امکان سنجی فن آوری‌های مختلف تولید سلول‌های خورشیدی

به منظور تولید بومی و انتخاب نوع خط تولید

جواد باصری/موسسه آموزش عالی خاوران
Javad_Baseri@yahoo.com
مهسا حمیدی/ شرکت برق منطقه‌ای خراسان رضوی
ma_hamidi2003@yahoo.com

کشور ما ایران، در منطقه‌ای واقع شده که به لحاظ دریافت انرژی خورشیدی در بین سایر نقاط جهان در بالاترین رده‌ها قرار دارد.
خوشبختانه با پیشرفت فن‌آوری، هزینه تولید سلول‌های خورشیدی سیر نزولی داشته است. بنابراین در برنامه‌ریزی برای آینده، انتخاب مواد اولیه جهت ساخت سلول خورشیدی و نوع فن‌آوری مورد استفاده اهمیت فوق‌العاده بالایی دارد به نحوی که می‌تواند آینده یک کشور را نیز تحت‌الشعاع خود قرار دهد. در این مقاله ضمن بررسی انواع فن‌آوری‌های مختلف تولید سلول‌های خورشیدی و مقایسه قیمت، مزایا و معایب و مدت بازگشت سرمایه آنها با یکدیگر مقایسه گردیده است.
علاوه بر این با بررسی شرایط اقلیمی و اقتصادی کشور امکان‌سنجی فن‌آوری‌های مختلف تولید سلول‌های خورشیدی از جمله فن‌آوری سیلیکان و لایه نازک، انتخاب صحیح نوع خط تولید برای کشور امکان‌پذیر می‌گردد.

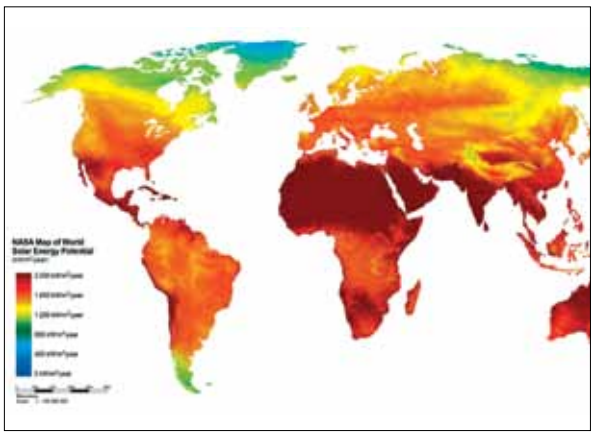
کلمات کلیدی: سلول‌های خورشیدی، بازگشت سرمایه، شرایط اقلیمی، سلول‌های خورشیدی سیلیکانی و لایه نازک

۱- مقدمه

در سال ۱۸۳۹ برای نخستین بار دانشمندان به خاصیت بعضی از مواد در تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته پی بردند (هنری بکیورل[۱])، اما این اثر تا سال ۱۹۵۴ که آقای چاپین اولین سلول خورشیدی سیلیکانی را در آزمایشگاه بل ساخت، مورد توجه قرار نگرفته بود[۲].

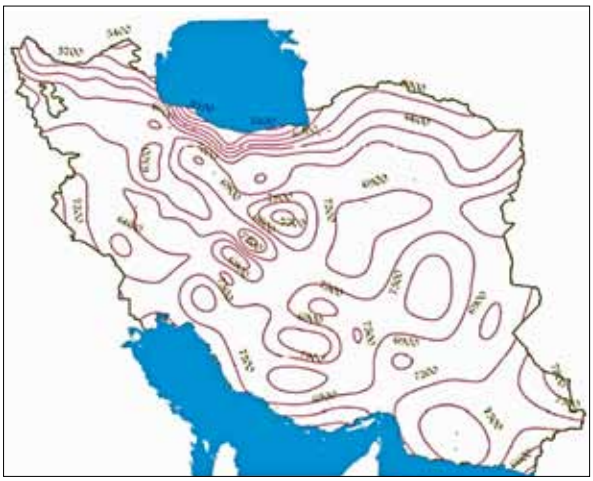
بعد از آن تلاش‌های بسیاری برای گسترش و افزایش بازده این تبدیل انجام شده است؛ چنانکه امروزه بسیاری از کشورهای صنعتی جهان بخش عمده‌ای از سرمایه‌گذاری‌های کلان خود را به این سمت سوق داده‌اند.

کشور ما ایران، در بین مدارهای ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی قرار گرفته است و در منطقه‌ای واقع شده که به لحاظ دریافت انرژی خورشیدی در بین نقاط جهان در بالاترین رده‌ها قرار دارد (شکل ۱). متوسط میزان تابش پرتوی خورشیدی در ایران بین ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال تخمین زده شده است (که البته بالاتر از میزان متوسط جهانی است).



شکل ۱- نقشه میزان متوسط تابش سالانه انرژی خورشید در جهان بر حسب کیلووات ساعت بر متر مربع [۳]

در ایران به طور متوسط سالیانه بیش از ۲۸۰ روزآفتابی گزارش شده است که بسیار قابل توجه است[۴].
در شکل (۲) میزان تابش سالانه نقاط مختلف ایران بر حسب مگاوات بر مترمربع نشان داده شده است.



شکل ۲- مجموع انرژی تابشی سالانه خورشید در نقاط مختلف ایران بر حسب مگاوات بر متر مربع [۵]

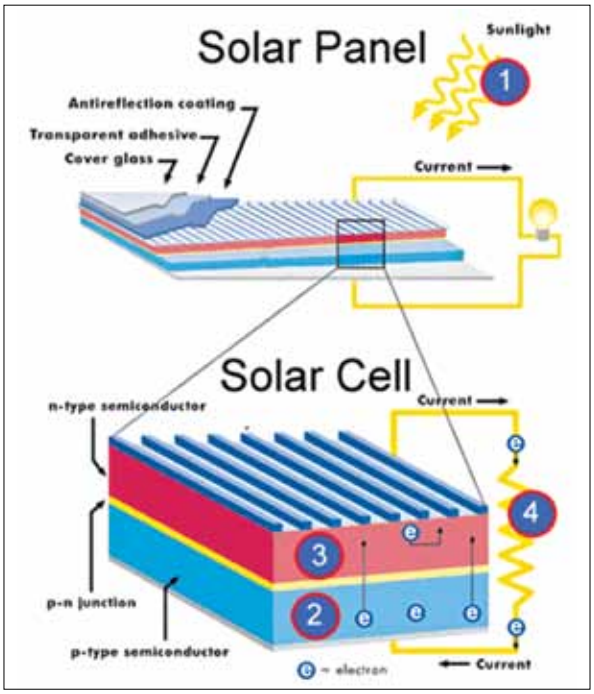
مشکل اساسی برای گسترش سیستم‌های فتوولتائیک قیمت زیاد آنها می‌باشد. خوشبختانه با پیشرفت فن‌آوری هزینه تولید سلول‌های خورشیدی سیر نزولی داشته اما هنوز یک مسأله اساسی می‌باشد.
در برنامه‌ریزی برای آینده انتخاب مواد اولیه جهت ساخت سلول خورشیدی و نوع فن‌آوری مورد استفاده اهمیت فوق‌العاده بالایی دارد به نحوی که می‌تواند آینده یک شرکت یا حتی یک کشور را نیز تحت‌الشعاع خود قرار دهد.

