علی اکبر یوسفی



سمیرا فلاحدوست مقدم

### واژگان کلیدی

سلول خورشیدی پلیمری،  
تولید انبوه،  
مواد،  
فرایند ساخت،  
هزینه‌های مدول

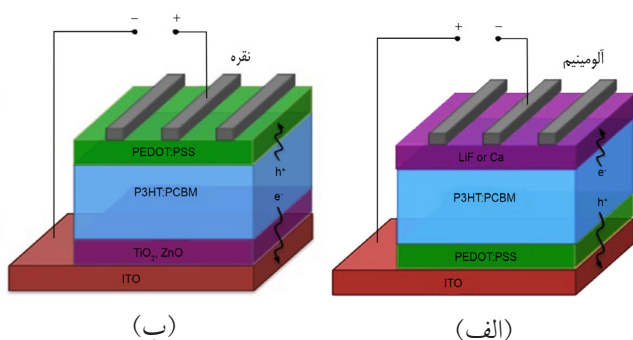
## مقدمه

با افزایش جمعیت جهان و همراه شدن آن با افزایش استانداردهای زندگی، نیاز به منابع انرژی پاک، تجدیدپذیر و ارزان قیمت احساس می‌شود. استفاده از منابع انرژی برپایه سوخت‌های فسیلی به دلیل آلوده سازی هوا و نشر گازهای گلخانه‌ای نظیر کربن دی‌اکسید، بشر را بر آن داشته است تا به دنبال استفاده از سایر منابع انرژی جایگزین باشد [۱]. انرژی خورشیدی منبع بسیار عظیم انرژی تجدیدپذیر است. مقدار انرژی خورشیدی که در طول ۱ h به سطح زمین می‌رسد، معادل  $4/3 \times 10^{20}$  J بوده که بیش از کل انرژی مصرفی انسان در طول ۱ yr، یعنی  $4/1 \times 10^{20}$  J است [۲]. با افزایش تقاضای جهانی برای تولید انرژی در راستای رفع نیازها، به تولید انرژی الکتریکی از انرژی خورشیدی با استفاده از مبدل‌های فوتوولتایی (سلول‌های خورشیدی) توجه زیادی شده است.

سلول‌های خورشیدی سیلیکونی از دیرباز به طور معمول استفاده شده‌اند و در حال حاضر نیز سهم عمده‌ای از محصولات تجاری به آن‌ها اختصاص دارد (۱۳٪ از بازار جهانی در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر و ۳٪ از بخش جهانی تولید انرژی)، ولی به علت معایبی نظیر گرانی سیلیکون، هزینه‌بری و پیچیدگی فرایند تولید سلول خورشیدی، وزن زیاد و شکنندگی (عدم انعطاف‌پذیری) دارای محدودیت‌هایی هستند [۳،۴]. در مقابل، فناوری‌های به نسبت نوظهور تبدیل انرژی مدنظر قرار گرفته‌اند که در آن‌ها برای تولید سلول‌های خورشیدی از مواد آلی و پلیمری استفاده می‌شود. در این فناوری‌ها، محصول نهایی به شکل ورقه‌های بسیار نازک و انعطاف‌پذیر است و برای ساخت سلول‌های خورشیدی از فرایندهای متداول و ارزان قیمت پوشش‌دهی و چاپ نظیر فرایند رول‌به‌رول استفاده می‌شود. استفاده از این فرایند دارای مزیت‌های فراوانی است و باعث می‌شود تا هزینه نهایی محصول به شدت کاهش یابد. از یک سو، مقدار مصرف مواد اولیه و بنابراین هزینه تولید محصول نهایی کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. همچنین، به دلیل مصرف کمتر مواد شیمیایی از لحاظ زیست محیطی نیز مشکلات کمتری به وجود می‌آید. از سوی دیگر، محصول تولیدی به علت وزن سبک، انعطاف‌پذیری و همچنین هزینه‌بری کم از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه بوده و با سلول‌های خورشیدی سیلیکونی قابل رقابت است که وزن زیادی دارند و سخت و شکننده هستند [۵].

در سلول‌های خورشیدی پلیمری در قسمت لایه فعال برای جذب نور، تولید حامل‌های بار (زوج الکترون-حفره) و در نهایت جداسازی آن‌ها و تولید جریان الکتریکی، از مواد پلیمری استفاده

می‌شود. معمولاً دو ساختار کلی عادی و معکوس (شکل ۱) برای این سلول‌ها وجود دارد [۳]. در ساختار عادی، قطب مثبت، محل جمع‌آوری حفره، متشکل از زیرلایه پوشش‌یافته با اکسید فلزی شفاف و رسانا، مانند قلع اکسید دوپه شده با ایندیم (ITO) است. از پلیمر نیمه‌رسانای الکترون‌دهنده نظیر پلی (۳-هگزیل تیوفن) (P3HT) و ترکیب آلی الکترون‌گیرنده مانند فنیل- $C_{61}$ -بوتیریک اسید متیل استر (PCBM) برای انتقال حفره‌های استخراج شده از لایه فعال به زیرلایه و همچنین در لایه فعال روی زیرلایه از یک لایه انتقال‌دهنده حفره، معمولاً پلیمر پلی (۴،۳-اتیلن دی اکسی تیوفن)-پلی (استیرن سولفونات) (PEDOT:PSS) استفاده می‌شود [۴،۶]. در الکتروود مقابل (قطب منفی) از یک فلز با تابع عملکرد کم (نظیر آلومینیم) استفاده شده است. کار این الکتروود، دریافت الکترون از لایه فعال و وارد کردن الکترون به مدار خارجی است که به واسطه آن در درون سلول جریان الکتریکی برقرار می‌شود. به دلیل pH اسیدی پلیمر PEDOT:PSS و در نتیجه حاکاکی پروتون (proton etching) از لایه ITO، همچنین سرعت زیاد اکسایش فلز آلومینیم در مجاورت هوا و برای افزایش پایداری سلول، از ساختار معکوس استفاده می‌شود [۶]. در این ساختار، محل قطب‌های مثبت و منفی جابه‌جا شده و به عبارتی الکترون‌ها در آند، قسمتی از سلول زیرلایه پوشش‌یافته با ITO و حفره‌های قسمت کاتد جمع‌آوری می‌شوند. تفاوت ساختار معکوس با ساختار عادی در این است که لایه انتقال‌دهنده حفره (PEDOT:PSS) به قسمت بالایی سلول انتقال می‌یابد. همچنین، روی زیرلایه از یک لایه انتقال‌دهنده الکترون و مسدودکننده حفره، استفاده می‌شود. معمولاً از اکسیدهای فلزی نظیر روی اکسید (ZnO) یا تیتانیوم دی‌اکسید ( $TiO_2$ ) به عنوان لایه انتقال‌دهنده الکترون استفاده می‌شود. تفاوت دیگر، استفاده از یک فلز با تابع عملکرد زیاد (نظیر نقره) در قسمت بالایی سلول (لایه کاتد) است [۷،۸].



شکل ۱- ساختار سلول‌های خورشیدی پلیمری: (الف) عادی و (ب) معکوس [۸].

در این مطالعه، هدف اصلی بررسی تمام هزینه‌های یک سامانه خورشیدی پلیمری، از ساخت تا نصب و راه‌اندازی و طول دوره مصرف آن است. به دلیل آنکه این نوع سامانه‌ها تاکنون در داخل کشور به عنوان محصول تجاری وجود نداشته یا هیچ تولیدکننده‌ای اقدام به تولید گسترده آن‌ها نکرده است، از این رو براساس گزارش‌های موجود از اطلاعات تولیدکنندگان خارج کشور برای ارزیابی جنبه‌های اقتصادی این سامانه‌ها استفاده شده است.

### برآورد اقتصادی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، به دلیل سازگاری فرایند تولید سلول‌های خورشیدی پلیمری با چاپ رول‌به‌رول، هزینه تولید مدول خورشیدی به شدت کاهش می‌یابد. هزینه برآوردشده تجهیزات مورد نیاز برای ساخت مدول‌های خورشیدی پلیمری بسیار کمتر از سایر فناوری‌های ساخت سلول‌های خورشیدی است. در واقع، ساخت یک واحد تولید مدول‌های پلیمری با ظرفیت تولید  $200/000 \text{ m}^2/\text{yr}$  با بازده تولید ۹۵٪، هزینه‌ای در حدود نیم میلیون یورو دربر دارد. با فرض این که بازده سلول در حدود ۵٪ باشد، این مبلغ معادل با نیم میلیون یورو به ازای هر مگاوات حداکثر ظرفیت سالانه است [۱۱]. برای مقایسه، میزان سرمایه‌گذاری در فناوری‌های ساخت سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک معدنی در حدود  $3/28 \text{ MME}/\text{MW}$  حداکثر ظرفیت سالانه است [۱۲] که نسبت به تولید نوع پلیمری در حدود ۵۵٪ بیشتر است. Azzopardi و همکاران (۲۰۱۱) [۱۳] هزینه‌های تولید یک مدول خورشیدی پلیمری در مقیاس نیمه‌صنعتی را گزارش کرده‌اند. در پژوهش انجام‌شده برای ارزیابی هزینه‌های مدول خورشیدی از فرایند ProcessOne و چاپ رول‌به‌رول برای ساخت سلول‌های خورشیدی استفاده شده است. در فرایند ProcessOne از زیرلایه انعطاف‌پذیر فیلم پلی‌استری پوشش‌یافته با ITO استفاده شده است. ۴ لایه، لایه روی اکسید به عنوان انتقال‌دهنده الکترون، P3HT:PCBM به عنوان لایه فعال، PEDOT:PSS به عنوان انتقال‌دهنده حفره و جوهر نقره به عنوان کاتد، به طور پی‌اپی روی آن چاپ می‌شوند. جدول ۱ هزینه‌های مواد و شکل ۳ درصد هزینه مواد را برای تولید یک مدول خورشیدی با ظرفیت تولید  $1 \text{ kW.h}$  برق با استفاده از این فرایند نشان می‌دهد.

ملاحظه می‌شود، اکثر هزینه‌های مواد مربوط به زیرلایه پوشش‌یافته با ITO (۳۸٪ تا ۵۱٪) است. بنابراین، به دلیل کمیابی فلز ایندیم و هزینه زیاد آن، در صورتی که برای تولید مدول از ITO به عنوان لایه شفاف و رسانا استفاده شود، هزینه‌های تولید



(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۲- کاربرد سلول‌های خورشیدی پلیمری در: (الف) نمای ساختمان، (ب) سقف اتومبیل، (پ) منسوجات و (ت) چادرهای نظامی [۹].

در سال‌های اخیر با گسترش سریع فناوری‌های مدرن، تجهیزات الکترونیکی انعطاف‌پذیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. از آنجا که این دسته از تجهیزات وزن سبکی دارند، قابل حمل بوده و می‌توان آن‌ها را خم کرد. بنابراین، دامنه کاربرد این تجهیزات بسیار گسترده است و می‌توان از آن‌ها در بسیاری از حوزه‌ها استفاده کرد که امکان به‌کارگیری تجهیزات سخت و شکننده وجود ندارد. سلول‌های خورشیدی پلیمری یا فوتوولتایی آلی (organic photovoltaics, OPV) به دلیل مزیت‌هایی که پیش‌تر به آن‌ها اشاره شد، قابلیت بسیار زیادی را برای کاربرد در این حوزه‌ها نشان داده‌اند. تاکنون موارد متعددی از به‌کارگیری این سلول‌های خورشیدی در نمای ساختمان، سقف اتومبیل، منسوجات و پوشاک و چادرهای صحرایی گزارش شده است (شکل ۲) [۹، ۱۰].

مهم‌ترین پرسش در راستای تضمین موفقیت سلول‌های خورشیدی پلیمری در بازار تجاری به عنوان تجهیزات تولید انرژی این بوده که هزینه تولید یک مدول سلول خورشیدی چقدر است. همچنین، پس از نصب و راه‌اندازی سامانه خورشیدی، مقدار انرژی الکتریکی تولیدی این سامانه در طول دوره مصرف خود چه هزینه‌ای را دربر خواهد داشت. تاکنون مطالعات اندکی درباره ارزیابی هزینه‌های مواد اولیه، تولید و نصب و راه‌اندازی سامانه‌های تولیدکننده انرژی الکتریکی برپایه سلول‌های خورشیدی پلیمری انجام شده است.

جدول ۲- هزینه‌های تولید مدول خورشیدی پلیمری در مقیاس نیمه‌صنعتی [۱۳].

| قیمت (€/m <sup>2</sup> ) |       | نوع هزینه                    |
|--------------------------|-------|------------------------------|
| حداکثر                   | حداقل |                              |
| ۱۵۴/۷۰                   | ۴۰/۷۱ | مواد                         |
| ۱/۰۸                     | ۰/۴۹  | انرژی مصرفی در فرایند تولید  |
| ۳/۹۳                     | ۳/۹۳  | تجهیزات ساخت                 |
| ۵/۳۲                     | ۵/۳۲  | نیروی انسانی                 |
| ۹/۴۳                     | ۶/۹۷  | هزینه سربار                  |
| ۱۷۴/۴۵                   | ۵۷/۴۲ | کل هزینه مدول                |
| ۱۷/۴۴                    | ۵/۷۴  | هزینه‌های متغیر              |
| ۱۹۱/۸۹                   | ۶۳/۱۶ | هزینه نصب و راه‌اندازی (BOS) |

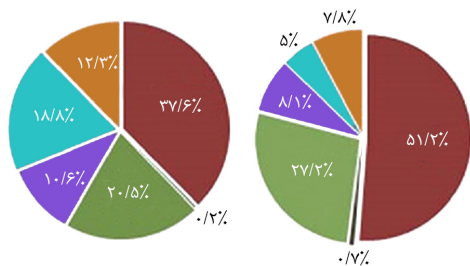
پوشش یافته) هزینه یک مدول در حدود ۴/۰۹-۱/۳۵ €/wp است [۱۳]. ظرفیت تولید انرژی دیواره‌های خورشیدی با واحد wp بیان می‌شود که نشانگر حداکثر ظرفیت انرژی الکتریکی تولیدی به وسیله سامانه خورشیدی در شرایط آرمانی در طول دوره مصرف آن است. با بسط این تحلیل برای یک سامانه تولیدکننده ۱ kW که به مدت ۲۵ yr به کار رود و در تولید سامانه از مدول‌هایی با بازده ۷٪ و طول عمر ۵ yr استفاده شود، هزینه کل سامانه در حدود ۱۶/۲۷۰-۶/۰۱۹ خواهد بود. براساس مقادیر یادشده ملاحظه می‌شود، تولید سامانه خورشیدی پلیمری با قیمت کم به شدت به هزینه مواد اولیه و نه هزینه‌های فرایند تولید وابسته است. با توجه به اینکه در گزارش Azzopardi و همکاران از مواد گران‌قیمت در تولید مدول استفاده شده و همچنین مقادیر گزارش شده برای تولید سلول در مقیاس نیمه‌صنعتی است، افزایش حجم تولید به یقین

جدول ۱- هزینه‌های مواد مصرفی در ساخت مدول خورشیدی پلیمری در مقیاس نیمه‌صنعتی [۱۳].

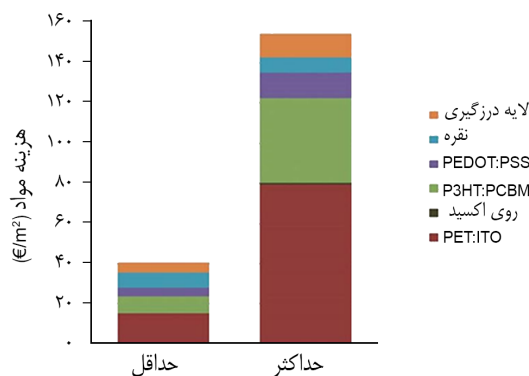
| هزینه (€/m <sup>2</sup> ) |       | ماده-زیرلایه                       |
|---------------------------|-------|------------------------------------|
| حداکثر                    | حداقل |                                    |
| ۷۹/۲۴                     | ۱۵/۳۲ | زیرلایه پلی‌استر پوشش یافته با ITO |
| ۱/۰۸                      | ۰/۰۷  | روی اکسید                          |
| ۴۲/۰۶                     | ۸/۳۶  | لایه فعال (P3HT:PCBM)              |
| ۱۲/۵۷                     | ۴/۳۰  | PEDOT:PSS                          |
| ۷/۶۷                      | ۷/۶۷  | نقره                               |
| ۱۲/۰۸                     | ۵/۰۰  | لایه درزگیری                       |
| ۱۵۴/۷۰                    | ۴۰/۷۱ | جمع کل                             |

مدول افزایش پیدا می‌کند. حتی گزارش شده است، بیشترین مقدار مصرف انرژی در خط تولید سلول‌های خورشیدی پلیمری به لایه ITO اختصاص دارد. در نتیجه، استفاده از سایر مواد جایگزین ITO می‌تواند به طور چشمگیر هزینه‌های تولید سلول خورشیدی را کاهش دهد. پس از زیرلایه پوشش یافته با ITO، لایه فعال (۲۱٪ تا ۲۷٪) و در نهایت الکتروود کاتد نقره (۵٪ تا ۱۹٪) بیشترین سهم را در هزینه مواد اولیه دارند [۱۴].

کلیه هزینه‌های تولید مدول خورشیدی در جدول ۲ ارائه شده است. این هزینه‌ها افزون بر هزینه مواد، شامل مقدار انرژی مصرفی در خط تولید، هزینه خرید تجهیزات، هزینه کارگر و همچنین مخارج کلی است. براساس این برآورد، کل هزینه‌های تولید یک مدول خورشیدی پلیمری بین ۱۹۱/۸۹-۶۳/۱۶ €/m<sup>2</sup> و عمده هزینه‌ها مربوط به مواد اولیه آن است. با فرض بازده تبدیل انرژی ۷٪ برای مدول و سطح فعال ۶۷٪ (سطحی از مدول که با مواد

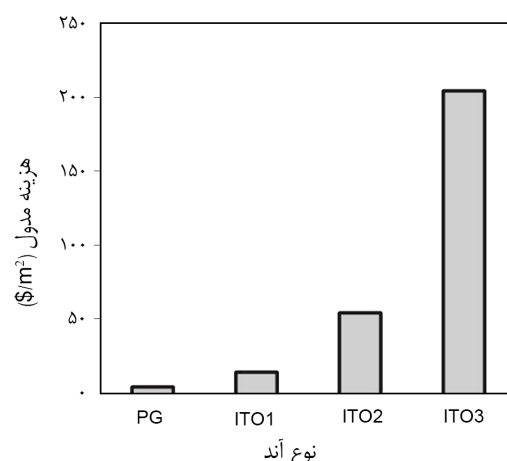


(ب)



(الف)

شکل ۳- هزینه‌های: (الف) دقیق و (ب) نسبی مواد برای تولید مدول سلول خورشیدی [۱۳].



شکل ۴- مقایسه هزینه مدول با ۴ نوع الکترود آند مختلف: PG=ترکیب PEDOT:PSS و نقره، ITO1=الکترود با مقاومت  $400 \Omega/\square$ ، ITO2=الکترود با مقاومت  $60 \Omega/\square$  و ITO3=الکترود با مقاومت  $6 \Omega/\square$  [۱۶].

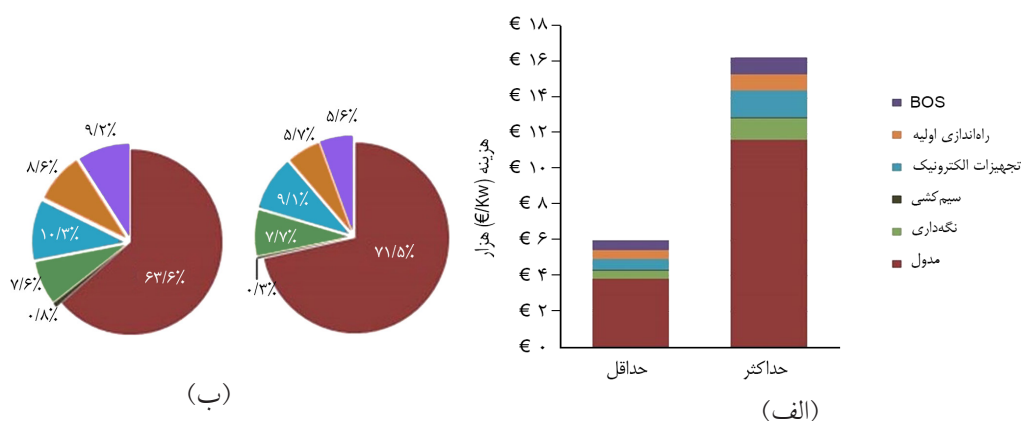
هزینه مواد را کاهش می‌دهد. از طرفی، جایگزینی مواد گران‌قیمت (نظیر ITO) با مواد ارزان‌تر، هزینه‌های تولید را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد [۱۳].