پارامترها و یا معیارهای تاثیرگذار در انتخاب یک نوع خاص از سلول‌های خورشیدی می‌تواند در قدم اول راندمان سلول باشد، اما دیدگاه‌های اقتصادی و زیست محیطی نیز دارای اهمیت فراوان هستند. بنابراین از دیدگاه اقتصادی:
۱) اولین معیار موجود بودن و ارزان بودن یک ماده برای تولید سلول خورشیدی با راندمان بالا در ابعاد وسیع می‌باشد.
۲) دومین معیار جنبه‌های زیست محیطی و ایمنی است. مثلا با وجود بازده بالا برای بعضی از مواد شبیه: As و Cd، این مواد به شدت سمی بوده و برای سلامت انسان و طبیعت مضر هستند.
روش مستقیم تبدیل نور به الکتریسته را اثر یا پدیده فتوولتائیک می‌نامند.
برای تبدیل نور به الکتریسیته چهار مرحله نیاز است (شکل ۳):
۱. جذب نوری که باعث ایجاد حالت برانگیخته شود.
۲. تبدیل حالت برانگیخته به زوج الکترون-حفره آزاد.
۳. جداسازی حامل‌های آزاد از یکدیگر (حرکت خلاف هم الکترون و حفره)
۴. ترکیب الکترون با حفره‌ای که از سر منفی رسیده

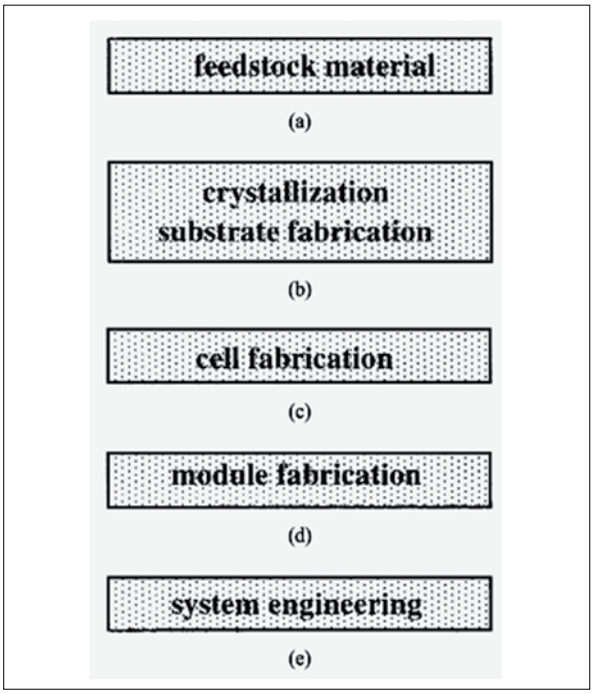
۲- روش‌های ساخت سلول‌های خورشیدی

۲-۱- فن‌آوری‌های ساخت سلول خورشیدی کریستال سیلیکانی

از آنجا که در صد بالایی از بازار سلول‌های خورشیدی جهان را سلول‌های خورشیدی کریستال سیلیکانی تشکیل می‌دهند، در این قسمت ابتدا روش‌های ساخت این نوع از سلول‌های خورشیدی را بررسی خواهیم کرد.
در ساختارهای سیلکیونی نیز به علت مصرف زیاد مواد اولیه در ساختارهای تک بلور، جهت‌گیری روش‌های ساخت به سمت ساختارهای چند بلوری، و بلورهای بی‌شکل لایه نازک می‌باشد.
به طور کلی مراحل ساخت سلول‌های خورشیدی کریستال سیلیکانی را می‌توان به صورت دیاگرام شکل (۴) خلاصه نمود.



شکل۳- مراحل تولید توان الکتریکی از نور خورشید [۶]



شکل۴- زنجیره ساخت سلول‌های خورشیدی کریستال سیلیکانی [۷]

۲-۱-۱- روش مواد حجمی رایج[1]

یکی از مراحل مهم ساخت سلول‌های خورشیدی سیلیکانی ایجاد شمش‌های سیلوکون می‌باشد.

دو روش عمده برای ایجاد این شمش‌ها وجود دارد:

۱) روش چکرلاسکی[2] برای تهیه شمش تک بلور

۲) روش ریخته‌گری[3] برای ساخت شمش‌های چند بلوری.

به علت مزایای سیلیکان تک بلور راندمان سلول‌های خورشیدی تک بلور ۱/۵ تا ۲ درصد از راندمان سلول‌های خورشیدی چند بلور بیشتر است. به علت مصرف مواد اولیه بیشتر و مراحل ساخت پیچیده‌تر قیمت تمام‌شده سلول در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد بیشتر می‌شود.

روش‌های رایج ساخت سیلیکان چند بلور در سلول‌های خورشید شامل:

۱) انجماد جهت‌دار صحیح[4] و ۲) روش ریخته‌گری الکترومغناطیسی[5] می‌باشند.

در روش ریخته‌گری الکترومغناطیسی عمل ذوب توسط نیروی القای الکترومغناطیس انجام شده و به علت نداشتن تماس با ظرف می‌توان به راندمان بیشتری در حدود ۰/۵ تا ۱ درصد بیشتر از انجماد جهت‌دار رسید [۷].

۲-۱-۲- ساخت کریستال نواری[6]

برای ساخت کریستال نواری روش‌های زیادی وجود دارد که در این قسمت فقط به نام آنها اشاره شده برای جزئیات بشتر می‌توان به مرجع [۷] مراجعه کرد.

۲-۱-۳- فن‌آوری چاپ تصویر[7]

اغلب سلول‌های خورشیدی سیلیکان موجود در بازار با روش چاپ تصویر ساخته می‌شوند. این روش که یک روش ساده، مستحکم و پیوسته می‌باشد به راحتی با فرآیندهای ساخت قابل تطبیق می‌باشد. خطوط تولید کاملاً خودکار این روش ساخت توسط چند شرکت به بازار عرضه گردیده است. فرآیندهای ساخت روش چاپ تصویر برای سال‌های متمادی تغییر چندانی نکرده است و این روش‌ها به دو صورت معمولی و روش فایرینگ-ترو PECVD SiN[8] انجام می‌شود.

۲-۲- فن‌آوری‌های ساخت سلول‌های خورشیدی لایه نازک سیلیکانی

برای رشد یک لایه سیلیکان نازک به ضخامت حدود ۱۰میکرومتر یا کمتر روی یک لایه‌ای غیر از سیلیکان بلوری روش‌های متعددی وجود دارد که اکثر این روش‌ها در مراحل ساخت مدارات مجتمع استفاده می‌شوند. برای اطلاعات بیشتر می‌توان به مرجع [۸] و یا کتاب‌های مرجع ساخت مدارات مجتمع رجوع کرد. در زیر به تعدادی از این روش‌ها اشاره گردیده است:

- Chemical Vapor Deposition (CVD),
- Plasma Enhanced CVD (PECVD),
- Ion Assisted Deposition (IAD),
- Liquid Phase Epitaxy (LPE)
- Solid Phase Crystallization (SPC) Of Amorphous Silicon.

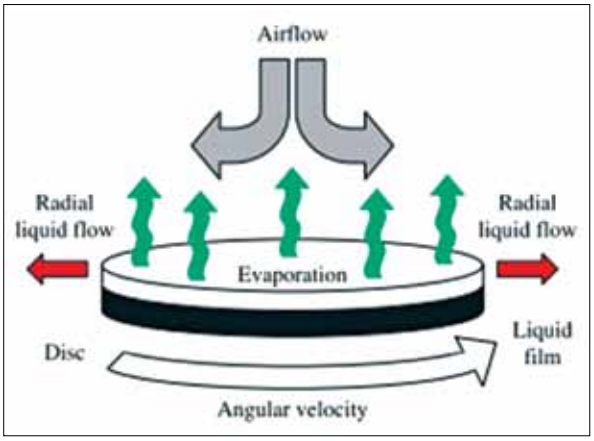
۲-۳- فن‌آوری‌های ساخت سلول‌های خورشیدی ارگانیک

۲-۳-۱- روش‌های پوشاندن و چاپ[9]

پوشاندن چرخشی[10]

بی‌تردید روش پوشاندن چرخشی که در صنایع نیمه‌هادی نیز برای پوشاندن نور مقاوم[11] روی سطح ویفر استفاده می‌شود، یکی از مهمترین روش‌های توسعه سلول‌های خورشیدی ارگانیک می‌باشد.

این روش که مشابه روش ساختن CD/DVD نیز می‌باشد به گونه‌ای است که ابتدا مایع مورد نظر روی سطح ریخته شده و سپس توسط عمل چرخاندن روی تمام سطح را به طور یکنواخت می‌پوشاند (شکل ۵). ضخامت، ریخت و توپوگرافی لایه به سرعت چرخش، چسبناکی، فرار بودن، قابلیت نفوذ، وزن ملکولی و چگالی ماده محلول بستگی دارد.



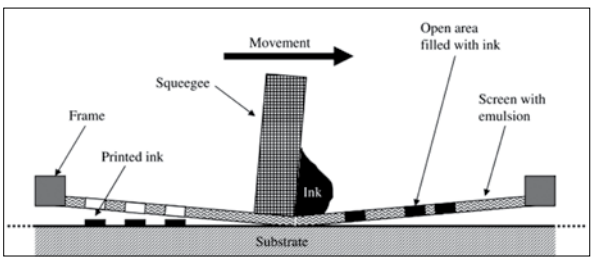
شکل ۵- نمای کلی از نحوه انجام عمل پوشاندن چرخشی [۹]

پوشاندن توسط تیغه[12]

روش دیگری که با آن می‌توان یک لایه با ضخامت دلخواه (در حدود ۱۰-۵۰۰ میکرومتر) ایجاد کرد، روش پوشاندن توسط تیغه می‌باشد. در این روش که نسبت به روش قبل میزان دورریز مواد خیلی کمتر می‌شود، مواد توسط یک تیغه تیز که در فاصله دلخواه از زیرلایه قرار گرفته پخش می‌شوند. مواد باید در جلوی تیغه ریخته شده و تیغه با یک سرعت ثابت آنها را پخش می‌کند.

چاپ تصویر[13]

این روش که قبلاً نیز در ساخت سلول‌های خورشیدی کریستال سیلیکانی به آن اشاره شد، توسعه آن به اوایل قرن بیستم برمی‌گردد و دارای تکنیک‌های بسیار متنوعی می‌باشد. در این روش چون مواد اصلا هدر نمی‌روند صرفه‌جویی زیادی در هزینه‌ها خواهد شد. در این روش نیاز به یک فیلم با ضخامت زیاد و محلول با چسبناکی بالاو فراریت کم می‌باشد. فرایند انجام این کار در شکل (۵) به صورت کلی آورده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، تصویر که از مواد چوبی ساخته شده روی فریم چسبانده شده است. تصویر به مواد امولسیونی که برای محلول پوششی غیر قابل نفوذ هستند، منتقل می‌گردد. سپس با ریختن محلول پوششی در فریم و چسباندن آن به زیرلایه، محلول از محل‌های مورد نظر عبور کرده و طرح را به روی زیرلایه منتقل می‌نماید.

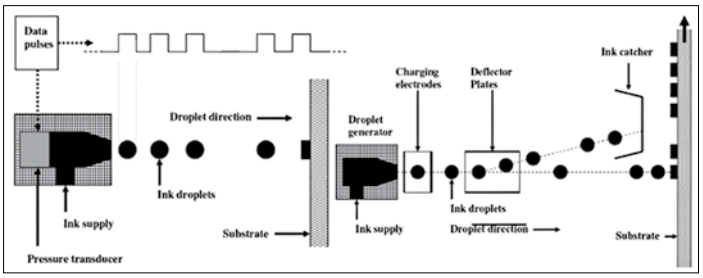


شکل ۶- تصویر پروسه چاپ تصویر [۹]

با بهبود ســاختار روش چاپ تصویر به صورت اسکوئیجی[۱۴] می‌توان از این روش در تکنیک‌های رول به رول اســتفاده کرد. این ســاختار در شکل (۹) نشان داده شده است.

چاپ جوهر افشان[۱۵]

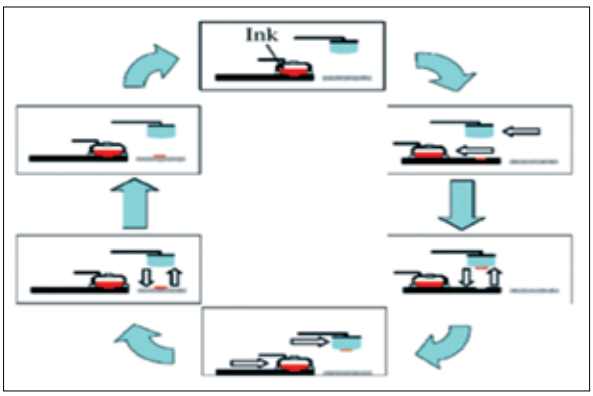
این روش که از دیدگاه صنعتی یک روش نسبتاً جدید است، به راحتی توســط چاپگرهای جوهرافشان ارزان قیمت قابل انجام است. در نمونه صنعتــی این نوع چاپگرها مواد بکار رفته قابل تغییر می‌باشــند. نوک چاپگر معمولاً باید از جنس ســرامیک باشد تا در مقابل مواد ارگانیک مقاوم باشــد. با اســتفاده از این تکنیک براحتی می‌توان به رزولوشــن 300dpi یا حتی 1200dpi رســید. تنها مشــکل ایــن روش محدودیت ســرعت آن می‌باشد. ضخامت خشــک مواد از طریق تعداد قطرات که روی ســطح پاشیده می‌شود تعیین می‌گردد. در شکل (۷) اصول کلی این روش و تصویر یک نمونه صنعتی این چاپگر آورده شده است.



شکل (۷)- نمای کلی روش چاپ جوهر افشان [۹]

چاپ بالشتکی[۱۶]

برای چاپ روس سطوح ناصاف و یا سطوح محدب و مقعر فقط چندین تکنیک هســتند که خوب عمل می‌کنند. یکی از این تکنیک‌ها چاپ بالشتکی می‌باشد که چندین مزیت دیگر را نیز به همراه دارد. اما این تکنیک فقط برای سطوح کوچک مناسب بوده و قادر است یک تصویر دو بعدی را چاپ کند. این روش شــبیه روش چاپ افست می‌باشد که مهر ژلاتینی از جنس سیلیکان طرح را از روی گراور به زیرلایه منتقل می‌نماید. چرخه انجام این عملیات در شکل (۸) نشان داده شده است.

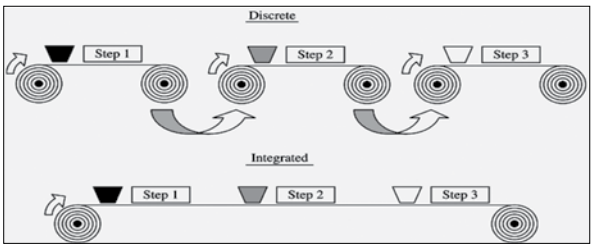


شکل (۸)- چرخه عملیات چاپ بالشتکی [۹]

۲-۳-۲- تکنیک‌های رول به رول

تمام موارد بررســی شــده در قســمت تنهــا روی یــک زیرلایه عمل می‌کردند، اما مواردی که در این بخش بررســی می‌شــوند قابلیت این را دارند که روی زیرلایه‌های وســیع‌تر که از دو طرف روی رول تابیده شده‌اند، عمل چاپ را انجام دهند.

برای عمل چاپ ابتدا شــبکه مورد نظر از رول اول باز شــده و پس از انجام عمل چاپ و مابقی فرآیندها از قبیل: گرمادهی، خشک کردن و ... دوباره روی رول دوم پیچیده می‌شود. در حالت کلی چون در ساخت ســلول‌های خورشــیدی ارگانیک نیاز به لایه‌های مختلف می‌باشــد، قراردادن این لایه‌ها به دو روش کلی مجزا و یکپارچه مطابق شکل (۹) می‌تواند انجام شــود. نکته‌ای که در مورد این روش‌ها باید به آن اشاره کرد اینست که با توجه به تجاری شدن ساخت سلول‌های خورشیدی ارگانیک شرکت‌های سازنده به دلیل رقابتی بودن بازار، اطلاعات بسیار کمی در مورد خطوط تولید جدید ارائه می‌نمایند.



شکل ۹- دو روش کلی R2R به صورت مجزا و یکپارچه [۹]

۳- برآورد هزینه نصب سلول‌های خورشیدی WP

مهمترین مشــکل توسعه سیستم‌های فتوولتائیک به عنوان یک منبع انرژی تجدید پذیر هزینه بالای سرمایه گذاری این سیستم‌ها می‌باشد. خوشبختانه در سال‌های آینده انتظار می‌رود که هزینه سرمایه‌گذاری برای ساخت این سیستم‌ها کاهش چشم‌گیری داشته باشد. از طرفی با پیشرفت فن‌آوری می‌توان به کارایی‌های بالاتر نیز دست یافت. از اینرو پیش‌بینی می‌شــود که قبل از ســال ۲۰۱۵ هزینه این سیستم‌های با سیســتم‌های سوخت فسیلی قابل رقابت باشد و تا قبل از سال ۲۰۲۰ در سرتاسر جهان به صورت گسترده مورد استفاده قرار بگیرند.