شکل ۴ مقایسه قیمت تمام‌شده مدول‌های ساخته‌شده با انواع زیرلایه‌های ITO با رسانندگی‌های الکتریکی متفاوت را با مدولی نشان می‌دهد که در ساخت آن از ترکیب PEDOT:PSS و شبکه نقره استفاده شده است. در مقایسه با PEDOT:PSS و شبکه نقره، استفاده از ITO با رسانندگی الکتریکی به نسبت کم تا ۳۰۰ برابر و همچنین ITO با رسانندگی الکتریکی زیاد تا ۳۰۰۰ برابر (معادل با  $16-206 \$/m^2$ ) هزینه نهایی ساخت مدول را افزایش می‌دهد. بنابراین، ضرورت جایگزینی ITO با مواد ارزان‌قیمت‌تر برای کاهش هزینه‌ها و توجیه اقتصادی تولید مدول‌های خورشیدی پلیمری مشخص می‌شود. موادی که می‌توان به‌عنوان جایگزین ITO از

آن‌ها استفاده کرد، عبارت از نانولوله‌های کربن، گرافن، ترکیبات فلزی (اعم از نانوذرات، نانوسیم‌ها و غیره)، پلیمرهای رسانا و ترکیب پلیمرهای رسانا و ساختارهای شبکه‌ای فلزات هستند [۱۵]. برای راه‌اندازی یک سامانه خورشیدی افزون بر مدول نیاز به ملاحظات است که باید هزینه‌های مربوط به آن‌ها نیز لحاظ شود. این هزینه‌ها تحت عنوان توازن سامانه (balance of system, BOS) شناخته شده و وابسته به عواملی همچون نوع سامانه و محل نصب آن است. تجهیزات الکترونیکی استفاده‌شده برای نصب مدول خورشیدی شامل مبدل، تابلو برق (switchgear) و کنتور و هزینه‌های راه‌اندازی شامل هزینه راه‌اندازی اولیه، سیم‌کشی، سوارکردن و همچنین سایر هزینه‌ها نظیر تعویض مدول هستند که تمام آن‌ها بخشی از هزینه‌های BOS به‌شمار می‌روند. در شکل ۵ نسبت کلیه هزینه‌های یک سامانه خورشیدی پلیمری، از تولید تا مصرف آن نشان داده شده است. مشخص است، عمده هزینه‌ها مربوط به تولید مدول است. در رویکردهای اقتصادی، محاسبه هزینه‌های تولید انرژی در مدت زمان دوره مصرف یک سامانه تولیدکننده انرژی بسیار حائز اهمیت است. متداول‌ترین روش برای برآورد هزینه تولید برق یک سامانه خورشیدی، روش هزینه تراز شده انرژی (levelized cost of energy, LCOE) است. این روش مبتنی بر محاسبه ارزش فعلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری تولید برق در کل دوره عمر سامانه خورشیدی بوده و معیار مناسبی برای مقایسه مقدار هزینه تولید انرژی سامانه‌های مختلف خورشیدی با یکدیگر است (معادله ۱) [۱۷]:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n (It + (O\&M)t + Ft + Ct)}{\sum_{t=1}^n Et} \quad (1)$$

در این معادله،  $It$  هزینه سرمایه‌گذاری در سال  $t$  ( $O\&M$ )  $t$  ( $\$/kW$ )، هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری در



شکل ۵- هزینه‌های: (الف) دقیق و (ب): نسبی تولید و راه‌اندازی یک سامانه مدول خورشیدی پلیمری [۱۳].

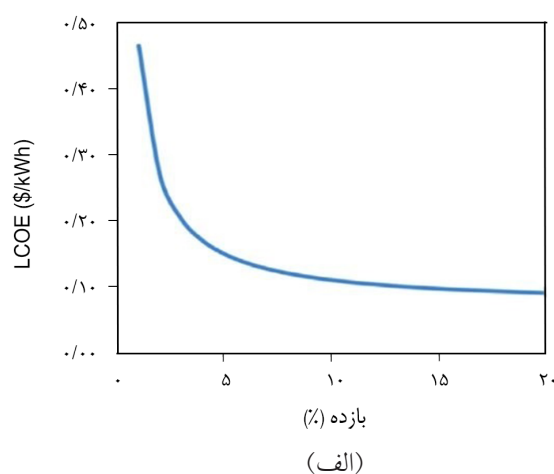
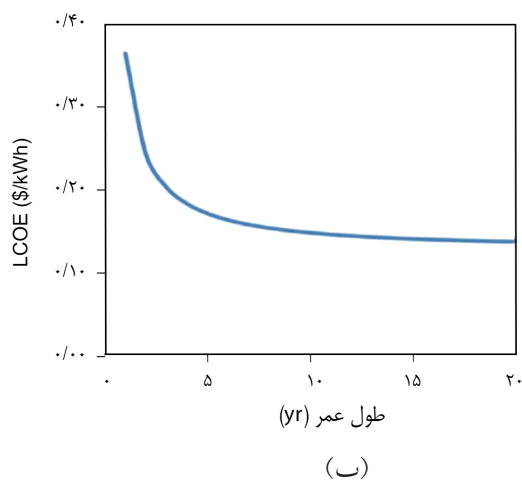


روش‌های متفاوت برای ارزیابی هزینه‌های ساخت مدول استفاده شده است. از طرفی، حجم تولید مدول‌ها در مقیاس نیمه‌صنعتی بوده و برای انجام مقایسه LCOE مدول‌های پلیمری با نوع تجاری نیاز به دانستن هزینه‌ها برای مقیاس صنعتی تولید مدول است. در مطالعه Mugillan و همکاران (۲۰۱۵) [۱۷]، هزینه‌های LCOE مدول‌های خورشیدی پلیمری تولیدی در مقیاس صنعتی بررسی شده‌اند. در شکل ۶، اثر بازده و طول عمرهای مختلف مدول‌های خورشیدی بر LCOE نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، مقادیر بحرانی برای بازده و طول عمر مدول به ترتیب ۶-۵ و ۶-۵ yr است. در جدول ۴، LCOE مدول‌های پلیمری تولیدشده در مقیاس صنعتی با بازده و طول عمرهای متفاوت، مقایسه شده‌اند. براساس این جدول، LCOE کمتر از  $0.2 \text{ \$/kW.h}$  برای مدولی که به تنهایی دارای بازده تبدیل انرژی زیاد یا طول عمر زیاد است یا ترکیب هم‌زمان این دو عامل (بازده و طول عمر) در مقادیر متوسط، قابل دسترس است. با توجه به جدول ۴ بازده تبدیل انرژی ۲٪ و طول عمر ۲ yr برای تولید یک مدول پلیمری با LCOE کمتر از  $0.35 \text{ \$/kW.h}$  مناسب است. برای مدول خورشیدی پلیمری با طول عمر ۵ yr، بازده ۷٪ و میانگین  $1700 \text{ kW.h/m}^2$  تابش سالانه نور خورشید به سطح مدول، هزینه LOCE در حدود  $0.19-0.5 \text{ \$/kW.h}$  تولید برق مدول تخمین زده شده است [۱۷]. در شکل ۷ مقایسه LCOE میان سامانه‌های مختلف تولیدکننده انرژی الکتریکی در دو مطالعه مختلف ارائه شده است. اگرچه در حال حاضر هزینه تولید انرژی الکتریکی با سامانه‌های مبتنی بر سلول‌های خورشیدی پلیمری با سامانه‌های برپایه انرژی باد و ایستگاه‌های تأمین برق تجاری قابل رقابت نیست، ولی با در نظر گرفتن روند رو به رشد پیشرفت‌های فنی در بهبود بازده سلول‌های پلیمری

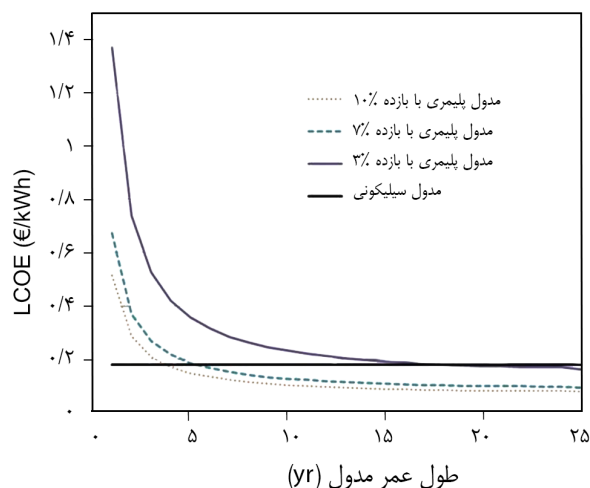
جدول ۳- خلاصه هزینه ترازشده انرژی (LCOE) تخمین زده شده برای دو مدول خورشیدی پلیمری.

| فرضیات                                                                                                                                                                     | (\$/kW.h)<br>LCOE | مرجع |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------|
| هزینه مدول $49-139 \text{ \$/m}^2$<br>هزینه BOS $75 \text{ \$/kW}$<br>میزان تابش خورشید<br>$1700 \text{ kW.h/m}^2.\text{yr}$<br>بازده ۵٪، طول عمر ۵ yr، نرخ بهره ۱۰٪       | $0.49-0.85$       | ۱۸   |
| هزینه مدول $87-264 \text{ \$/m}^2$<br>هزینه BOS $1670-3238 \text{ \$/kW}$<br>میزان تابش خورشید<br>$1700 \text{ kW.h/m}^2.\text{yr}$<br>بازده ۷٪، طول عمر ۵ yr، نرخ بهره ۷٪ | $0.25-0.65$       | ۱۹   |

سال  $t$  ( $\text{\$/kW}$ )  $F_t$  هزینه سوخت در سال  $t$  ( $\text{\$/MW.h}$ )  $C_t$  هزینه انتشار کربن در سال  $t$  ( $\text{\$/t}_{\text{emitted CO}_2}$ )  $E_t$  برق تولید سالانه در سال  $t$  ( $\text{kW.h}$ ) و  $t$  معادل سال است. در حال حاضر، LCOE سامانه‌های خورشیدی تجاری و متداول در محدوده  $0.16-0.29 \text{ \$/kW.h}$  و برای سامانه‌های تولیدکننده انرژی از منابع تجدیدناپذیر (نظیر زغال‌سنگ، گاز یا انرژی هسته‌ای)  $0.09-0.25 \text{ \$/kW.h}$  است [۱۷]. در جدول ۳ مقادیر LCOE مطالعه‌شده برای مدول‌های خورشیدی پلیمری تولیدشده در مقیاس نیمه‌صنعتی نشان داده شده است. با توجه به جدول ۳، امکان مقایسه هزینه تولید انرژی میان دو مدول تولیدشده وجود ندارد، چراکه در هر دو مطالعه انجام‌شده از



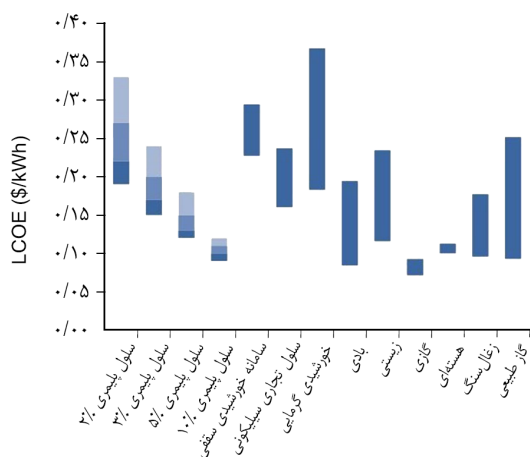
شکل ۶- اثر: (الف) بازده و (ب) طول عمر مدول پلیمری بر LCOE [۱۷].



شکل ۸- مقادیر LCOE برای مدول‌های پلیمری با بازده‌های مختلف. برای مقایسه مقادیر LCOE مدول‌های سیلیکونی نیز ارائه شده است [۱۳].

نیمه صنعتی ارائه شده است. یک سلول پلیمری با بازده ۳٪ باید طول عمر ۱۵ yr داشته باشد تا با یک سلول خورشیدی سیلیکونی رقابت کند. از سوی دیگر، برای مدول پلیمری با طول عمر کمتر از ۱ yr که دارای بازده ۷٪ یا بیشتر باشد، رقابت با سلول خورشیدی سیلیکونی امکان پذیر است [۱۳].