۳-۱- قیمت پانل‌های فتوولتائیک

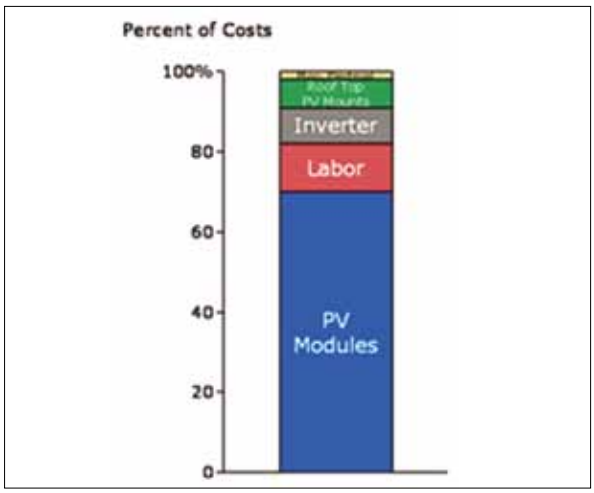
هزینهٔ انرژی در یک سیســتم تجدید پذیر با مشخص کردن انرژی که در مدت زمان طول عمر به علاوهٔ بیست سال و کل هزینه در طول عمر آن، به دست می‌آید. با این وجود مقایسهٔ این قیمت‌ها با قیمت انرژی در منابع رایج، ممکن اســت اشتباه باشــد. یک نکته آن است که این مقایسه برای هزینهٔ سیستم فتوولتائیک در بیست سال آینده است، در حالی که قیمت انرژی الکتریکی مصرفی، قیمت حال حاضر اســت که معمولا بر اســاس نیروگاه‌هایی با طول عمر بالا به دست می‌آید. برای تصحیح این خطا، باید قیمت انرژی ناشــی از منابع رایج را طی بیست سال آینده تخمین زد که البته کاری دشوار می‌باشد.

مشکل بعدی آن است که هزینه‌ها به شدت وابسته به فرض‌هایی است که در آنالیز قیمت به کار می‌روند. برای مثال، هزینه‌های ناشی از قرض گرفتن پول برای خرید سیستم فتوولتائیک ، ممکن است هزینه‌ی کل سیســتم را دو برابر کند. همچنین هزینه‌ها به میزان تابش خورشید و محل قرار گرفتن سیســتم فتوولتائیک وابســته است. واضح است که مکان‌هایی با تابش بالای خورشید، هزینه‌ی برق کمتری دارند (اگر چه هزینهٔ اولیه سیستم یکسان است).

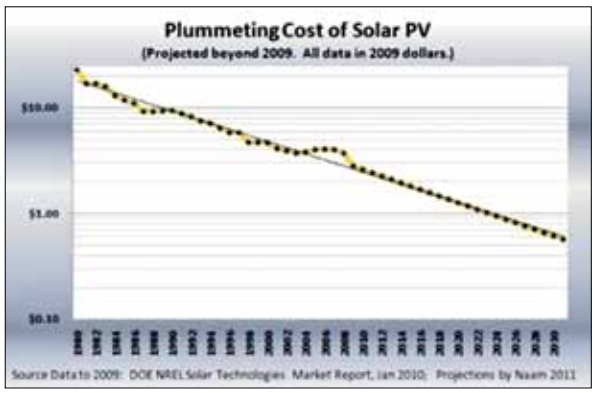
در نهایت سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر دارای هزینه‌های جانبی چون نصب سیســتم هستند که این نوع از هزینه‌ها کشور به کشور متفاوت

می‌باشند و این چنین اثرهایی به راحتی قابل اعمال در کل هزینه‌ها نیستند.

طبق نمودار شکل (۱۰) حدود ۷۰% قیمت سیستم‌های فتوولتائیک، هزینه ماژول‌های فتوولتائیک می‌باشد. کاهش قیمت سلول تاثیر به سزایی در کاهش قیمت تمام‌شده سیستم‌های فتوولتائیک خواهد داشت (شکل ۱۱).



شکل ۱۰- میزان درصد هزینه بخش‌های مختلف یک سیستم فتوولتائیک [۱۰]



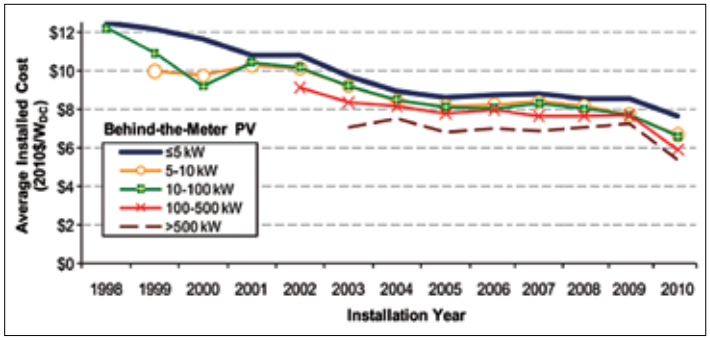
شکل ۱۱- نمودار پیش‌بینی کاهش قیمت سلول‌های خورشیدی [۱۱]

۳-۲- هزینه سیستم‌های نصب‌شده به طور کامل

هزینه معمول یک سیستم فتوولتائیک شامل هزینه تجهیزات و هزینه نصب سیستم می‌باشد، که معمولاً برحسب دلار بر وات ارائه می‌شود. متوسط هزینه یک سیستم خانگی می‌تواند از $2000 تا $50,000 باشد.

- متوسط هزینه کلیه تجهیزات شامل پانل، مبدل، پایه‌های نصب تجهیزات الکتریکی و ... در حدود $5/W در هر وات می‌شود. در صورت استفاده از باتری پشتیبان $2/W نیز به آن اضافه می‌گردد.
- متوسط هزینه نصب در حدود $2/W بوده که شامل نصب فیزیکی سیستم و اتصال آن به شبکه می‌باشد.

در شکل ۱۲ متوسط هزینه سیستم‌های نصب‌شده به طور کامل بر حسب ظرفیت آنها در سال‌های مختلف نشان داده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود هزینه سیستم‌های نصب‌شده برای سیستم‌ها با ظرفیت بالا در فاصله سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ کاهش یافته است.



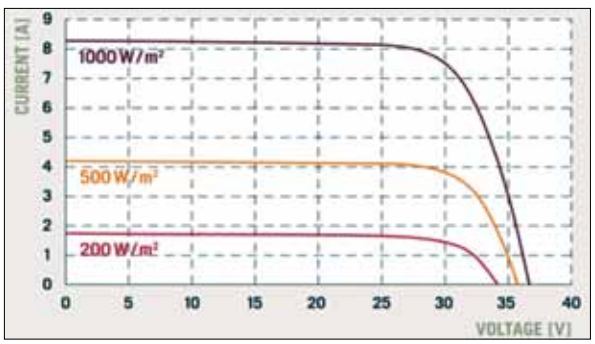
شکل ۱۲- متوسط هزینه سیستم‌های نصب‌شده در امریکا برای ظرفیت‌های مختلف [۱۲]

۴- بررسی شرایط اقلیمی در انتخاب سلول خورشیدی

شرایط اقلیمی یک منطقه برای استفاده از سلول‌های خورشیدی نقش بسیار مهمی دارند. برای رسیدن به حداکثر راندمان یک نوع سلول خورشیدی باید پارامترهای زیادی از جمله: نوع، جنس و راندمان نامی سلول خورشیدی، میزان تابش نور خورشید در روز، فصل و سال، دما، رطوبت، میزان گرد غبار و نوع آب و هوا از نظر ابری یا آفتابی بودن، را در نظر گرفت. از این رو در ادامه به بعضی از این موارد خواهیم پرداخت.

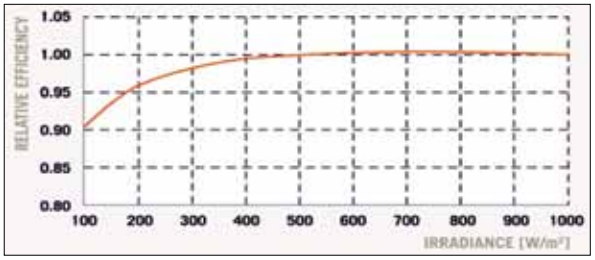
۴-۱- اثر میزان شدت تابش نور خورشید در راندمان و توان خروجی سلول خورشیدی

جهت بررسی اثر میزان تابش روی توان خروجی سلول خورشیدی، به عنوان نمونه ماژول فتوولتائیک تجاری شرکت Q-Cells در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، میزان تابش خورشید با جریان تقریباً یک رابطه خطی داشته و از آنجا که ولتاژ تغییر چندانی نمی‌کند، بنابراین با کاهش میزان تابش، حداکثر توان خروجی نیز به صورت خطی کاهش می‌یابد. از نظر جغرافیایی مناطقی این خصوصیت را دارند، که در نواحی استوایی قرار دارند. کشور ما با توجه به اینکه در نیمکره شمالی واقع شده است، بدلیل نزدیکی به خط استوا پتانسیل مناسبی از نظر میزان و شدت تابش دارد که در بخش اول به آن اشاره شد.



شکل ۱۳- نمودار تغییرات ولتاژ جریان و توان حداکثر سلول خورشیدی بر حسب میزان تابش نور خورشید [۱۳]

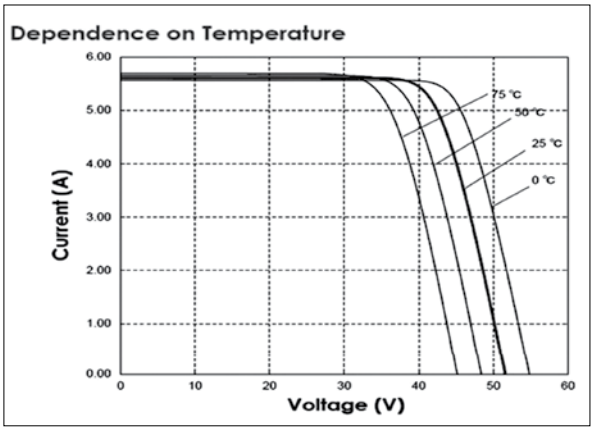
عامل دیگری که باید به آن اشاره کرد کاهش راندمان سلول‌های خورشیدی با کاهش شدت تابش انرژی خورشیدی می‌باشد. هماهنگونه که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود کاهش شدت نور به کمتر از $400W/m^2$ علاوه بر کم شدن توان خروجی، باعث کاهش راندمان نامی سلول نیز کاهش می‌شود. در میزان تابش $100W/m^2$ این راندمان تا ۱۰% افت خواهد کرد.



شکل ۱۴- تغییرات راندمان در تابش‌های کم [۱۳]

۴-۲- اثر دما در راندمان سلول خورشیدی

با توجه بـه افزایش تعداد زوج الکترون- حفره‌هـای ذاتی در دماهای بالاتـر، این امر موجب کاهش راندمان سـلول خورشـیدی می‌شـود. همانگونه که در شـکل (۱۵) نشان داده شـده است، ماکزیمم جریان اتصـال کوتاه به افزایش دما تغییر چندانی نمی‌کند، اما ماکزیمم ولتاژ مدار باز کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش دما پارامتر FF[۱۷] و در نهایت راندمان سلول کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵- نمودار جریان یک سلول خورشیدی بر حسب دما [۱۴]

۴-۳- بررسی شرایط اقلیمی چند شهر از کشور [۱۵]

۴-۳-۱- میزان متوسط سالیانه

در این بخش متوسط سالیانه پارامترهای تعداد ساعات آفتابی، حداکثر دما، حداقل دما و تعداد روزهای صاف شـهرهای مشـهد، کاشمر، یزد و بیرجند طبق آمار ارائه شـده توسط سـازمان هواشناسی جمهوری اسـلامی ایران برای سـال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ به صورت جدول (۱) ارائه شده‌اند.

با مقایسـه دو شهر مشهد و یزد طبق جداول و نمودارها، از نظر میزان تابش شـهر یزد وضعیت بهتری نسبت به شهر مشهد دارد. با توجه به کاهش راندمان با افزایش دما و بالاتر بودن دمای سطح پانل نسبت به محیط به دلیل در معرض مستقیم نور خورشید بودن طبق جدول (۱) شهر مشهد وضعیت بهتری از نظر کاهش راندمان در دمای بالا دارد.

جدول (۱)- جدول مقایسه شرایط اقلیمی چند شهر ایران

شهر	ساعات آفتابی	حداکثر دما	حداقل دما	تعداد روزهای صاف
مشهد	۲۹۷۸,۴	۲۲,۶	۹,۲	۲۱۲,۰
کاشمر	۳۳۸۸,۹	۲۴,۲	۱۲,۴	۲۷۳,۰
یزد	۳۴۸۳,۳	۲۷,۴	۱۲,۷	۲۶۳,۰
بیرجند	۳۴۵۱,۳	۲۴,۸	۸,۹	۲۷۲,۰

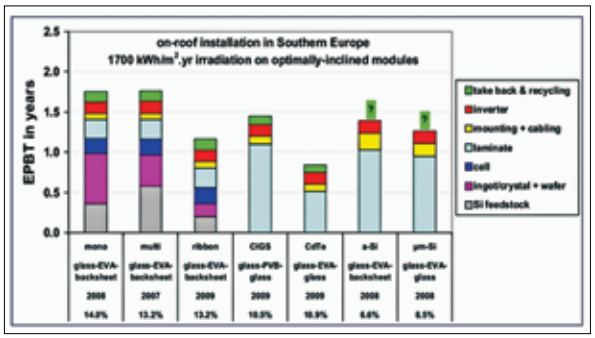
از نقطه نظر پارامترهای دیگر محیطی نیز می‌توان به میزان بارش‌های فصلی اشـاره کرد، با وجود اینکه هوای ابری می‌تواند راندمان سـلول خورشـیدی را به میزان ۷۰% کاهش دهد، اما این بارندگی‌ها می‌تواند در تمیز کردن سـطح پانل خورشـیدی از آلودگی و گرد و غبار کمک کند.

۵- بازگشت سرمایه

مدت زمان بازگشـت سـرمایه[۱۸] در سیسـتم‌های فتوولتائیک به این معناست که یک سیستم فتوولتائیک چه مدت کار کند تا بتواند معادل انرژی استفاده شده برای تولید خود را تولید کند. سوال اساسی که در مورد این فن‌آوری مطرح می‌شود اینست که آیا اصولاً این روش تولید انرژی مقرون به صرفه می‌باشد یا نه؟

۵-۱- مدت زمان بازگشت سرمایه انواع سلول‌های خورشیدی

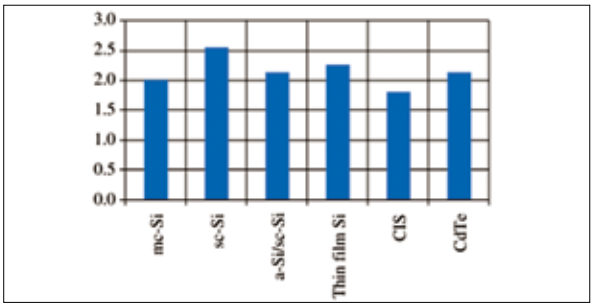
مدت زمان بازگشـت سـرمایه و نقش هر یک از این عوامل ذکر شده در شکل (۱۶) برای انواع سلول‌های خورشیدی نشان داده شده است.



شکل ۱۶- مدت زمان بازگشت سرمایه به همراه نقش هر عامل برای انواع سلول‌های خورشیدی [۱۶]

همانگونه که در این شـکل مشاهده می‌شود این اندازه‌گیری برای میزان تابش $1700kWh/m^2$ انجام شده است.