براساس اکثر مطالعات انجام شده، مدول‌های خورشیدی پلیمری با بازده کم یا طول عمر کم، حتی در مقیاس کم تولید و با قیمت کنونی آن، به دلیل مزایایی همچون فرایند ساده تولید، سازگاری با چاپ رول به رول و نیز کمی سرمایه اولیه مورد نیاز برای راه اندازی خط تولید آن‌ها قابلیت رقابت با سلول‌های سیلیکونی تجاری را دارند [۱۳، ۱۷، ۲۰]. براساس مقایسه هزینه اولیه مورد



(ب)

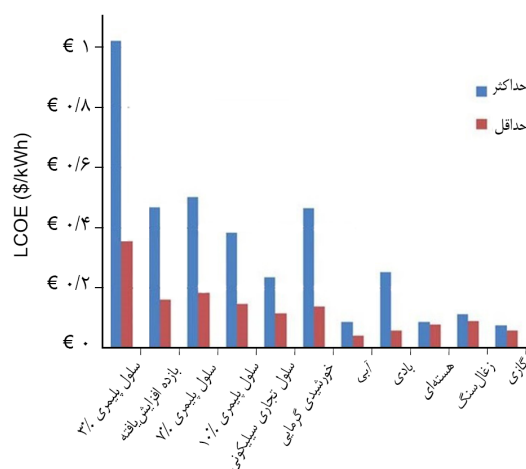
جدول ۴- اثر بازده و طول عمرهای مختلف مدول‌های پلیمری بر LCOE برحسب \$/kWh. قسمت‌های رنگی مربوط به حد آستانه هزینه LCOE است [۱۷].

| طول عمر (yr) | بازده (%) |      |      |      |      |      |
|--------------|-----------|------|------|------|------|------|
|              | ۱۰        | ۵    | ۴    | ۳    | ۲    | ۱    |
| ۱            | ۰/۱۶      | ۰/۲۵ | ۰/۲۹ | ۰/۳۷ | ۰/۵۱ | ۰/۹۵ |
| ۲            | ۰/۱۲      | ۰/۱۸ | ۰/۲۰ | ۰/۲۴ | ۰/۳۳ | ۰/۵۹ |
| ۳            | ۰/۱۱      | ۰/۱۵ | ۰/۱۷ | ۰/۲۰ | ۰/۲۷ | ۰/۴۷ |
| ۴            | ۰/۱۱      | ۰/۱۴ | ۰/۱۶ | ۰/۱۸ | ۰/۲۴ | ۰/۴۱ |
| ۵            | ۰/۱۰      | ۰/۱۳ | ۰/۱۵ | ۰/۱۷ | ۰/۲۲ | ۰/۳۷ |
| ۱۰           | ۰/۰۹      | ۰/۱۲ | ۰/۱۳ | ۰/۱۵ | ۰/۱۹ | ۰/۳۰ |

■ LCOE بیش از ۰/۳۵، □ LCOE میان ۰/۲ و ۰/۳۵ و ▨ LCOE کمتر از ۰/۲

می توان نتیجه گرفت، LCOE سامانه‌های خورشیدی پلیمری با سایر سامانه‌های خورشیدی قابل رقابت است [۱۷].

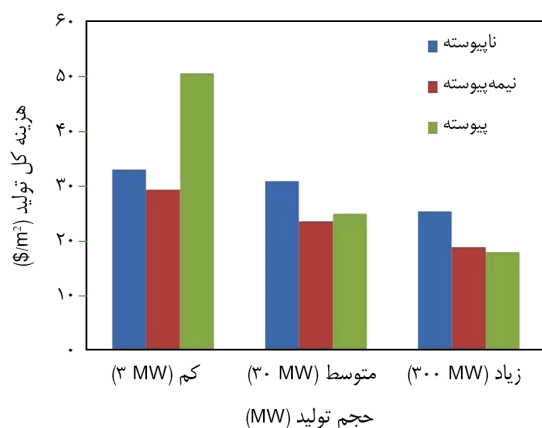
سؤال اصلی که درباره فناوری‌های تولید سلول‌های خورشیدی پلیمری مطرح است، اینکه چه طول عمری برای مدول لازم است تا فناوری تولید آن با سایر فناوری‌های تولید دیگر نسل‌های سلول‌های خورشیدی قابل رقابت تجاری باشد. تولید برق در مدت زمان زیاد نیاز به قیمت رقابتی مناسبی دارد. به منظور بررسی اثر طول عمر مدول سلول‌های پلیمری، عامل LCOE آن‌ها به عنوان تابعی از طول عمر مدول (Lm) برای انواع بازده‌ها بررسی و با سلول خورشیدی برپایه ویفر سیلیکونی مقایسه شده است (شکل ۸). لازم به توضیح است، این مقادیر برای تولید مدول‌ها در مقیاس



(الف)

شکل ۷- مقایسه LCOE در سامانه‌های مختلف تولید انرژی الکتریکی: (الف) مرجع ۱۳ و (ب) مرجع ۱۷.





شکل ۹- هزینه‌های کل تولید مدول پلیمری در مقیاس‌های مختلف تولید [۲۱].

۳ MW)، متوسط (فرایند نیمه پیوسته خودکار، automated semi continuous، با ظرفیت ۳۰ MW) و زیاد (فرایند پیوسته خودکار، automated continuous، با ظرفیت ۳۰۰ MW) مقایسه شده است (شکل ۹). مقدار انرژی تولیدی سامانه‌های خورشیدی در هریک از فرایندها به ترتیب ۲۰، ۶۰ و  $100 \text{ W/m}^2$  گزارش شده است. با توجه به شکل ۹ واضح است، با افزایش حجم تولید، هزینه نهایی کاهش پیدا می‌کند. کاهش هزینه تولید ناشی از کم شدن هزینه‌های ثابت و نیز کاهش چشمگیر قیمت خرید مواد اولیه است، در صورتی که حجم زیادی از آن‌ها خریداری شود. همچنین، با مقایسه دو فرایند خودکار نیمه پیوسته و پیوسته ملاحظه می‌شود، هزینه‌های تولید در این دو روش تفاوت چندانی ندارند و هر دو از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌اند [۲۱].

Mulligan و همکاران (۲۰۱۴) [۱۶] با ارائه مدلی، هزینه‌های تخمین زده شده برای ساخت مدول‌های خورشیدی پلیمری را کمتر از سایر مقادیر گزارش شده اعلام کرده‌اند. براساس این گزارش، هزینه کل یک مدول خورشیدی پلیمری در حدود  $7/85 \text{ $/m}^2$  تخمین زده شده است. در این پژوهش ادعا شده است، هزینه کل مدول بیشترین حساسیت را به قیمت زیرلایه پلاستیکی به کاررفته دارد. علت کمربودن برآورد هزینه‌های سلول خورشیدی نسبت به سایر پژوهش‌های انجام شده حجم تولید سلول ذکر شده است. در پژوهش‌های گذشته، حجم تولید در مقیاس کم ارزیابی شده و طبیعتاً هزینه مواد و همچنین تولید مدول نسبت به این پژوهش که تمام مقادیر در مقیاس انبوه و صنعتی لحاظ شده بیشتر است. در پژوهش Mulligan از ساختار عادی برای سلول خورشیدی استفاده شده و زیرلایه بدون ITO است (شکل ۱۰). به جای ITO

جدول ۵- هزینه تولید و هزینه مورد نیاز برای سرمایه‌گذاری اولیه در تولید مدول‌های خورشیدی [۲۱].

| نوع مدول            | هزینه تولید (\$/W) | سرمایه‌گذاری اولیه (\$/W) |
|---------------------|--------------------|---------------------------|
| سیلیکونی (چندبلوری) | ۱/۳۱               | ۳/۲۸                      |
| سیلیکونی (تک‌بلوری) | ۱/۲۸               | ۳/۲۰                      |
| پلیمری              | ۱/۰۰               | ۲/۵۰                      |

نیاز سرمایه‌گذاری تولید سلول‌های خورشیدی تجاری سیلیکونی و پلیمری (جدول ۵)، ملاحظه می‌شود، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای تولید مدول‌های تجاری سیلیکونی در حدود  $3/20 \text{ $/W}$  بوده، درحالی که این هزینه برای مدول‌های خورشیدی پلیمری تنها  $2/50 \text{ $/W}$  است [۲۱].

در شکل ۷-ب، اثر تولید تجاری مدول‌های خورشیدی پلیمری بر LCOE ارائه شده است. ملاحظه می‌شود، LCOE به طور چشمگیری نسبت به تخمین‌های انجام شده در مطالعات در مقیاس نیمه صنعتی ( $0/85-0/25 \text{ $/kW.h}$ ) [۱۸، ۱۹] کاهش می‌یابد. همچنین مشخص است، مدول پلیمری با بازده تبدیل انرژی ۲٪ و طول عمر ۳ yr با مدول‌های تجاری و متداول سیلیکونی قابل رقابت است. در صورتی که بازده تبدیل انرژی مدول بیش از ۵٪ باشد، LCOE آن با سامانه‌های تولید انرژی از منابع گاز و زغال‌سنگ نیز قابل رقابت است. براساس مطالب پیش گفته، برای مدول پلیمری با بازده تبدیل انرژی ۳٪ و طول عمر ۳ yr، مقدار LCOE در حدود  $0/2 \text{ $/kW.h}$  تخمین زده می‌شود. همچنین، در صورتی که بازده تبدیل انرژی مدول ۵٪ و طول عمر آن ۵ yr باشد، مقدار LCOE به  $0/13 \text{ $/kW.h}$  خواهد رسید. این موضوع نشان می‌دهد، ساخت انبوه و صنعتی مدول‌های خورشیدی پلیمری باعث تولید تجهیزات تأمین‌کننده انرژی الکتریکی قابل رقابت با سایر تجهیزات متداول تجاری برپایه ویفرهای سیلیکونی می‌شود [۱۷].

افزایش حجم تولید سلول، به طور محسوس باعث کاهش هزینه مواد اولیه، فرایند تولید و در نتیجه قیمت تمام شده سامانه خورشیدی می‌شود. در پژوهش Lo و همکاران (۲۰۱۲) [۲۱] هزینه‌های تولید سلول‌های خورشیدی پلیمری در سه مقیاس کم (فرایند ناپیوسته نیمه خودکار، semi-automated batch، با ظرفیت

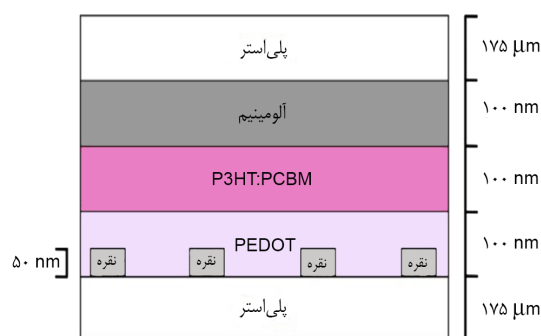
جدول ۶- مقادیر حداقل، حداکثر و محاسبه شده هزینه‌های تولید صنعتی مدول پلیمری [۱۶].

| حداکثر هزینه<br>(\$/m <sup>2</sup> ) | هزینه محاسبه شده<br>(\$/m <sup>2</sup> ) | حداقل هزینه<br>(\$/m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| ۱۰/۲۰                                | ۷/۸۵                                     | ۵/۵۰                                |

عمر این دسته از سلول‌های خورشیدی، به یقین به دلیل هزینه کم تولید، قیمت فروش آن‌ها در مقایسه با سایر سلول‌های خورشیدی سیلیکونی تجاری کمتر است. این موضوع به مصرف‌کننده‌ای که توان مالی خرید سلول‌های سیلیکونی را ندارد، امکان استفاده از این سلول‌ها را می‌دهد. این مسئله قابلیت این نسل از سلول‌های خورشیدی را برای کاربرد در مناطق حومه شهرهای بزرگ یا روستاها و مناطق دورافتاده نشان می‌دهد [۱۶].

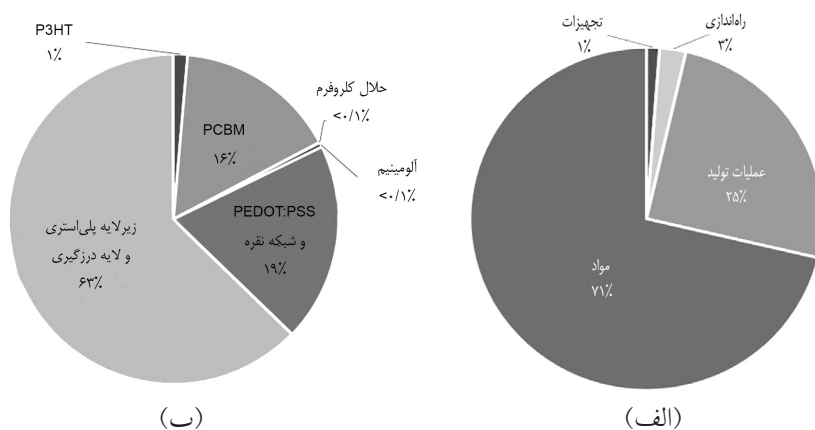
در شکل ۱۱ مقادیر نسبی هزینه مواد و فرایند تولید صنعتی مدول خورشیدی نشان داده شده است. مشخص است، عمده هزینه‌های تولید مدول به ازای هر متر مربع مربوط به هزینه مواد و پس از آن هزینه‌های عملیاتی است که در حدود ۲۵٪ از کل هزینه‌ها را تشکیل می‌دهد. بنابراین، با توجه به درصد هزینه مواد نسبت به کل هزینه‌های تولید مدول، با وجود اینکه در فرایند تولید مدول‌های خورشیدی پلیمری از مواد گران‌قیمتی استفاده می‌شود، ولی در صورتی که مدول در ابعاد صنعتی تولید شود، تنها ۲۰٪ از کل هزینه مواد به مواد ویژه و گران‌قیمت اختصاص می‌یابد. در حقیقت، عمده هزینه مواد اولیه مربوط به زیرلایه پلی‌استری و همچنین لایه استفاده شده برای آب‌بندی مدول است که تقریباً دوسوم هزینه‌های تولید مدول به آن اختصاص دارد [۱۶].

در شکل ۱۲ نمودارهای تحلیل حساسیت هزینه نهایی مدول

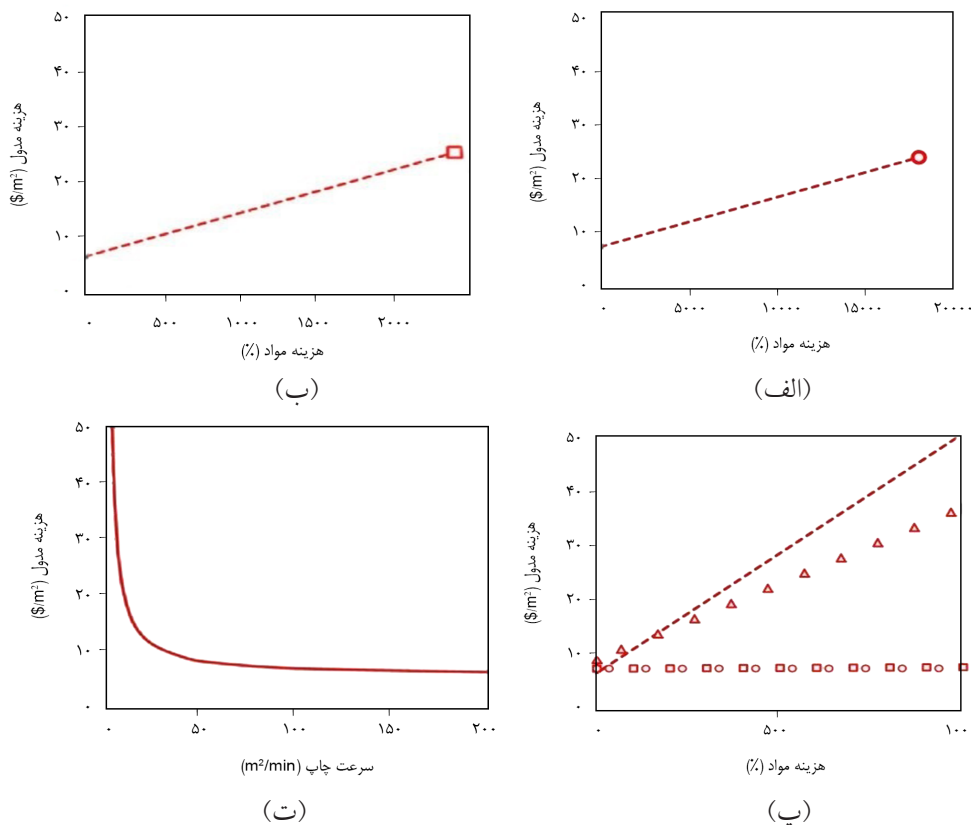


شکل ۱۰- نمایشی از ساختار مدول تولید شده در مرجع ۱۶.

از ترکیب پلیمر PEDOT:PSS و شبکه نقره بهره‌گیری شده و فرایند ساخت نیز برپایه روش رول‌به‌رول و در مقیاس صنعتی بوده است. همچنین در خط تولید از ۳ چاپگر مجزا برای چاپ شبکه نقره، پلیمر PEDOT:PSS و لایه فعال استفاده شده است. جدول ۶ مقادیر حداکثر، حداقل و محاسبه شده هزینه‌های کل مربوط به تولید صنعتی و راه‌اندازی این سامانه خورشیدی را نشان می‌دهد. یادآور می‌شود، تمام هزینه‌های تولید مدول خورشیدی به ازای تولید هر متر مربع از مدول و با نرخ تولید ۱ m<sup>2</sup>/s محاسبه شده است [۱۶]. در این گزارش آمده است، با تولید انبوه مواد ویژه (مواد لایه فعال)، به دلیل گران‌بودن قیمت آن‌ها در حجم‌های اندک، هزینه تمام‌شده آن‌ها و در نتیجه هزینه کل ساخت مدول خورشیدی کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. در این برآورد ظرفیت تولید ۱۰۰,۰۰۰ kg/yr برای مواد P3HT و PCBM در نظر گرفته شده است. هزینه مواد به ازای هر متر مربع از مدول و هزینه ثابت برای بازیافت پساب آن‌ها نیز لحاظ شده است. براساس جدول ۶، هزینه کل تولید مدول در حدود ۲/۳۵±۷/۸۵ \$/m<sup>2</sup> بوده که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است. با وجود کم‌تربودن بازده و طول



شکل ۱۱- درصد هزینه‌های: (الف) فرایند تولید و (ب) مواد برای ساخت صنعتی مدول‌های پلیمری [۱۶].



شکل ۱۲- حساسیت هزینه مدول پلیمری به قیمت: (الف) P3HT، (ب) PCBM، (پ) سایر مواد و (ت) سرعت چاپ. دایره و مربع توخالی در قسمت‌های (الف) و (ب) به ترتیب قیمت حال حاضر P3HT و PCBM را نشان می‌دهند [۱۶].

تولید تا  $50 \text{ m}^2/\text{min}$  باعث کاهش چشمگیر هزینه‌های تولید شده و افزایش بیشتر آن به مقدار اندک، باعث کاهش هزینه‌های تمام شده مدول می‌شود [۱۶].

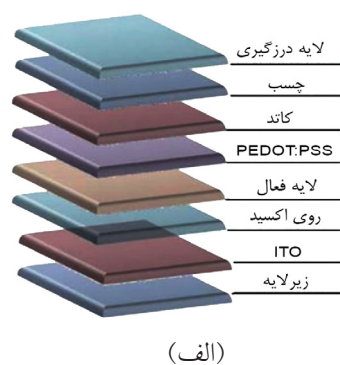
از معایب سلول‌های خورشیدی پلیمری، بازده تبدیل انرژی (در حدود ۲٪) و همچنین میزان ماندگاری به نسبت کم آن‌هاست که نسبت به سایر مدول‌های کنونی تجاری کمتر است. در بهترین حالت، بازده تبدیل انرژی یک مدول خورشیدی پلیمری پس از گذشت ۱ yr در حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد [۲۲]. برای رقابت با سلول‌های تجاری سیلیکونی، تولید مدول‌های پلیمری با بازده نسبتاً زیاد و هزینه بسیار کم مورد نیاز است. یکی از راهکارهای هوشمندانه برای افزایش بازده سلول خورشیدی، تولید سلول‌های پیایی (tandem) است. سلول‌های پیایی از دو سلول خورشیدی مختلف تشکیل شده‌اند که با یکدیگر به‌طور پیایی یا موازی اتصال یافته‌اند (شکل ۱۳-ب). در این دو سلول خورشیدی در قسمت لایه فعال از موادی استفاده می‌شود که طیف جذبی آن‌ها مکمل یکدیگر است. بدین صورت که اکثر محدوده طیف نور مرئی و حتی زیرقرمز نزدیک به وسیله دو لایه فعال موجود در سلول پیایی جذب می‌شود، در نتیجه پارامترهای فوتوفولتایی و در پی آن، بازده

نسبت به مواد مختلف و در شکل‌های ۱۲-الف و ب به ترتیب این حساسیت نسبت به P3HT و PCBM نشان داده شده است. با مقایسه دو شکل چنین نتیجه‌گیری می‌شود که با تولید انبوه، هزینه P3HT نسبت به PCBM کاهش بسیار بیشتری پیدا می‌کند. نتیجه مهم دیگر به‌دست‌آمده از بررسی نمودارها این است که اگر با قیمت کنونی P3HT و PCBM مدول‌های خورشیدی تولید شوند، قیمت تمام‌شده آن‌ها به نسبت زیاد خواهد بود. ولی در صورتی که این مواد در حجم‌های زیاد تولید شوند، به دلیل کاهش شدید قیمت تمام‌شده آن‌ها، هزینه نهایی مدول بسیار کاهش می‌یابد. در شکل ۱۲-پ نمودار تحلیل حساسیت هزینه مدول نسبت به سایر مواد تشکیل‌دهنده آن نشان داده شده است. براساس این نمودار، قیمت زیرلایه پلی‌استری بیشترین تأثیر را بر هزینه‌های نهایی مدول دارد، چراکه بیشترین حجم مواد تشکیل‌دهنده مدول را زیرلایه پلی‌استری تشکیل می‌دهد. از سوی دیگر، هزینه‌های پلیمر PEDOT:PSS، آلومینیم و نقره حتی در حالتی که قیمت آن‌ها تا ۱۰۰۰٪ افزایش پیدا کند، تأثیر اندکی بر هزینه نهایی مدول خواهد داشت. در شکل ۱۲-ت اثر نرخ‌های مختلف تولید بر هزینه مدول نشان داده شده است. چنین نتیجه‌گیری می‌شود که افزایش نرخ

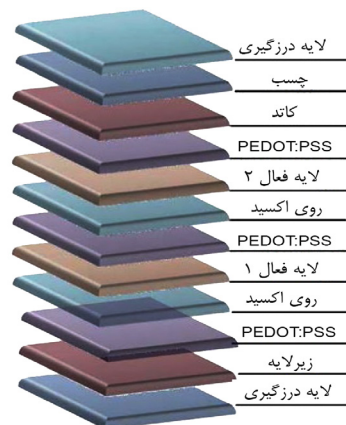
است. Machui و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی [۲۳]، هزینه‌های ساخت مدول سلول‌های خورشیدی در سه مقیاس تولیدی پایلوت، نیمه‌صنعتی و صنعتی را برای سلول‌های تکی و پیایی مقایسه کردند. برای ساخت هر دو نوع سلول، از روش چاپ رول‌به‌رول و به جای فیلم پلی‌استری پوشش یافته با ITO از Flextrode برای چاپ تمام لایه‌های سلول خورشیدی استفاده شد. Flextrode نوعی زیرلایه نیمه‌شفاف انعطاف‌پذیر و رسانای بدون ITO است که به‌طور تجاری توسط شرکت Infinity دانمارک تولید و عرضه می‌شود. کاربرد آن به‌عنوان الکترود برای تولید تجهیزات انعطاف‌پذیر الکترونیکی نظیر سلول‌های خورشیدی، تلویزیون و دیواره‌هاست. به دلیل کاهش استخراج بار در سلول‌های خورشیدی پلیمری، در ابعاد سلول محدودیت وجود دارد. بنابراین، سلول‌های خورشیدی پلیمری باید به سلول‌های کوچک‌تر تقسیم و سلول‌ها به‌طور پیایی به یکدیگر متصل شوند و تشکیل یک مدول را بدهند. مفهوم اصلی مدول، اتصال بینابینی و داخلی میان هر سلول است.

سطح اتصال میان سلول‌ها نقشی در تولید انرژی الکتریکی ندارد، بنابراین تا جای ممکن باید این سطح کوچک در نظر گرفته شود. ضریب پرشدگی هندسی (geometric fill factor, GFF) عاملی است که در این باره به کار می‌رود. این عامل بیانگر نسبت سطح فعال سلول (که کار تولید انرژی الکتریکی را انجام می‌دهد) به سطح کل مدول است. هر قدر ضریب پرشدگی هندسی بیشتر باشد، مقدار تولید انرژی الکتریکی سلول بیشتر می‌شود. در پژوهش انجام شده، ضریب پرشدگی هندسی سلول‌های ساخته شده در مقیاس محدود در حدود ۳۷٪، در مقیاس تولید نیمه‌صنعتی در حدود ۷۵٪ و در مقیاس صنعتی در حدود ۹۸٪ در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۳-پ تصویر یک مدول خورشیدی پلیمری تجاری و درصد مواد استفاده شده در تولید مدول خورشیدی پیایی در مقیاس صنعتی نشان داده شده است. در میان مواد اولیه، عمده هزینه‌های مواد ساخت مدول به ترتیب به ورق درزگیری، نقره و مواد لایه فعال، اختصاص دارد. در صورت تولید مدول‌های پیایی در مقیاس صنعتی، هزینه‌های تولید (۲٪) در مقایسه با هزینه مواد (۹۸٪) قابل چشم‌پوشی است. واضح است، هزینه تولید در مقیاس پایلوت سهم درخور توجهی دارد. خاطر نشان می‌شود، در این مقیاس تولید نیز سهم عمده هزینه‌ها مربوط به مواد اولیه است و در صورت افزایش حجم تولید، هزینه‌های تولید به شدت کاهش می‌یابد. اما در هر مقیاس تولید حتی در حجم‌های کم، بیشترین هزینه‌های ساخت به هزینه مواد اختصاص دارد [۲۳].

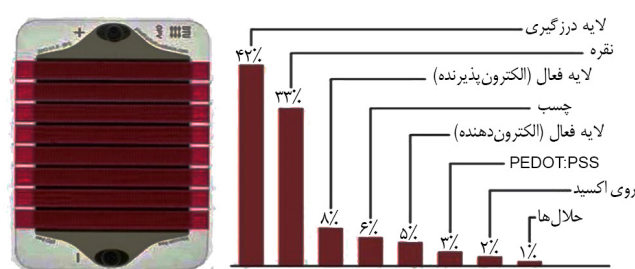
Machui و همکاران در پژوهشی به مطالعه هزینه مواد پرداختند.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۳- ساختار مدول‌های پلیمری: (الف) تکی و (ب) پیایی و (پ) تصویر مدول خورشیدی تجاری پلیمری با ساختار پیایی (سمت چپ) و درصد مواد سازنده آن (سمت راست) [۲۳].

تبدیل انرژی سلول افزایش پیدا می‌کند [۲۳].

در این سلول‌ها، ایجاد لایه میانی از مهم‌ترین قسمت‌های فرایند تولید است، چراکه این لایه باعث ایجاد اتصال اهمی بین دو سلول خورشیدی می‌شود. در لایه میانی معمولاً PEDOT:PSS یا روی اکسید دپه شده با آلومینیم استفاده می‌شود که به‌طور مؤثری باعث ایجاد اتصال اهمی میان دو سلول می‌شوند. این را می‌توان با استفاده از فرایند رول‌به‌رول چاپ کرد که برای تولید انبوه سلول‌های خورشیدی پلیمری ضروری است. برای سلول‌های پیایی باید توجه داشت، به دلیل بیشتر بودن تعداد لایه‌ها، هزینه تولید سلول بیشتر

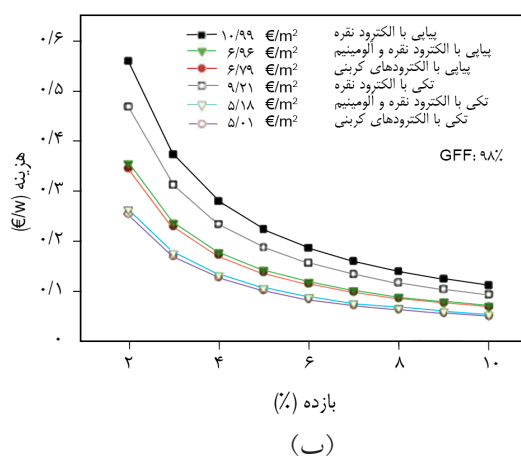
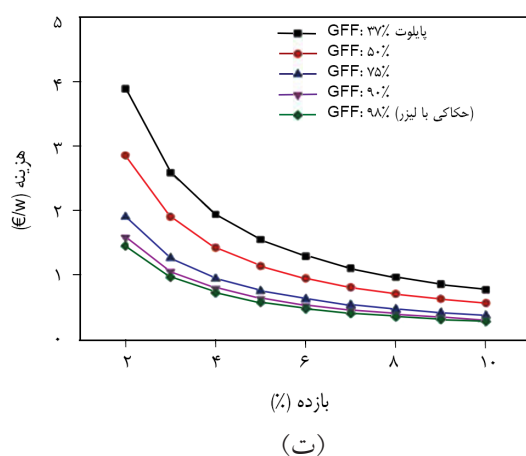
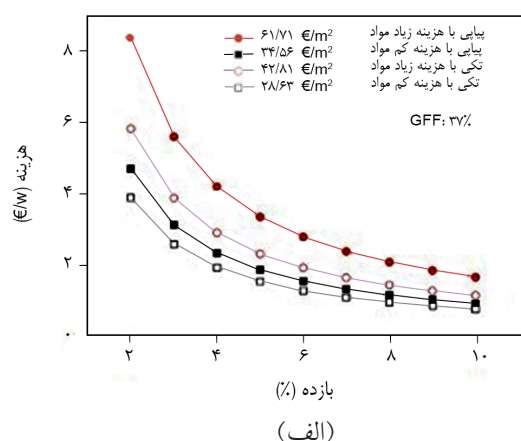
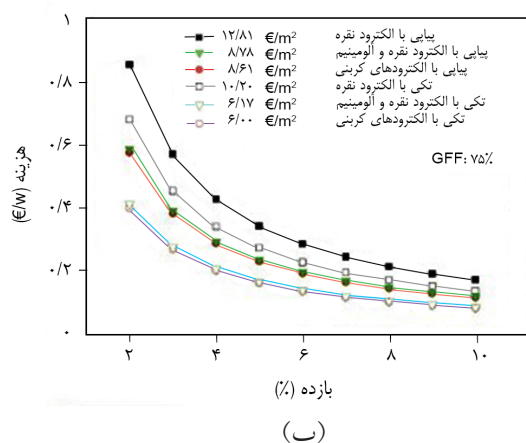
الکترون‌دهنده نسبتاً ارزان‌تر (P3HT) و همچنین گران‌قیمت‌تر (نظیر MH301 و MH306) با PCBM انجام شده است [۲۳].

ملاحظه می‌شود، در مقیاس پایلوت در صورتی که برای ساخت مدول‌ها از مواد ارزان‌قیمت‌تر (P3HT:PCBM) استفاده شود، هزینه نهایی مواد نسبت به پلیمرهای MH301 و MH306 در حدود ۷۸٪ کاهش پیدا می‌کند. در صورتی که برای تولید مدول از P3HT:PCBM استفاده شود، برای مدول‌های تکی ۱۳٪ و برای مدول‌های پیایی ۲۲٪ از کل هزینه‌ها مربوط به لایه فعال است. از سویی، این مقادیر در صورت استفاده از پلیمرهای MH301 و MH306 برای سلول‌های تکی و پیایی به ترتیب ۴۲ و ۵۶٪ کل هزینه‌های مواد خواهد بود. نکته درخور توجه در کاهش چشمگیر هزینه مواد، افزایش حجم تولید است. در صورتی که مقیاس تولید نیمه‌صنعتی یا صنعتی باشد، در مقایسه با مقیاس پایلوت هزینه مواد لایه فعال به ترتیب در حدود ۸۵۰ و ۱۸۰۰٪ کاهش پیدا می‌کند [۲۳]. در شکل ۱۴ منحنی‌های تحلیل هزینه بر حسب بازده تبدیل انرژی سلول‌های تکی و پیایی در هر سه مقیاس تولید نشان داده

جدول ۷- هزینه‌های مربوط به مواد سازنده لایه فعال و هزینه کل مدول پیایی پلیمری در مقیاس‌های مختلف تولید [۲۳].

| مقیاس تولید              | هزینه مواد مصرفی<br>لایه فعال (€/m <sup>2</sup> ) | هزینه کل مدول<br>(€/m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------|
| پایلوت (مواد گران‌قیمت)  | ۳۴/۷۰                                             | ۶۱/۷۱                                |
| پایلوت (مواد ارزان‌قیمت) | ۷/۵۸                                              | ۳۴/۵۶                                |
| نیمه‌صنعتی               | ۱/۳۱                                              | ۳/۶۳                                 |
| صنعتی                    | ۰/۶۶                                              | ۱/۸۱                                 |

مواد به کاررفته در لایه فعال جزء مواد ویژه و گران‌قیمت در تولید مدول خورشیدی آلی بوده و بنابراین تخمین هزینه آن‌ها در تولید مدول‌های تکی و پیایی حائز اهمیت است. در جدول ۷ خلاصه‌ای از هزینه‌های مواد لایه فعال برای تولید مدول‌ها در سه مقیاس تولید انجام گرفته است. برای مقایسه بهتر، برآورد هزینه ترکیب پلیمرهای



شکل ۱۴- تحلیل هزینه مدول به عنوان تابعی از بازده برای مدول‌های پلیمری ساخته شده در مقیاس: (الف) پایلوت، (ب) نیمه‌صنعتی، (پ) صنعتی و (ت) تحلیل هزینه مدول به عنوان تابعی از ضریب پرتشدگی هندسی [۲۳].

جدول ۸- هزینه‌های الکتروود و مدول در صورت به‌کارگیری الکتروودهای مختلف [۲۳].

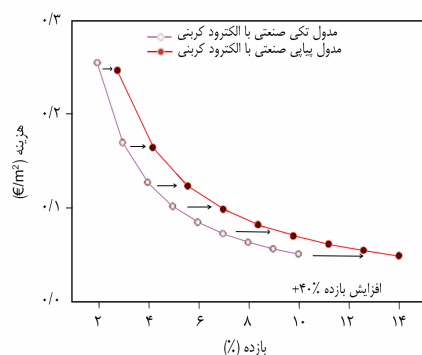
| نوع مدل          | ماده استفاده شده | مقدار مصرف ماده (g/m <sup>2</sup> ) | هزینه ماده (€/g) | هزینه مدول (€/m <sup>2</sup> ) |
|------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|--------------------------------|
| الف <sup>۱</sup> | نقره             | ۰/۲۶                                | ۲                | ۰/۵۳                           |
|                  | نقره             | ۳/۱۱                                | ۱/۳۳             | ۴/۱۳                           |
|                  |                  |                                     |                  | ۴/۶۶                           |
| ب <sup>۲</sup>   | نقره             | ۰/۲۶                                | ۲/۰۰             | ۰/۵۳                           |
|                  | آلومینیم         | ۷/۷۸                                | ۰/۰۷             | ۰/۵۳                           |
|                  |                  |                                     |                  | ۱/۰۵                           |
| پ <sup>۳</sup>   | کربن             | ۰/۲۶                                | ۰/۱۴             | ۰/۰۴                           |
|                  | کربن             | ۳/۱۱                                | ۰/۱۴             | ۰/۴۲                           |
|                  |                  |                                     |                  | ۰/۴۶                           |

<sup>۱</sup> هر دو الکتروود از نقره، <sup>۲</sup> الکتروود جلویی از نقره و پشتی از آلومینیم و <sup>۳</sup> هر دو الکتروود از مواد کربنی ساخته شده‌اند.

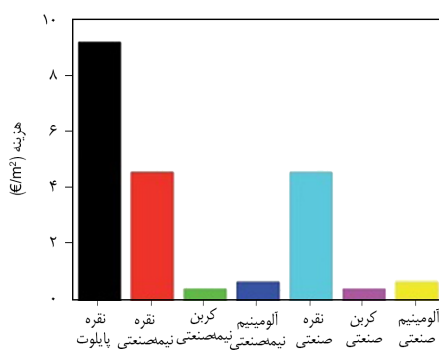
ضریب پرشدگی هندسی بیش از ۹۰٪ استفاده از حکاکی لیزری ضروری است. این فرایند کاملاً با روش رول‌به‌رول سازگار است. از راهکارهای کاهش هزینه‌های تولید، استفاده از مواد ارزان‌قیمت‌تر برای تولید مدول است. چنانچه در شکل ۱۴-ب و پ نشان داده شد، در ساخت مدول‌های نیمه‌صنعتی و صنعتی از الکتروودهای کربنی و نقره‌ای استفاده شد که یکی از دلایل کاهش هزینه‌ها استفاده از این مواد است. در جدول ۸ مقایسه هزینه مدول‌های پلیمری دارای الکتروودهای برپایه مواد مختلف، نشان داده شده است. جایگزینی

شده است. در مقیاس پایلوت هزینه مواد در محدوده ۶۲-۲۸ €/m<sup>2</sup>، مقیاس نیمه‌صنعتی در حدود ۱۳-۶ €/m<sup>2</sup> و در مقیاس صنعتی در حدود ۱۱-۵ €/m<sup>2</sup> است. در هر سه مقیاس تولید با افزایش بازده مدول، هزینه‌های تمام‌شده کاهش پیدا می‌کند. در مدول‌هایی که در مقیاس پایلوت تولید می‌شوند، در صورت استفاده از مواد ارزان‌قیمت‌تر در لایه فعال سلول‌های تکی (P3HT:PCBM)، محدوده قیمت تمام‌شده در حدود ۳/۹-۰/۸ €/W است. برای تولید مدول در مقیاس نیمه‌صنعتی و صنعتی روند هزینه‌ها به ترتیب ۲۰ و ۱۰ €/g فرض شده است. برای مقیاس نیمه‌صنعتی با انرژی خروجی ۱۰۰ MW، با فرض ۵٪ بازده تبدیل انرژی مدول، سطحی از آن که باید مورد فرایند قرار گیرد، ۲×۱۰<sup>۶</sup> m<sup>2</sup> است. اگر مقدار مصرف مواد فعال در حدود ۰/۲ g/m<sup>2</sup> باشد، مقدار ۴۲۷ kg ماده فعال برای این فرایند لازم است. در مقیاس صنعتی با انرژی خروجی ۱۰۰ GW با فرض آنکه سطح مورد فرایند باید در حدود ۲×۱۰<sup>۹</sup> m<sup>2</sup> باشد، مقدار مصرف مواد لایه فعال در حدود ۴۲۷ t خواهد بود.

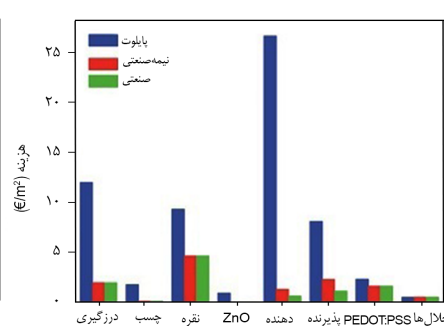
باتوجه به شکل ۱۴-ب و پ ملاحظه می‌شود، هزینه تمام‌شده برای مدول‌های تولیدشده در مقیاس نیمه‌صنعتی و صنعتی کاهش شدیدی دارد و به کمتر از ۰/۱ €/W می‌رسد. در هر سه مقیاس تولید هزینه سلول‌های پیپای نسبت به تکی به دلیل تعداد بیشتر لایه‌ها افزون‌تر است، ولی در مقیاس صنعتی، تولید مدول پیپای تنها هزینه‌ای در محدوده ۰/۱۲-۰/۵۶ €/W معادل با ۵/۰۱-۱۰/۹۹ €/m<sup>2</sup> دارد که از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه است. باتوجه به شکل ۱۴-ت با افزایش ضریب پرشدگی هندسی از ۳۷٪ به ۵۰٪ یا ۷۵٪ که می‌توان با بهینه‌سازی فرایند چاپ به آن دست یافت، کاهش شدیدی در هزینه تمام‌شده مدول ایجاد می‌شود. برای دسترسی به



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۱۵- پتانسیل کاهش هزینه: (الف) لایه‌ها، (ب) مواد به‌کاررفته در ساخت الکتروود مدول‌های پلیمری پیپای در سه مقیاس مختلف تولید و (پ) مدل هزینه‌ای برای مقایسه میان مدول‌های پیپای و تکی [۲۳].



جدول ۱۰- درصد هزینه مواد به کاررفته در سلول‌های ساخته شده در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران.

| شماره سلول | نوع ماده به کاررفته | درصد نسبی هزینه ماده |
|------------|---------------------|----------------------|
| ۱          | ITO                 | ۱۹                   |
|            | PEDOT:PSS           | ۳۳                   |
|            | P3HT:PCBM           | ۲۲                   |
|            | سایر                | ۲۶                   |
| ۲          | ITO                 | ۷۳                   |
|            | PEDOT:PSS           | ۱۳                   |
|            | P3HT:PCBM           | ۹                    |
|            | سایر                | ۵                    |
| ۳          | نقره*               | ۱۷                   |
|            | PEDOT:PSS           | ۴۰                   |
|            | P3HT:PCBM           | ۲۶                   |
|            | سایر                | ۱۷                   |

\*محاسبه هزینه کلی ستنز نانونقره براساس روش کاهش شیمیایی نترات نقره با آسکوربیک اسید استفاده شده، انجام شده است.

نسبتاً زیاد، حدود ۷۳٪ از کل هزینه‌های سلول مربوط به این لایه است. مزیت رسانندگی الکتریکی زیاد، بازده تبدیل انرژی بیشتر سلول است، اما به دلیل هزینه زیاد زیرلایه ITO در صورت تولید انبوه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود. در سلول شماره ۱ که از ITO با رسانندگی الکتریکی کم استفاده شده، هزینه تمام شده کاهش یافته است. ولی، به دلیل مقاومت سطحی نسبتاً زیاد ITO مقدار بازده سلول نیز کاهش پیدا می‌کند. در صورتی که از نقره به عنوان جایگزین ITO استفاده شود، هزینه سلول کاهش چشمگیری می‌یابد. به کارگیری این ترکیب، با توجه به مقاومت سطحی نسبتاً مناسب آن، قابلیت زیادی برای تولید انبوه سلول خورشیدی پلیمری با هزینه کم به وجود می‌آورد. در نهایت لازم به توضیح است، در فرایندهای صنعتی تولید سلول خورشیدی به دلیل حجم انبوه تولید، هزینه مواد کاهش یافته و در نتیجه هزینه نهایی ساخت سلول نیز کاهش می‌یابد. نکته درخور توجه دیگر که باید مدنظر قرار گیرد، هدررفت بسیار کم مواد در صورت استفاده از روش چاپ رول به رول است. این عامل نیز به نوبه خود تاثیر بسزایی بر کاهش هزینه‌های تولید دارد.

جدول ۹- برآورد هزینه تولید سلول خورشیدی پلیمری در مقیاس آزمایشگاهی با الکترودهای مختلف.

| شماره سلول | نوع الکتروده | رسانندگی الکتریکی ( $\Omega/\square$ ) | هزینه نهایی سلول (ریال) |
|------------|--------------|----------------------------------------|-------------------------|
| ۱          | ITO          | ۲۰۰                                    | ۹۰۰۰۰                   |
| ۲          | ITO          | ۵۰                                     | ۲۴۰۰۰۰                  |
| ۳          | شبکه نقره    | ۷۰                                     | ۷۵۰۰۰                   |

آلومینیم با نقره به عنوان الکتروده کاتد باعث کاهش ۷۷٪ هزینه‌های مدول می‌شود. در صورتی که فقط از مواد کربنی برای تهیه الکتروده استفاده شود، این مقدار به ۹۰٪ می‌رسد. در شکل ۱۵-الف و ب قابلیت کاهش هزینه‌های هر لایه و نیز مواد مختلف به کاررفته برای تهیه الکتروده در ساخت مدول‌های پلیمری نشان داده شده است. در میان مواد، ترکیبات الکترون‌دهنده به کاررفته در لایه فعال (همچون P3HT) بیشترین قابلیت کاهش قیمت را دارند. همچنین، برای مواد به کاررفته در ساخت الکتروده، استفاده از مواد پایه کربنی دارای مزیت است و باعث کاهش شدید هزینه‌های تولید می‌شود [۲۳].

باتوجه به پیش‌بینی‌ها انتظار می‌رود، بازده تبدیل انرژی مدول‌های پیایی در مقایسه با مدول‌های تکی تا ۴۰٪ افزایش پیدا کند. در مقایسه انجام شده در شکل ۱۵-پ میان مدول‌های تکی و پیایی تولیدی در مقیاس صنعتی، منحنی مربوط به مدول پیایی به سمت بازده‌های بیشتر جابه‌جا شده است. به عنوان مثال، برای بازده ۲٪ مدول تکی، مقدار بازده مدول پیایی در حدود ۲/۸٪ است. اگرچه هزینه تمام شده مدول پیایی نسبت به مدول تکی بیشتر است، ولی بازده بیشتر (۴۰٪) آن، هزینه بیشتر مدول را جبران می‌کند.

### تجربیه درون پژوهشگاه

جدول ۹ تخمینی از هزینه تولید آزمایشگاهی یک سلول خورشیدی پلیمری با مساحت  $1/5 \text{ cm}^2$  و سطح فعال  $0/15 \text{ cm}^2$  را نشان می‌دهد که در ساخت آن از زیرلایه‌های شفاف و رسانای ITO (با رسانندگی‌های مختلف) و شبکه نقره استفاده شده است. در جدول ۱۰٪ نسبی هزینه هر یک از مواد به کاررفته در این سلول‌ها ذکر شده است. لازم به توضیح است، سلول‌های خورشیدی یادشده در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران ساخته شده و دارای ساختار معکوس و الکتروده کاتد طلا هستند.

در صورت به کارگیری زیرلایه ITO با رسانندگی الکتریکی

## نتیجه‌گیری

هستند، استفاده از مدول‌های انعطاف‌پذیر پلیمری باعث می‌شود که به خاطر وزن سبک و انعطاف‌پذیری آن‌ها، نصب یا جمع‌آوری سامانه بسیار ساده و سریع باشد. بنابراین، هزینه نصب یا جمع‌آوری آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد. در سلول‌های پی‌اپی که برای افزایش طیف جذبی و در نتیجه افزایش بازده این سامانه‌ها به‌طور چندلایه تولید می‌شوند، با وجود تعداد لایه‌های زیادتر و در نتیجه هزینه بیشتر آن‌ها، به دلیل بازده تولید بیشتر نسبت به مدول‌های تکی (در حدود ۴۰٪) قابلیت کاربرد در تولید محصولات تجاری و رقابت با مدول‌های سیلیکونی نشان می‌دهند. با توجه به فرایند ساده تولید، هزینه کم و در نتیجه مقرون به‌صرفه بودن مدول‌های خورشیدی پلیمری، این نسل از تجهیزات الکترونیکی، سامانه‌های قابل رقابت با سایر سامانه‌های تولیدکننده انرژی الکتریکی نظیر سامانه‌های برپایه ویفرهای سیلیکونی به‌شمار می‌روند.

هزینه‌های مواد، ساخت، نصب و راه‌اندازی سامانه‌های خورشیدی پلیمری بررسی شد. به دلیل تولید این سامانه‌ها با روش چاپ رول‌به‌رول، تمام هزینه‌های مربوط به تولید آن‌ها در مقایسه با سایر فناوری‌ها، نظیر سلول‌های خورشیدی سیلیکونی به شدت کاهش پیدا کرده، به‌طوری که تولید صنعتی مدول خورشیدی پلیمری با هزینه‌ای در حدود  $7/85 \text{ \$}/\text{m}^2$  امکان‌پذیر شده است. از مزیت‌های دیگر این سامانه‌ها، مبلغ کمتر مورد نیاز برای سرمایه‌گذاری اولیه برای راه‌اندازی خط تولید مدول خورشیدی است که در مقایسه با سایر فناوری‌ها در حدود ۲۸٪ کمتر است. در حالت کلی، هزینه مواد به‌کاررفته در ساخت مدول خورشیدی پلیمری کمتر از  $10 \text{ €/m}^2$  است که با سایر سامانه‌های تولیدکننده انرژی رقابت می‌کند. در مقایسه با مدول‌های تجاری سیلیکونی که دارای وزن زیادی

## مراجع

1. Macedo I.C., Seabra J.E., and Silva J.E., Greenhouse Gases Emissions in the Production and Use of Ethanol from Sugarcane in Brazil: The 2005/2006 Averages and a Prediction for 2020, *Biomass Bioenerg.*, **32**, 582-595, 2008.
2. Howarth R.W., Santoro R., and Ingraffea A., Methane and the Greenhouse-gas Footprint of Natural Gas from Shale Formations, *Clim. Change*, **106**, 679-690, 2011.
3. Yousefi A.A., Mohebbi A., and Fallahdoust Moghadam S., Polymer Solar Cells: Components, Production, Applications, and the Market, *Polymerization (Persian)*, **8**, 65-78, 2017.
4. Kazemifard S., Naji L., Afshar Taromi F., and Fakharan Z., Polymer Solar Cells and Their Performance Mechanism and Characterization, *Polymerization (Persian)*, **6**, 44-54, 2016.
5. Kim Y.Y., Yang T.Y., Suhonen R., Välimäki M., Maaninen T., Kemppainen A., and Seo J., Gravure-Printed Flexible Perovskite Solar Cells: Toward Roll-to-Roll Manufacturing, *Adv. Sci.*, **6**, 1802094, 2019. DOI: 10.1002/advs.201802094
6. Agbolaghi S., Procedures for Increasing the Efficiency of Polymeric P3HT:PCBM Solar Cells, *Polymerization (Persian)*, **8**, 20-31, 2018.
7. Mahmoudi S., Naji L., and Kazemifard S., An Introduction to Poly(3,4-thiophene) ethylenedioxy-Polystyrene Sulfonate as a Hole Transporting Layer in Polymer Solar Cells, *Polymerization (Persian)*, **7**, 13-25, 2016.
8. Wong K.H., Mason C.W., Devaraj S., Ouyang J., and Balaya P., Low Temperature Aqueous Electrodeposited  $\text{TiO}_x$  Thin Films as Electron Extraction Layer for Efficient Inverted Organic Solar Cells, *ACS Appl. Mater.*, **6**, 2679-2685, 2014.
9. Haque S.K., Ardila-Rey J.A., Umar Y., Rahman H., Mas'ud A.A., Muhammad-Sukki F., and Albarracín R., Polymeric Materials for Conversion of Electromagnetic Waves from the Sun to Electric Power, *Polymers*, **10**, 307, 2018. DOI: 10.3390/polym10030307
10. Ashassi-Sorkhabi H., Asghari E., and Mirmohseni A., Photovoltaic Properties of Polyanilinecopoly(butyl acrylate/vinyl acetate) Composite, *Iran. Polym. J.*, **17**, 711-719, 2008.
11. Kalowekamo J. and Baker E., Estimating the Manufacturing Cost of Purely Organic Solar Cells, *Sol. Energy*, **83**, 1224-1231, 2009.
12. Bagher A.M., Comparison of Organic Solar Cells and Inorganic Solar Cells, *Renew. Sust.*, **3**, 53-58, 2014.
13. Azzopardi B., Emmott C.J., Urbina A., Krebs F.C., Mutale J., and Nelson J., Economic Assessment of Solar Electricity Production from Organic-based Photovoltaic Modules in a Domestic Environment, *Energy Environ. Sci.*, **4**, 3741-3753, 2011.
14. Kuwabara T., Nakayama T., Uozumi K., Yamaguchi T., and

- Takahashi K., Highly Durable Inverted-type Organic Solar Cell Using Amorphous Titanium Oxide as Electron Collection Electrode Inserted Between ITO and Organic Layer, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **92**, 1476-1482, 2008.
15. Guo J. and Min J., A Cost Analysis of Fully Solution-Processed ITO-Free Organic Solar Modules, *Adv. Energy Mater.*, **9**, 1802521, 2019. DOI: 10.1002/aenm.201802521
16. Mulligan C.J., Wilson M., Bryant G., Vaughan B., Zhou X., Belcher W.J., and Dastoor P.C., A Projection of Commercial-scale Organic Photovoltaic Module Costs, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **120**, 9-17, 2014.
17. Mulligan C.J., Bilen C., Zhou X., Belcher W.J., and Dastoor P.C., Levelised Cost of Electricity for Organic Photovoltaics, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **133**, 26-31, 2015.
18. Kalowekamo J. and Baker E., Estimating the Manufacturing Cost of Purely Organic Solar Cells, *Sol. Energy*, **83**, 1224-1231, 2009.
19. Xue R., Zhang J., Li Y., and Li Y., Organic Solar Cell Materials Toward Commercialization, *Small*, **14**, 1801793, 2018. DOI: 10.1002/smll.201801793
20. Peters M.S., Timmerhaus K.D., West R.E., Timmerhaus K., and West R., *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, McGraw-Hill, New York, 258-310, 1968.
21. Lo V., Landrock C., Kaminska B., and Maine E., Manufacturing Cost Modeling for Flexible Organic Solar Cells, *Proceedings of PICMET'12: Technology Management for Emerging Technologies*, Vancouver, 2951-2956, 29 July-2 August, 2012.
22. Menke S.M., Ran N.A., Bazan G.C., and Friend, R.H., Understanding Energy Loss in Organic Solar Cells: Toward a New Efficiency Regime, *Joule*, **2**, 25-35, 2018.
23. Machui F., Hösel M., Li N., Spyropoulos G.D., Ameri T., Søndergaard R.R., and Lenssen D., Cost Analysis of Roll-to-Roll Fabricated ITO Free Single and Tandem Organic Solar Modules Based on Data from Manufacture, *Energy Environ. Sci.*, **7**, 2792-2802, 2014.