با توجه اینکه در اکثر نقاط ایران میزان تابش بیشـتر از این مقدار بوده ($1800\text{-}2200kWh/m^2$) می‌توان نتیجه گرفت که بازگشـت سرمایه برای کشورمان ایران از مقادیر نشان داده شده در این نمودار نیز کمتر خواهد بود. با نگاه کلی به این نمودار می‌بینیم که در سـال ۲۰۰۹ با پیشـرفت فن‌آوری، مدت زمان بازگشـت سرمایه تمام انواع سلول‌های خورشیدی زیر دوسال بوده و برای بعضی از مدل‌های لایه نازک این زمان زیر یکسال می‌باشـد. در بررسی صورت گرفته برای سیستم‌های فتوولتائیک خیلی بزرگ که در مرجع [۱۷] انجام شده است این بازگشت سرمایه به صورت نمودار شکل (۱۷) برای انواع سلول‌های خورشید بدست آمده است.



شکل۱۷- مدت زمان بازگشت سرمایه برای سیستم‌های فتوولتائیک خیلی بزرگ [۱۷]

۶-انتخاب ساختار مناسب به منظور تولید بومی

۶-۱-اهمیت موضوع

با بررسی‌های صورت گرفته در بخش‌های قبلی شامل: بررسی ساختار انواع مختلف، بررسی انواع فن‌آوری‌های ساخت، بررسی روش‌های ساخت، بررسی میزان هزینه ساخت و بازگشت سرمایه و بررسی شرایط اقلیمی موثر در راندمان حال نوبت به پیشنهاد بهترین نوع سلول خورشیدی، بهترین منطقه برای ساخت کارخانه و پیشنهاد مناسب‌ترین منطقه برای نصب این سیستم‌ها در کشورمان، می‌باشد. از آنجا که در بخش ۸ فواید اقتصادی موثر ناشی از راه‌اندازی این زنجیره تولید در کشور بررسی شد، این فن‌آوری می‌تواند در میزان رشد اقتصادی، میزان تولید ناخالص ملی، افزایش میزان اشتغال و بکارگیری نیروی‌های متخصص در کشورمان نیز نقش تعیین کننده‌ای در سال‌های آتی داشته باشد. بنابراین انتخاب صحیح یک ساختار مناسب بدلیل نیاز به سرمایه‌گذاری زیاد در این بخش باید با بررسی کامل و با مشورت کارشناسان این فن انجام شود.

۶-۲-بررسی کلی سیستم‌های فتوولتائیک به روش SWOT[۱۹]

آنالیز سیستم‌های فتوولتائیک به روش SWOT در واقع بررسی مزایا، معایب، فرصت‌ها و تهدیدهای استفاده از این فن‌آوری می‌باشد. با مقایسه این پارامترها می‌توان به امکان‌سنجی بهتری برای تولید بومی سیستم‌های فتوولتائیک رسید.

۶-۲-۱- چگونگی ارزیابی کلی فن‌آوری‌های مختلف سیستم‌های فتوولتائیک [۱۸]

برای انتخاب یک فن‌آوری به منظور تولید بومی سیستم‌های فتوولتائیک، باید پارامترهای گوناگونی را مورد بررسی قرار داد. از این رو جهت مقایسه کلی به روش SWOT، فن‌آوری‌های لایه نازک، تک کریستال سیلیکانی و پلی کریستال سیلیکانی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲)- مقایسه کلی فن‌آوری‌های لایه نازک، تک کریستال سیلیکانی و پلی کریستال سیلیکانی [۱۸]

	Thin film solar cells	Monocrystalline solar cells	Polycrystalline/ Multi crystalline solar cells
Construction	Thin film made by depositing one or more thin layers (thin film) of photovoltaic material on a substrate.	Monocrystalline cells are cut from a chunk of silicon that has been grown from a single crystal.	A polycrystalline cell is cut from multifaceted silicon crystal.
Efficiency	Less efficient than polycrystalline and monocrystalline panels; Efficiency range – 10% to 12%	Efficient compared to both polycrystalline and thin film. Efficiency range – 15 to 19%	More efficient than thin film solar cell but less efficient than Monocrystalline solar cell. Efficiency range - 11-15%
Flexibility	Yes (using plastic glazing)	No	No
Weight	Light weight compared to monocrystalline and polycrystalline cells.	Heavier compared to thin film but less in weight compared to polycrystalline cells,	
Price	$0.93 per watt (€0.69 per watt)	$1.12 per watt (€0.83 per watt)	$1.02 per watt (€0.75 per watt)
Area (Avg. output per 1000 m²)	0.623 MW	0.98-1MW	0.91MW
Stability	Less stable	Very good stability	Good stability and better than thin films.
Performance	Performance is less compared to monocrystalline cells.	Better than polycrystalline cells and thin film solar cells.	Perfonmance is less compared to monocrystalline cells
Temperature	Largely unaffected while operating under higher temperatures	Operate at decreased efficiencies in higher temperatures	Operate at wide range of temperatures.

۶-۳- انواع فن‌آوری‌های ساخت بر پایه سیلیکان

۶-۳-۱- فن‌آوری تولید پلی‌سیلیکان

از آنجا که صنعت ساخت پلی سیلیکان برای کاهش قیمت‌ها در فاز توسعه ظرفیت می‌باشد، این موضوع ورود تولید کنندگان جدید را به این بخش دشوار کرده و نیاز به سرمایه‌گذاری زیادی در این بخش می‌باشد. بنابراین برای کسانی که می‌خواهند در این عرصه ورود کنند باید به موارد زیر توجه نمایند:

- ظرفیت تولید باید اینقدر بزرگ باشد که از لحاظ قیمتی قابل رقابت با بازار جهانی باشد.
- داشتن انرژی ارزان و بدون وقفه الکتریسته برای تولید ضروری است چون ۲۶% قیمت تمام شده مربوط قیمت الکتریسیته می‌باشد.
- در زنجیره تولید c-Si، کاهش CAPEX (هزینه تجهیزات) برای پلی سیلیکان دارای بالاترین مقدار می‌باشد. از این‌رو دسترسی به سرمایه‌های کم هزینه (از قبیل وام‌های و کمک‌های دولتی با سود کم) ضروری می‌باشد.

۶-۳-۲- فن‌آوری تولید شمش و ویفر

با بهبودهای صورت گرفته در فرآیندهای ساخت، میزان مواد مصرفی و استفاده از انرژی الکتریسیته کاهش یافته است بنابراین انتظار می‌رود که قیمت تولید ویفر نیز کاهش یابد. از این‌رو قیمت تمام شده سلول خورشیدی نیز کاهش می‌یابد.

بنابراین شرکت‌های خصوصی و تولیدکنندگان باید به موارد زیر در مورد تولید ویفر و شمش دقت نمایند:

- تولید ویفر و شمش به تنهایی موضوعی چالش برانگیز می‌باشد. از این‌رو این دسته از تولید کنندگان باید در اهداف بلند مدت خود تولید پلی‌سیلیکان و تولید سلول را در نظر داشته باشند که با مجتمع سازی بتوانند هزینه‌ها را کاهش دهند.
- مقیاس کارخانه و حجم تولید در این زمینه کاملاً در کاهش قیمت و توانایی رقابت با دیگر تولیدکنندگان تاثیرگذار می‌باشد.
- دسترسی به انرژی ارزان و پایدار در این بخش نیز ضروری می‌باشد. از آنجا که تولیدکنندگان موجود در این زمینه پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در این فن‌آوری داشته‌اند و با توجه به نیاز به سرمایه‌گذاری کلان در این بخش، در حال حاضر این فن‌آوری پیشنهاد نمی‌گردد.

۶-۳-۳- فن‌آوری تولید سلول

در سال ۲۰۱۰ رکورد تولید سلول‌های فتوولتائیک به حدود 30GW رسیده است. این در حالیست که میزان نصب سیستم‌های فتوولتائیک در جهان کمتر از 20GW بوده است. این شکاف خیلی بزرگ میان عرضه و تقاضا در سال‌های آینده نیز ادامه خواهد داشت و این امر باعث کاهش قیمت سلول و ماژول خواهد شد. بنابراین برای سرمایه‌گذاری در این بخش توجه به نکات زیر ضروری می‌باشد:

- سلول‌های خورشید در حال تبدیل شدن به کالای مصرفی می‌باشند که بهترین روش تمایز محصولات بهتر توجه به راندمان بیشتر می‌باشد. بنابراین در این بخش باید به سرمایه‌گذاری در بخش تحقیق و توسعه و بهبود فرآیندها و استفاده صحیح از مواد توجه ویژه شود.
- برای رقابت با دیگر تولیدکنندگان در این بخش باید به مجتمع‌سازی تولید سلول خورشیدی به منظور کاهش هزینه‌ها توجه ویژه گردد که این امر نیاز به استفاده از وسایل پیشرفته و سرمایه‌گذاری زیادی دارد.

۶-۳-۴- فن‌آوری ساخت ماژول

ساخت ماژول از نظر هزینه و راندمان کاملاً وابسته به فعالیت‌ها و اتفاقات صورت گرفته در بخش‌های دیگر (تولید پلی سیلیکان، شمش و ویفر، و سلول) است. همچنانکه قبلاً نیز ذکر گردید هزینه ساخت ماژول به شدت رو کاهش می‌باشد. بنابراین برای توسعه و سرمایه‌گذاری در این فن‌آوری باید به موارد زیر توجه نمود:

ساخت ماژول در واقع یک فرآیند اسمبل کردن می‌باشد و کمترین سرمایه را برای تجهیزات نیاز دارد. این بدین معناست که وارد شدن به این بخش خیلی ساده و آسان بوده و موانع کمتری بر سر راه تولیدکنندگان وجود خواهد داشت.

- حداقل اندازه کارخانه تولید ماژول می‌تواند در حدود 10MW یا حتی کمتر باشد. هر چند باید در نظر داشت که هرچه ظرفیت تولید بالاتر باشد قیمت تمام شده محصول کمتر خواهد شد.
- سرمایه کاری نسبتاً زیادی برای خرید مواد اولیه و سلول در این بخش لازم است.
- شرکت‌های سازنده ماژول برای متمایز ساختن محصولات خود در بازار رقابتی، تلاش می‌کنند که یک نام تجاری برای محصولات خود داشته باشند.
- به منظور داشتن قابلیت رقابت با دیگر شرکت‌ها، سازندگان باید در اهداف بلند مدت خود تولید سلول را نیز در نظر داشته باشند.

۶-۳-۵- مقایسه انواع فن‌آوری‌های ساخت بر پایه سیلیکان

در جدول (۳) مقایسه کلی بین انواع فن‌آوری‌های ساخت سلول‌های خورشیدی از ماده سیلیکان انجام شده است.

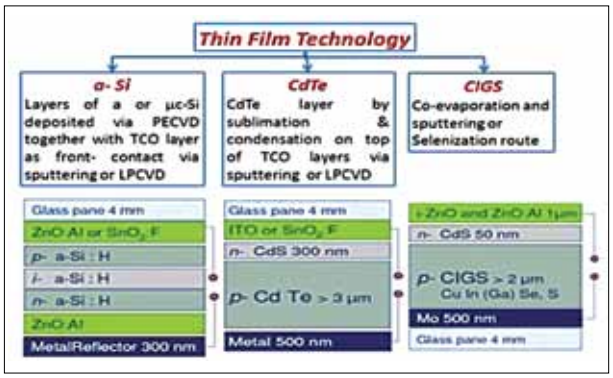
با توجه به کمبود پلی سیلیکان در سال ۲۰۰۸ و بالا رفتن قیمت آن در حدود 400$/kg قیمت ماژول نیز تا حدود 4$/Wp افزایش یافت. در این زمان اکثر شرکت‌ها، تحقیقات خود را معطوف به فن‌آوری لایه نازک نمودند که هم مواد کمتری مصرف می‌کرد و هم هزینه تولید کمتری داشت. اما از سال ۲۰۰۹ به بعد که قیمت تولید سیلیکان کاهش یافت تولیدکنندگان این بخش را برای افزایش راندمان قابل رقابت با سیلیکان به چالش کشانده است.

جدول (۳)- مقایسه انواع فن‌آوری‌های ساخت بر پایه سیلیکان [۱۸]

	Poly Silicon	Ingot & Wafer	Cells	Module
Margins	~ 50%	~20%	>10% (June 2011)	~7-10%
Investments	US $ 0.75 million/MW	US $ 0.5 to 0.75 million /MW	~ US $ 1 million/MW	~US $ 100k/MW
Optimum Scale of Investment	700 – 1000MW ($ 560 - $ 800 million)	80 – 100 MW ($ 45 - $ 60 million)	30 – 50 MW ($30 - $ 50 million)	10 – 20 MW ($ 1 - $ 2 million)
Project timeline	2.5-3 years	1-2 years	~ 1 year	4-6 months
Cost Drivers	Electricity, CAPEX	CAPEX, Raw materials & Consumables	Raw materials, R&D	Raw materials
Utilization requirement	High – continuous run rate	High – continuous run rate	Medium – continuous run rate	Low – Run rate variable to demand
Market participation	8 players ~ 80% market share	8 players ~ 70% market share	10 companies ~ 40% of market share.	Fragmented
Vertical Integration	Pure play companies predominant; 2 of the top 10 companies are vertically integrated	5 of the top 10 companies are vertically integrated	2 of the top 10 companies are vertically integrated	Most players are integrated forward and/or backward.

۶-۴- فن‌آوری‌های ساخت سیستم‌های فتوولتائیک لایه نازک

در شکل (۱۸) سه فن‌آوری رایج و تجاری موجود در بازار تولید سلول‌های خورشیدی لایه نازک با یکدیگر مقایسه شده‌اند که در بخش‌های بعدی هر یک از آنها بررسی خواهند شد.



شکل (۱۸)- انواع مختلف سلول‌های خورشیدی لایه نازک تجاری شده [۱۸]

۶-۴-۱- فن‌آوری ساخت a-Si

در حال حاضر از نظر تجاری و میزان تولید، فن‌آوری ساخت a-Si نسبت به دو فن‌آوری دیگر لایه نازک پیشرفت بهتری داشته و این تنها به دلیل ظهور زودتر این فن‌آوری در بازار می‌باشد. بنابراین برای سرمایه‌گذاری در این بخش باید به موارد زیر توجه نمود:

- با توجه به محدودیت‌های موجود در راندمان، برای رقابت با دیگر فن‌آوری‌ها باید هدف اصلی کاهش قیمت تولید باشد.
- در مقایسه با دیگر فن‌آوری‌های لایه نازک مواد اولیه (Si) آن نه سمی و نه از عناصر کمیاب می‌باشد و به راحتی در دسترس می‌باشند.

۶-۴-۲- فن‌آوری ساخت CdTe

فن‌آوری ساخت CdTe بدلیل راندمان خوب و ارزان‌ترین فن‌آوری لایه نازک، در سال‌های اخیر رشد زیادی داشته است. تنها سوال اساسی در مورد سمی بودن ماده کادمیوم می‌باشد که می‌تواند باعث بروز مشکلاتی گردد. از این‌رو برای سرمایه‌گذاری در این بخش باید به موارد زیر توجه نمود:

- دسترسی به این فن‌آوری ساخت می‌تواند منجر به تولید سلول خورشیدی با هزینه کم شود.
- میزان تولید برای ثبات تولید و رقابت باید به اندازه کافی بزرگ باشد.
- باید به مشکلات ناشی از سمی بودن کادمیوم نیز غلبه کرد.

۶-۴-۳- فن‌آوری ساخت CIGS

با توجه به پتانسیل CIGS برای راندمان بیشتر، در صورت کاهش هزینه تولید، این فن‌آوری می‌تواند سهم بیشتری از بازار سلول‌های خورشیدی را به خود اختصاص دهد. شرکت‌هایی که خواهان سرمایه‌گذاری در این بخش هستند باید به نکات زیر توجه نمایند:

- از آنجا که فن‌آوری در حال رشد، توسعه و استاندارد شدن می‌باشد، ورود به این عرصه هم می‌تواند باعث چالش‌هایی شود و هم می‌تواند فرصت‌های زیادی را فراهم نماید.
- فن‌آوری CIGS برای اینکه بتواند با بقیه توانایی رقابت را داشته باشد، باید راه حلی را پیدا کند.
- فرصت موجود اینست که افزایش راندمان برای این فن‌آوری تا حدود نسبتاً زیادی به فن‌آوری‌های دیگر وابسته می‌باشد.

۶-۴-۴- مقایسه کلی انواع سلول‌های خورشیدی لایه نازک

در این بخش برای انتخاب بهتر فن‌آوری مناسب مقایسه کلی بین انواع مختلف سلول‌های خورشیدی لایه نازک انجام شده است (جدول ۴).

جدول ۴- مقایسه انواع مختلف سلول‌های خورشیدی لایه نازک با یکدیگر [۱۸]

	a- Si	*CdTe*	*CIGS*
Margins	8 %	32%	31%
Capital Investments*	$ 3 Million / MW	$ 1.5 Million / MW	$ 2 Million / MW
Project timeline	2.5 – 3 yrs	1.5 – 2 years	~ 2 Years
Cost Drivers	Raw materials and consumables, CAPEX depreciation	Raw materials and consumables, CAPEX depreciation	Raw materials and consumables, CAPEX depreciation
Utilization requirement	Variable to demand	Variable to demand	Variable to demand

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های انجام شده در این بخش و بخش‌های قبلی و وضعیت اقتصادی کشور در حال حاضر و تحریم‌های اعمال شده از طرف جامعه جهانی خرید تجهیزات و راه‌اندازی ساخت سلول‌های خورشیدی تک کریستال سیلیکانی، به نحوی که تولید آن قابل رقابت با محصولات دیگر شرکت‌ها باشد، توجیه اقتصادی ندارد. اما با تولید ماژول به صورت گسترده و کیفیت بالا می‌توان به این عرصه ورود داشت و در سال‌های بعد بخش‌های دیگر تولید را نیز توسعه داد.

در مورد سلول‌های خورشیدی لایه نازک بدلیل فن‌آوری ارزانتر و ساده‌تر و بازگشت سرمایه زودتر، و همچنین به علت اینکه این فن‌آوری‌ها هنوز به بلوغ کامل نرسیده‌اند، می‌توان با انتخاب استراتژی صحیح و انجام تحقیقات مستمر در این بخش پیشرفت‌های قابل رقابتی با دیگر کشورها داشت.

بنابراین تولید این‌گونه سلول‌های خورشیدی برای داخل کشور از نظر اقتصادی و توسعه صنعت ساخت سلول‌های خورشیدی مناسب‌تر می‌باشد. انتخاب هر یک از فن‌آوری‌های بسته به شرایط شرکت سرمایه‌گذار و میزان سرمایه‌گذاری می‌تواند مناسب باشد.

در جدول (۵) اطلاعات و شرایط خلاصه شده دو شرکت اروپایی برای خط تولید پانل‌های خورشیدی نیز ارائه گردیده است که می‌تواند برای مدیران، سرمایه‌گذاران و متخصصین مفید واقع گردد. نتایج این طرح در مطالعات راه‌اندازی خط تولید پانل‌های خورشیدی به ظرفیت 30MW شرکت نور ساخت اترک (شهر بجنورد) استفاده گردیده است.

***

جدول (۵)- اطلاعات و شرایط خلاصه شده خط تولید پانل‌های خورشیدی ارائه شده توسط دوشرکت

	شرکت ۱	شرکت ۲	توضیحات
ظرفیت خط	۱۲۰۰سلول بر ساعت	۱۰۰۰سلول بر ساعت	
تعداد پرسنل	۱۳ نفردر هر شیفت	۱۲ نفر در هر شیفت	بجز افراد مدیریتی و دفتری
فضای مورد نیاز	۱۰۴مترمربع	۱۷۰۰متر مربع	تنها خط تولید (غیرقبار و...)
ساخت پنل انعطاف پذیر	خیر(اما احتمالا با تغییراتی در مواد قابل حصول است)	بله	
اندازه پنل	تا ۲متر در ۱متر	تا ۲متر در ۱متر	
برق مصرفی	۲۴۴ کیلووات سه فاز	۳۶۰ آمپر با ۲۲۰ولت سه فاز	
شرایط محیط کار	۱۵تا ۳۵درجه سانتی گراد با رطوبت زیر ۷۵٪،اتاق تمیز کلاس ۷	۱۵تا ۳۵درجه سانتی گراد با رطوبت زیر ۷۵٪، اتاق تمیز کلاس ۷	
زمان مورد نیاز نصب	۴هفته	۳تا۴ هفته	
زمان تحویل ماشین آلات	۳ماه	۶ تا ۸ ماه	
معرفی تهیه کنندگان مواد اولیه	بله	بله	
اینترنت مونیتورینگ کل خط	بله	بله	
تولید مواد مضر برای طبیعت	خیر	خیر	
ارائه مدارک ماشین آلات	بله	بله	
تامین قطعات یدکی	بله	بله	بسیاری از قطعات در ایران قابل ساخت است
آموزش کادر فنی	بله	بله. حداقل یک ماه در آلمان در صورت آشنایی با زبان خارجی	
قیمت نهایی	۱۶۲۰۰۰۰ یورو(۴.۴سنت بر وات)	۲۹۵۰۰۰۰ (احتمالا ۲۵۰۰۰۰۰ یورو معادل ۸ سنت بر وات)	
TÜVهزینه گواهی	خیر(در صورت پرداخت ۴۵۰۰۰یورو قابل انجام است)	بله	
گارانتی ماشین آلات	۱سال	۲سال	

مراجع

[1] C. R. Becquerel AE, Academie d. Sciences 9, 1839.
[2] G. V. U. Hoffmann, Photovoltaic Solar Energy Generation. New York: Springer 2004.
[3] Sun Radiation Potential. Available: http://www.cleaner-energy.com.au/ce/solar-info/energy-from-the-sun
[4] M. Kanani. (1386). Office of Iran solar. Available: http://sabainfo.ir/newsdetail-4118-fa.html
[5] J. S. MoiniShahram, M. D. Manshadi, "Feasibility Study of Solar Energy in Iran and Preparing Radiation Atlas," Recent Advances in Environment, Energy Systems and Naval Science.
[6] Basic of Solar Cell Available: http://www.solarcell.net.in/
[7] J. S. Johan F. Nijs, JozefPoortmans, S. Sivoththaman, Robert P. Mertens, "Advanced Manufacturing Concepts for Crystalline Silicon Solar Cells," IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, vol. 46, 1999.
[8] J. P. a. V. Arkhipov, Thin Film SolarCells Fabrication, Characterization and Applications: John Wiley & Sons, 2006.
[9] F. C. Krebs, "Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques," Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 93, pp. 394–412, 2009.
[10] P. Perry. Solar Panel Costs. Available: http://www.trustyguides.com/solar-panels2.html
[11] Photovoltaics follow Moore's Law. Available: http://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/2011/03/16/smaller-cheaper-faster-does-moores-law-apply-to-solar-cells/
[12] N. D. Galen Barbose, Ryan Wiser, and Joachim Seel. (2010) Tracking the Sun IV:AnHistorical Summary of the Installed Cost of Photovoltaics in the United States from 1998 to 2010.
[13] Q.Peak 245-265. Available: http://www.q-cells.com/uploads/tx_abdownloads/files/Q-Cells_QPEAK_Data_Sheet_EN_2011-08_Rev04_WEB.pdf
[14]Temperature-Dependen.Available:http://blimpyb.com/diy-solar/best-solar-panels/919/
[15] Iran Meteorological Org. Available: http://www.irimo.ir/farsi/amar/map/index.asp
[16] Energy Payback Time. Available: www.ecn.nl(2009)
[17] K. K. Masakazu Ito, KosukeKurokawa, "Life-cycle analyses of very-large scale PV systems using six types of PV modules," Current Applied Physics, vol. 10, pp. 271-273, 2010.
[18] Clixoo, "Solar PV Manufacturing,"ed, 2011.

پی نوشت‌ها

1. Regular Bulk Material
2. Czochralski
3. Casting
4. True Directional Solidification (DS)
5. Electromagnetic Casting (EMC)
6. Ribbon
7. Screen –Printing Technology
8. Firing-through Plasma Enhancement Chemical Vapor Deposition
9. Printing and Coating Methods
10. Spin Coating
11. Photoresist
12. Doctor Blading
13. Screen Printing
14. Squeegee
15. Ink Jet Printing
16. Pad Printing
17. Fill Factor
18. Energy Payback Time (EPBT)
19. Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats