

مروری بر فناوری‌های تولید برق از انرژی خورشیدی و مقایسه آماری بزرگ‌ترین نیروگاه‌های خورشیدی جهان

■ محمد حسین شمس⁺، فرشاد خاوری¹، مسعود محمدی² و جلال نوری³
تهران، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی شریف، صندوق پستی: 13445-686

تاریخ دریافت: 1392/11/05 و تاریخ پذیرش: 1392/12/27

چکیده

رشد روز افزون نیاز به انرژی و پایان‌پذیری سوخت‌های فسیلی از یک سو و افزایش آلودگی‌های زیست محیطی از سوی دیگر، محرکی شده است که محققان و سرمایه‌گذاران در بخش انرژی، به سمت مهار و تامین انرژی از منابع تجدیدپذیر جذب شوند. با توجه به پتانسیل بالای تابش در مناطق وسیعی از کشور ایران اسلامی، از میان این منابع، انرژی خورشیدی دارای جذابیت بیشتری است. در یک طبقه‌بندی ساده، فناوری‌های تولید الکتریسیته از خورشید به سه دسته فتوولتائیک، متمرکزکننده گرمایش خورشیدی و فناوری‌های نوظهور، شامل حوضچه‌ها و تنوره خورشیدی تقسیم می‌شوند. در میان این سه دسته، فناوری فتوولتائیک که بر اساس تبدیل نور خورشید به الکتریسیته عمل می‌کند، بیشترین رشد را داشته و امروز کشورهای زیادی از آن در قالب متصل به شبکه و مستقل از شبکه استفاده می‌کنند. در میان دو دسته دیگر نیز فناوری گرمایش خورشیدی، به‌ویژه روش سهموی خطی گسترش بیشتری یافته است. همچنین، تحلیل آماری بزرگ‌ترین نیروگاه‌های احداث‌شده با فناوری‌های فتوولتائیک و گرمایشی نشان از برتری چشم‌گیر فناوری فتوولتائیک از بُعد هزینه احداث و سطح زمین اشغال‌شده، و نیز انعطاف‌پذیری نصب و راه‌اندازی در میان انواع فناوری‌های خورشیدی دارد.

واژگان کلیدی: انرژی خورشیدی، فناوری فتوولتائیک، سلول خورشیدی، فناوری متمرکزکننده گرمایش خورشیدی، ضریب ظرفیت

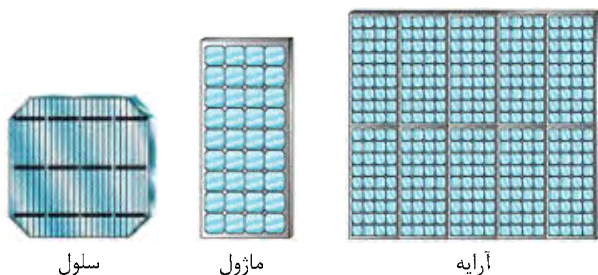
* عهده دار مکاتبات

+ شماره نامبر: 021-66053767 و آدرس پست الکترونیکی: Mhshams@alum.sharif.edu
1 شماره نامبر: 021-66053767 و آدرس پست الکترونیکی: Farshad_khavari@yahoo.com
2 شماره نامبر: 021-66053767 و آدرس پست الکترونیکی: Masood_mdi@yahoo.com
3 شماره نامبر: 021-66053767 و آدرس پست الکترونیکی: Jalalnouri@yahoo.com

1- مقدمه

خورشیدی⁷ تشکیل می‌شود.

توان تولیدی سلول و مدول خورشیدی به تنهایی ممکن است فقط برای شارژ یک باتری کوچک کافی باشد. برای ساختن سامانه‌ای با خروجی قابل توجه (نیروگاهی یا خانگی)، نیاز است که چند مدول با هم و به صورت هم‌زمان کار کنند. همان‌طور که سلول‌های خورشیدی به هم وصل می‌شوند تا مدول‌ها را بسازند، مدول‌ها هم باید برای ایجاد میزان مناسبی از ولتاژ و جریان، به صورت سری و موازی به هم متصل شوند. واحد ساخته شده به این طریق آرایه خورشیدی⁸ نامیده می‌شود. طرحواره‌ای از سلول، مدول و آرایه خورشیدی در شکل شماره 1 نشان داده شده است.



شکل 1: طرحواره سلول، مدول و آرایه خورشیدی

1-2- اجزای سامانه‌های فتوولتائیک

سامانه‌های فتوولتائیک مجموعه‌ای از تجهیزات تولید، کنترل، تبدیل، انتقال و ذخیره‌سازی توان هستند که با توجه به کاربرد تعریف شده برای آنها، یک یا ترکیبی از قابلیت‌های زیر را دارند:

1- تزریق برق به بارهای مستقیم (DC)؛

2- تزریق برق به بارهای متناوب (AC)؛

3- ذخیره‌سازی الکتریسیته؛

4- تزریق برق به شبکه.

ساده‌ترین سامانه فتوولتائیک مربوط به قابلیت اول و پیچیده‌ترین آن مربوط به ترکیب هر چهار قابلیت است. بیکره‌بندی و اجزای یک سامانه فتوولتائیک نیز براساس همین قابلیت‌ها تعیین می‌شود. شکل شماره 2 درخت اجزای یک سامانه فتوولتائیک و شکل شماره 3 طرحواره استقرار و ارتباط آنها در یک سامانه فتوولتائیک را نشان می‌دهد. در این سامانه که هر چهار قابلیت فوق و تقریباً تمامی اجزای یک سامانه کامل فتوولتائیک را دارد، از مدول یا آرایه برای تولید الکتریسیته و از پایه‌های ثابت یا ردباب‌ها برای نگهداری یا تنظیم جهت مدول‌ها استفاده می‌کند. با استفاده از ردباب‌های خورشیدی هوشمند می‌توان جهت مدول‌ها را مطابق با موقعیت خورشید در آسمان

برای تبدیل پرتوهای خورشیدی به الکتریسیته دو گزینه اصلی وجود دارد: (1) استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک و (2) استفاده از سامانه‌های جذب گرمایش خورشیدی. در روش فتوولتائیک پرتوهای خورشیدی به‌طور مستقیم توسط نیم‌رساناها به الکتریسیته تبدیل می‌شود. همچنین در روش گرمایشی، توان الکتریکی از طریق فرآیندهای ترمودینامیکی و با کمک تجهیزات مبدل گرما به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. روش‌های گرمایشی معمولاً به دو دسته متمرکزکننده و غیرمتمرکزکننده گرمای خورشید تقسیم می‌شوند که دسته دوم هنوز در مراحل تحقیق و توسعه قرار دارد. از بین دو فناوری فتوولتائیک و گرمایش خورشیدی، سرمایه‌گذاری‌ها در حوزه فتوولتائیک بسیار بیشتر بوده است. البته، در سال‌های اخیر پیشرفت‌هایی نیز در حوزه تأمین برق از انرژی گرمایی خورشید صورت گرفته است. با این حال، در بین تمام روش‌های تولید الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر، روش خورشیدی فتوولتائیک ساده‌ترین و ظریف‌ترین روش به‌شمار می‌رود.

این مقاله به معرفی انواع روش‌های تولید برق از انرژی خورشیدی می‌پردازد. ابتدا دو فناوری فتوولتائیک و متمرکزکننده گرمایش خورشیدی معرفی و در ادامه، به دو نمونه از سایر فناوری‌های تولید برق از انرژی خورشیدی و وضعیت پیشرفت آنها اشاره می‌شود. بخش پایانی این مقاله نیز به معرفی نمونه‌هایی از بزرگترین نیروگاه‌های خورشیدی عملیاتی به تفکیک انواع فناوری‌ها می‌پردازد.

2- فناوری فتوولتائیک

در فناوری فتوولتائیک پرتوهای خورشیدی توسط صفحات کوچکی از نیم‌رساناهای فتوولتائیک، موسوم به «سلول خورشیدی»⁴، به الکتریسیته تبدیل می‌شود. سلول‌های فتوولتائیک به دو شکل صفحه تخت⁵ و متمرکزکننده⁶ ساخته می‌شوند. نوع صفحه تخت همان سلول‌های خورشیدی رایج است که نور را بی‌واسطه به نیم‌رسانا می‌رساند و به الکتریسیته تبدیل می‌کند. ولی سلول‌های متمرکزکننده ابتدا نور خورشید را به کمک یک بازتابنده متمرکز و سپس آن را به سمت سلول خورشیدی هدایت می‌کنند. از اتصال سلول‌های خورشیدی با هم یک مدول

4 Solar Cell

5 Flat Plate

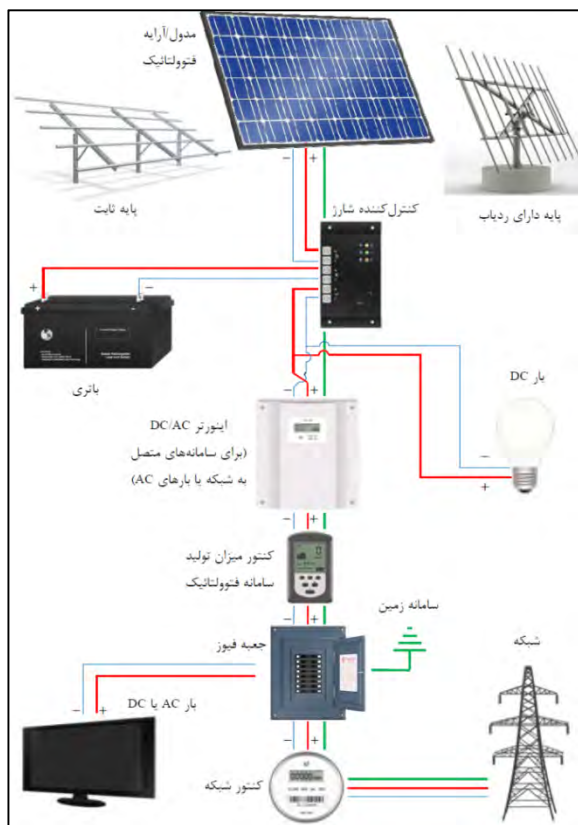
6 Concentrating

7 Solar Module

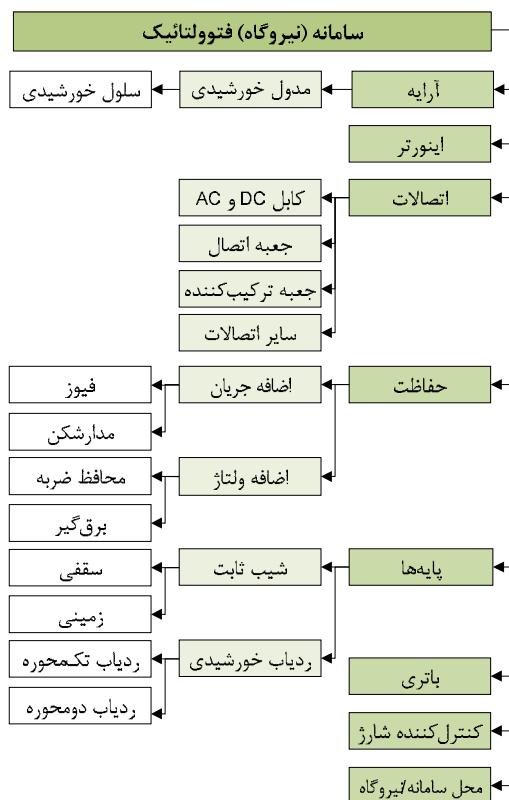
8 Solar Array

تنظیم و بازده سامانه‌های فتوولتائیک را افزایش داد.

شرایط مطلوبی برخوردار باشد.



شکل 3: فرآیند تولید انرژی الکتریکی در سامانه‌های فتوولتائیک



شکل 2: درخت اجزای نیروگاه‌های خورشیدی

2-2- فناوری‌های ساخت سلول خورشیدی

از زمان شناخت پدیده فتوولتائیک در نیمه اول قرن نوزدهم تا کنون، روش‌ها و فناوری‌های مختلفی برای ساخت و تولید سلول‌های خورشیدی ابداع و اجرا شده است. تا پیش از دهه 1980 میلادی، اغلب این روش‌ها به دلیل بازده کم، در سطح فعالیت‌های آزمایشگاهی و تحقیقاتی باقی مانده و جز کاربردهای خاص (مثل ماهواره‌ها و فضاوردوها) و محدود (مثل سیستم‌های فتوولتائیک کوچک و خانگی چند کیلوواتی) حضور جدی در عرصه صنعتی نیافته بودند. از میانه دهه 1980 که اولین سلول‌های خورشیدی با بازده 20% ساخته شد و با بالا رفتن قیمت سوخت، نگاه صنعتی به این فناوری نیز شکل جدی‌تری به خود گرفت و زمینه برای توجیه کاربردهای نیروگاهی این فناوری هموار شد.

با نگاهی به روند توسعه فناوری‌های سلول خورشیدی می‌توان آنها را به سه نسل زیر تقسیم کرد:

- فناوری‌های نسل اول، سلول‌های سیلیکون بلوری؛
- فناوری‌های نسل دوم، لایه نازک سیلیکونی و غیرسیلیکونی؛
- فناوری‌های نسل سوم، موسوم به فناوری‌های نوظهور بر پایه مواد آلی و چندپیوندی.

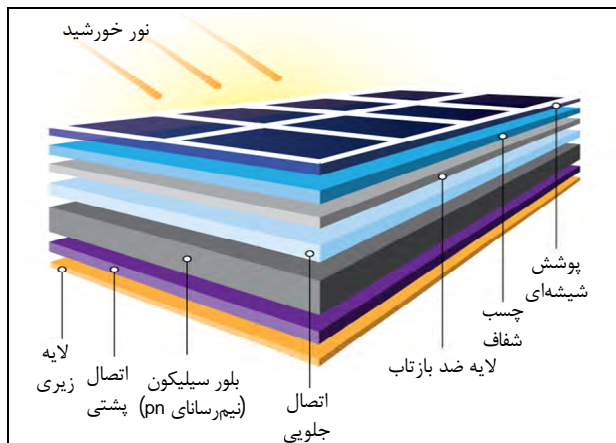
این فناوری‌ها در نمودار شکل شماره 4 دسته‌بندی شده‌اند.

خروجی مدول خورشیدی، جریان مستقیم (DC) است. در بسیاری از موارد این جریان پیش از استفاده، باید به جریان متناوب (AC) تبدیل شود. در سامانه‌های فتوولتائیک متصل به شبکه یا مستقل از شبکه با بار متناوب، این کار برعهده اینورتر⁹ است. در سامانه‌های مستقل از شبکه معمولاً از باتری برای ذخیره‌سازی توان مازاد تولیدی در طول روز استفاده می‌شود تا در ساعات شب یا شرایط ابری، اختلالی در تأمین توان مورد نیاز بارهای مصرفی ایجاد نشود. سامانه‌ای که هر سه قابلیت مصرف محلی (خانگی/صنعتی)، اتصال به شبکه سراسری و ذخیره باتری را داشته باشد، نیازمند یک فرآیند کنترلی دقیق است که توازن میان تولید، مصرف و ذخیره‌سازی الکتریسیته را برقرار سازد. اجرای این فرآیند را کنترل کننده شارژ برعهده دارد که از طریق تنظیم ولتاژ و جریان بهینه، توازن لازم را برقرار می‌کند.

اتصالات و تجهیزات حفاظت (مثل کابل‌ها، فیوزها و سامانه اتصال به زمین) نیز کارکرد ایمن سامانه فتوولتائیک را تضمین می‌کنند. محل نصب سامانه فتوولتائیک نیز باید به گونه‌ای انتخاب شود که از نظر تابش خورشید، وضعیت اقلیمی و زمین‌شناسی از

⁹ Inverter

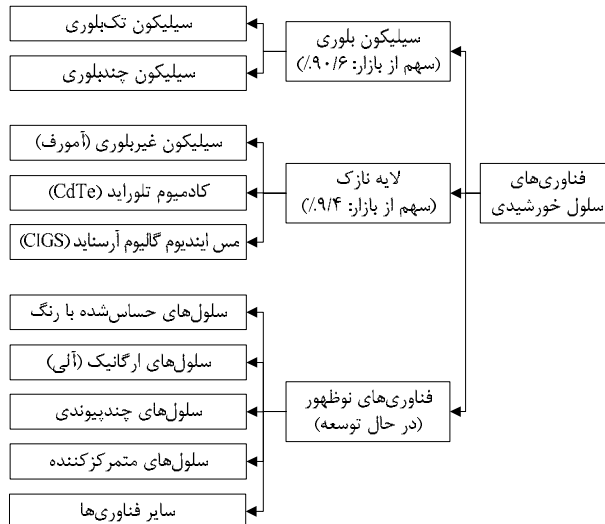
درصد، در تولید صنعتی بین 18 تا 22 درصد و بازده بهترین مدول‌های صنعتی آن نیز بین 16 تا 20 درصد است.



شکل 5: ساختمان لایه‌چینی سلول خورشیدی سیلیکون بلوری [1]

سلول‌های تک‌بلوری با وجود برخورداری از بازدهی بالا، هزینه تولید بسیار زیادی دارند. از این رو، تولیدکنندگان برای کاهش هزینه‌ها، به استفاده از سیلیکون چندبلوری روی آوردند. در این روش که سیلیکون جامد از انجماد سریع و کنترل‌شده سیلیکون مذاب حاصل می‌شود، انبوهی از بلورهای کوچک با ابعاد مختلف به یکدیگر متصل می‌شوند و سیلیکون چندبلوری را تشکیل می‌دهند. این ماده که به مراتب ساده‌تر و ارزان‌تر از سیلیکون تک‌بلوری به دست می‌آید، به دلیل نقص ساختار بلوری خود (نامنظمی در مرزهای اتصال بلورها) بازده کمتری هم در تبدیل نور خورشید به الکتریسیته دارد. از این رو، بازده سلول‌های خورشیدی سیلیکون چندبلوری در شرایط مطلوب آزمایشگاهی به 20% و در تولید صنعتی به 15% می‌رسد. بازدهی مدول‌های ساخته شده از این سلول‌ها نیز در حدود 14%-12% است.

شکل شماره 6 نمونه‌ای از سلول‌های خورشیدی تک‌بلوری و چندبلوری را نشان می‌دهد. به لحاظ ظاهری، ساختار یک‌دست و برش هشت‌ضلعی سلول تک‌بلوری که از شمش بلور استوانه‌ای به همین قطر بریده می‌شوند، آن را از سلول‌های چندبلوری با ساختار نامنظم و برش چهارضلعی که از شمش‌های مکعب با مقاطع خیلی بزرگتر بریده می‌شوند، متمایز می‌کند. تولید سلول‌های سیلیکون بلوری فرآیندی پیچیده و طولانی دارد که با صرف هزینه زیاد همراه است. با این حال، بلوغ فناوری و برتری چشم‌گیر بازدهی این سلول‌ها، ادامه روند تولید و توسعه آنها را همچنان توجیه‌پذیر می‌کند.



شکل 4: دسته‌بندی فناوری‌های مختلف سلول خورشیدی

2-2-1- فناوری سلول خورشیدی سیلیکون بلوری

سلول‌های سیلیکون بلوری نخستین نسل از سلول‌های خورشیدی هستند. اولین سلول سیلیکون بلوری در سال 1954 در آزمایشگاه‌های بل آمریکا ساخته شد و تا دهه 1980 بیشترین کاربرد این سلول‌ها محدود به تأمین توان فضاپیماها و ماهواره‌ها می‌شد. با توسعه این سلول‌ها و کار روی بازدهی آنها از دهه 1980 تا به امروز، بازده 25% در شرایط آزمایشگاهی برای سلول‌های سیلیکون تک‌بلوری نیز حاصل شده است. یک سلول خورشیدی سیلیکون بلوری معمولاً از لایه‌های زیر تشکیل شده است (شکل شماره 5):

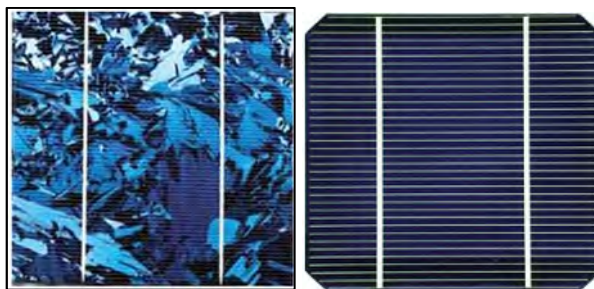
- یک لایه بلور سیلیکون (نیم‌رسانای pn) در میانه سلول که در یک طرف آن ناخالصی نوع منفی (n) و در طرف دیگر ناخالصی نوع مثبت (p) اکثریت دارند؛
 - دو لایه اتصال الکتریکی در دو طرف نیم‌رسانا؛
 - یک لایه روکش ضد بازتاب، روی اتصال جلویی؛
 - یک لایه پوشش شیشه‌ای که با یک لایه چسب شفاف از جنس پلی‌وینیل استات روی روکش ضدبازتاب نصب می‌شود؛
 - یک لایه محافظ زیرین.
- سلول‌های سیلیکون بلوری به دو صورت «تک‌بلوری»¹⁰ و «چندبلوری»¹¹ تولید می‌شوند. نوع تک‌بلوری این سلول‌ها به دلیل برخورداری از بالاترین بازده در میان انواع سلول‌ها، بیشترین استفاده را در بازار (به‌ویژه بازار سامانه‌های فتوولتائیک سقفی) دارد. بازده این سلول در شرایط مطلوب آزمایشگاهی 25

10 Single Crystalline Silicon Cell

11 Multi Crystalline Silicon Cell



شکل 7: آرایه خورشیدی لایه نازک و انعطاف پذیر سیلیکون آمورف در حال پهن شدن روی پشت بام



شکل 6: سلول خورشیدی سیلیکونی تک بلوری و چند بلوری

2-2-2- فناوری سلول خورشیدی لایه نازک

با پیشرفت فناوری سلول‌های خورشیدی، روش‌های ارزان‌تری نیز برای تولید سلول خورشیدی به صنعت معرفی شدند که از آن جمله، تولید سلول‌های موسوم به «لایه نازک»¹² بود. در این فناوری با استفاده از روش‌های تبخیر، لایه‌ای نازک در حدود چند میکرون از ماده نیم‌رسانا بر روی سطوحی مانند شیشه، پلیمر یا فلز تشکیل می‌شود. فناوری لایه نازک، علاوه بر راحت و ارزان‌تر کردن فرآیند تولید، به دلیل استفاده لایه نازکی از مواد نیم‌رسانا، هزینه‌های مواد اولیه را نیز کاهش می‌دهد. نیم‌رساناهای متعددی برای کاربرد در سلول‌های لایه نازک پیشنهاد شده‌اند؛ اما سه نوع از آنها بیشترین کاربرد را در صنعت پیدا کرده‌اند که عبارتند از: سیلیکون غیربلوری (آمورف)¹³، کادمیوم تلوراید¹⁴ و ترکیب مس، ایندیوم، گالیوم و سلینیوم (موسوم به CIGS)¹⁵.

سلول خورشیدی لایه نازک سیلیکون غیربلوری (آمورف)

اولین سلول‌های لایه نازک، سلول‌های سیلیکون غیربلوری موسوم به آمورف (بی شکل) بودند که هنوز هم در مقیاس تجاری تولید می‌شوند و بیشترین سهم را از بازار انواع سلول‌های لایه نازک دارند. برای تولید این سلول‌ها لایه نازکی از سیلیکون با ضخامت چند میکرون در طی عملیاتی موسوم به «رسوب شیمیایی در فاز بخار»¹⁶ از گاز سیلان و هیدروژن بر روی شیشه، پلاستیک یا فلز نشانداده می‌شود. مصرف سیلیکون در این روش حدود 1% سلول‌های بلوری است که هزینه تولید را به شدت کاهش می‌دهد [2] و [3]. البته، ساختار غیربلوری این نوع سلول باعث کاهش شدید بازده آن شده است؛ به طوری که بهترین بازده آزمایشگاهی و صنعتی به دست آمده از این روش به ترتیب حدود 13% و 8% است [4].

سلول خورشیدی لایه نازک کادمیوم تلوراید

علاوه بر سیلیکون که به دلیل فراوانی و در دسترس بودن و بلوغ فناوری، تا امروز مهم‌ترین ماده تولید سلول‌های خورشیدی بوده، تلاش‌های فراوانی برای ساخت سلول‌هایی از مواد غیرسیلیکونی صورت گرفته است. موادی چون کادمیوم تلوراید (CdTe) و مس ایندیوم گالیوم دی‌سلناید (CIGS) مهم‌ترین جایگزین‌های سیلیکون در سلول‌های لایه نازک محسوب می‌شوند. سلول‌های کادمیوم تلوراید تنها سلول‌های لایه نازک موجود هستند که توانسته‌اند از نظر هزینه تولید بر رقیب اصلی این صنعت، یعنی سیلیکون پیشی بگیرند.

ماده مرکب بلوری کادمیوم تلوراید، یک نیم‌رسانا با شکاف انرژی 1/44 الکترون‌ولت است که معمولاً با سولفید کادمیوم اتصال p-n یک سلول خورشیدی فتوولتائیک را تشکیل می‌دهد [5] و [6]. بهترین بازده به دست آمده از سلول‌های کادمیوم تلوراید در تولیدات صنعتی، حدود 17% و مدول‌های آن بین 12% تا 14% بوده است [7]. بهترین بازده آزمایشگاهی این سلول‌ها امروز به 19/5% رسیده است [4].

این نوع سلول خورشیدی در زمره ارزان‌ترین سلول‌های خورشیدی است. در سال 2012، 1/8 گیگاوات سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید تولید شد و انتظار می‌رود با رشد قابل توجهی در سال‌های آتی همراه باشد [8]. با وجود این، محدودیت دسترسی به تلوراید و آلاینده‌گی زیست‌محیطی کادمیوم دو عامل تأثیرگذار بر آینده این نوع سلول خواهد بود.

سلول خورشیدی لایه نازک CIGS

نوع دیگر مواد غیرسیلیکونی که در فناوری لایه نازک استفاده می‌شود، ماده‌ای مرکب از عناصر گروه‌های یک، سه و شش جدول تناوبی شامل مس، ایندیوم، گالیوم و سلینیوم، موسوم به «CIGS» است. این سلول‌ها به دلیل بالا بودن بازده و پایین بودن هزینه مواد مصرفی، از امید بخش‌ترین فناوری‌های لایه نازک هستند. این ماده محلول جامدی از مس ایندیوم سلناید (CIS) و مس

12 Thin Film Solar Cell

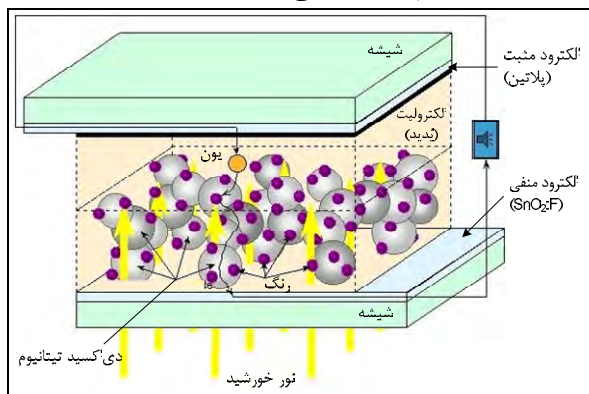
13 Amorphous-Silicon (a-Si)

14 Cadmium Telluride (CdTe)

15 Copper Indium Gallium Diselenide (CIGS)

16 Chemical Vapor Deposition (CVD)

خورشیدی نسل سوم محسوب می‌شوند.



شکل 8: ساختمان سلول خورشیدی حساس شده با رنگ [14]

سلول‌های خورشیدی آلی (ارگانیک)

در کنار سلول‌های حساس شده با رنگ، که ترکیبی از مواد آلی و غیرآلی هستند، نوع دیگری از سلول‌های خورشیدی در حال ظهور است که به‌طور کامل از مواد آلی یا ارگانیک¹⁹ ساخته می‌شوند. سلول‌های خورشیدی آلی به سه دسته «تک‌لایه»، «دولایه» و «توده ناهمگون»²⁰ تقسیم‌بندی می‌شوند. در سلول‌های تک‌لایه که ساده‌ترین نوع سلول‌های خورشیدی آلی هستند، از یک لایه پلیمر و در سلول‌های دولایه از دو ماده پلیمری با خواص مختلف بین دو رسانای فلزی (از جنس اکسید قلع ایندیوم و آلومینیوم) استفاده می‌شود [17، 18 و 19]. در نوع توده ناهمگون، مواد پلیمری الکترون‌دهنده و الکترون‌گیرنده با هم مخلوط شده‌اند [20 و 21]. بازده این سلول‌ها امروز به بیش از 11% رسیده است [4].

سلول‌های خورشیدی چندپیوندی

تفاوت انرژی فوتون‌های خورشید سبب شده است تا نوعی از سلول‌های خورشیدی، موسوم به چندپیوندی²¹ ساخته شود که از دو یا چند سلول با شکاف انرژی متفاوت تشکیل می‌شوند. لایه بالایی این سلول‌ها موادی با شکاف انرژی زیاد است که نور خورشید با انرژی بالا را به خود جذب می‌کند. فوتون‌های کم‌انرژی‌تر نیز با عبور از این لایه به لایه بعدی که شکاف انرژی کمتری دارد، می‌رسد و جذب می‌شود. این فرآیند ممکن است تا لایه سوم نیز ادامه یابد [22]. درحالی‌که بهترین بازده نظری سلول‌های خورشیدی بلور سیلیکون 28 درصد است، ترکیب این ماده با آلومینیوم گالیوم آرسنید که شکاف انرژی 7/1 الکترون‌ولت دارد، می‌تواند سلولی با بازده نظری 50 درصد

گالیوم سلناید (CGS) با فرمول عمومی $CuIn_xGa_{(1-x)}Se_2$ است که مقدار x می‌تواند از 1 (مس ایندیوم سلناید خالص) تا صفر (مس گالیوم سلناید خالص) تغییر کند. شکاف انرژی این ماده در بازه تغییرات x بین 1/0 تا 1/7 الکترون‌ولت تغییر می‌کند [9].

این سلول‌ها نیز مانند سایر انواع سلول‌های لایه نازک از رسوب روی شیشه یا پلاستیک ساخته می‌شوند [10]. بهترین بازده سلول‌های CIGS حدود 20% و بازدهی مدول‌های آن بین 13 تا 15 درصد است که بیشترین مقدار در میان انواع سلول‌های لایه نازک به حساب می‌آید [11، 12 و 13].

2-2-3- فناوری‌های نوظهور سلول خورشیدی

علاوه بر نسل‌های اول و دوم فناوری سلول خورشیدی، روش‌های نوظهور دیگری هم در ساخت سلول‌های خورشیدی معرفی شده‌اند. استفاده از مواد حساس شده با رنگ، مواد پایه پلیمری، سلول‌های چندپیوندی و در نهایت، سلول‌های متمرکزکننده مهم‌ترین آنها هستند که به اختصار معرفی می‌شوند.

سلول خورشیدی حساس شده با رنگ

یک سلول حساس شده با رنگ (DSSC)¹⁷ مطابق شکل 8 از سه لایه تشکیل شده است [14، 15 و 16]:

- 1- آند از جنس دی‌اکسید قلع تغلیظ شده با فلئور $(SnO_2:F)$ ؛
 - 2- لایه‌ای نازک از دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) با ساختاری بسیار متخلخل و غوطه‌ور در یک حلال و مخلوطی از رنگ حساس شده به فوتون از جنس روتنیوم- پلی‌پیریدین¹⁸؛
 - 3- کاتد از جنس پلاتین با پوشش نازکی از الکترولیت¹⁸؛
- در این سلول، نور خورشید با عبور از لایه شفاف $SnO_2:F$ و برخورد با رنگ، آن را برانگیخته می‌کند تا یک الکترون آن به‌طور مستقیم وارد لایه رسانای دی‌اکسید تیتانیوم شود. سپس، این الکترون در اثر نفوذ ناشی از گرادیان غلظت الکترون به سمت آند حرکت می‌کند. مولکول رنگ که یک الکترون از دست داده است، با جذب یک الکترون از الکترولیت¹⁸ دید آن را به تری‌یدید اکسید می‌کند. در ادامه، تری‌یدید الکترون از دست‌داده‌ی خود را از الکتروکود مخالف دریافت می‌کند تا مدار سلول کامل شود [14 و 15].

بازده سلول‌های حساس شده با رنگ بین 8% تا 15% است [4]. این سلول‌ها برای کاربردهای غیرنیروگاهی مانند سقف منازل که ارزانی و سبک بودن اهمیت زیادی دارد، امیدبخش‌ترین سلول‌های

19 Organic Photovoltaic Solar Cell (OPVC)

20 Bulk Heterojunction Organic Cell

21 Multi-Junction Solar Cell

17 Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC)

18 Ruthenium-Polypyridine

لزوم استقرار در مکان‌هایی با نور مستقیم و زیاد، موانع جدی‌ای را در مسیر توسعه این سلول‌ها ایجاد کرده است [27 و 28].

3- فناوری‌های متمرکزکننده گرمایش خورشیدی

بر خلاف تولید برق فتوولتائیک که براساس تولید الکتروسیته توسط انرژی فوتون‌های خورشیدی عمل می‌کند، فناوری متمرکزکننده گرمایش خورشیدی بر مبنای استفاده از حرارت خورشید و تبدیل آن به انرژی مکانیکی و سپس، انرژی الکتریکی کار می‌کند. از این منظر، تولید برق گرمایش خورشیدی تا حدی شبیه به شیوه‌های رایج تولید انرژی از احتراق سوخت‌های فسیلی است که برای تبدیل گرما به الکتروسیته به موتورهای گرمایی وابسته هستند.

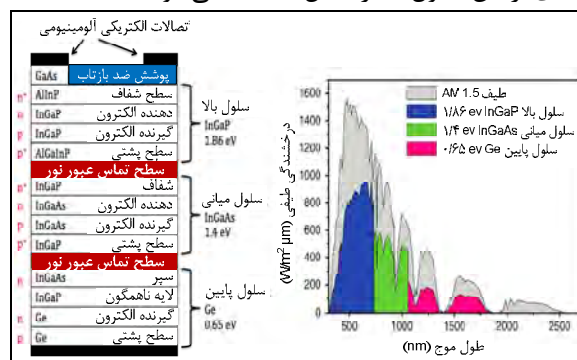
تقریباً نیمی (44 درصد) از طیف نور خورشید در محدوده مادون قرمز یا همان انرژی گرمایی است. این انرژی به راحتی به وسیله بسیاری از موادی که در مقابل نور خورشید داغ می‌شوند، قابل جذب است. بخشی از نور مرئی نیز می‌تواند جذب و به انرژی گرمایی تبدیل شود. با این حال، بیشتر نور مرئی خورشید بازتابیده می‌شود و همین بازتاب است که امکان تشخیص رنگ و شکل اشیاء را در طول روز برای ما فراهم می‌کند. بهترین جذب کننده‌های نور خورشید مواد سیاه‌رنگ و کدر هستند؛ این مواد بیش از اینکه بازتاب داشته باشند گرما و نور را جذب می‌کنند.

اشیاء در معرض نور خورشید ممکن است به قدری داغ شوند که امکان لمس آنها وجود نداشته باشد، ولی این افزایش دمای آنها برای تولید برق کافی نیست. اگرچه، از همین میزان انرژی گرمایی نیز می‌توان با استفاده از کلکتورهای حرارتی²³ در بام ساختمان به عنوان راه‌کاری مؤثر برای گرم کردن آب مصرفی بهره برد. نمونه‌ای از کلکتور آبگرمکن خورشیدی در شکل شماره 11 نشان داده شده است.



شکل 11: کلکتور آبگرمکن خورشیدی

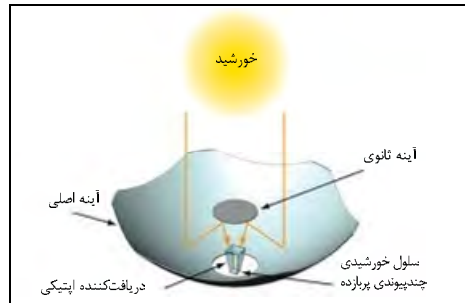
سازد. متأسفانه تا دستیابی به امکان اتصال مؤثر این مواد به یکدیگر، راه درازی در پیش است [23، 24 و 25]. ساختمان نمونه‌ای از این سلول‌ها در شکل 9 دیده می‌شود [25].



شکل 9: ساختمان یک نمونه سلول فتوولتائیک چندپیوندی [25]

سلول‌های متمرکزکننده

در اغلب فناوری‌های سلول فتوولتائیک نور خورشید به طور مستقیم به سلول خورشیدی می‌رسد و تبدیل به الکتروسیته می‌شود. با این حال، در نوع دیگری از فناوری‌های فتوولتائیک، موسوم به متمرکزکننده²²، نور خورشید از طریق لنز یا آینه‌های مقعر روی یک دریافت کننده اپتیکی متمرکز و سپس با شدت نور بیشتر، به سطح سلول خورشیدی بازتابیده می‌شود (شکل شماره 10).



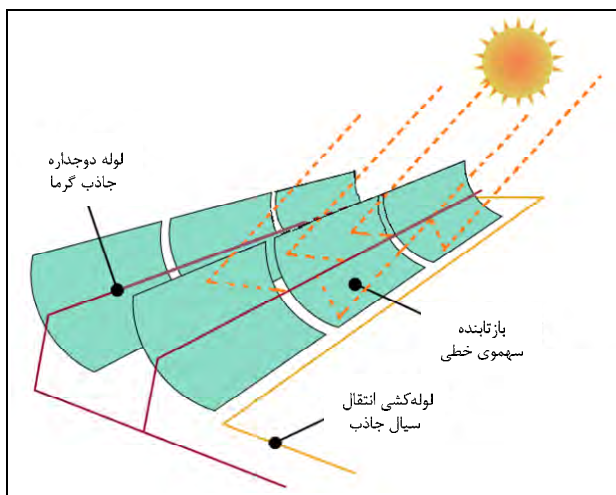
شکل 10: اجزای سلول فتوولتائیک متمرکزکننده

به دلیل سطح کوچک سلول مورد نیاز در این فناوری، هزینه تأمین سلول خورشیدی نسبت به فناوری‌های غیرمتمرکزکننده بسیار کمتر است. از این رو، استفاده از سلول‌های خورشیدی گران تر با بازدهی بسیار بالا (مثل سلول‌های چندپیوندی) در این فناوری توجیه پذیر است. بازده این فناوری با استفاده از سلول‌های چندپیوندی در شرایط مطلوب آزمایشگاهی به حدود 44% هم رسیده است [26]. با این حال، الزامات این فناوری، شامل طراحی پیچیده اپتیکی، نیاز مبرم به سامانه‌های ردیاب خورشیدی و خنک کاری، افت شدید تمرکز نور در روزهای ابری و غبارآلود و

است که توانایی جذب بیشترین انرژی و تحمل دمای بالا را داشته باشد. این لوله‌ها معمولاً از فلز با روکش سیاه‌رنگ و یک لایه محافظ شیشه‌ای ساخته می‌شود. بین این لایه محافظ و خود لوله فاصله‌ای وجود دارد که باعث کاهش هدررفت گرما می‌شود. یک لایه ضدبازتابش نیز ممکن است برای افزایش کارایی به سطح خارجی شیشه افزوده شود. شکل شماره 13 طرح‌های از سامانه کلکتور سهموی خطی را نشان می‌دهد. هر مجموعه از کلکتورهای سهموی خطی ممکن است 5 تا 6 متر عرض، یک تا دو متر ارتفاع و بیش از 150 متر طول داشته باشند. برای تأمین انرژی نیروگاه به تعداد زیادی از این مجموعه‌ها نیاز است. برای مثال، در یکی از نیروگاه‌های کالیفرنیا به ظرفیت تولید 30 مگاوات برق، 490 کلکتور استفاده شده است. این کلکتورها بخش عمده‌ای از فضای نیروگاه را اشغال می‌کنند و هزینه‌های تأمین و نگهداری و تعمیر آنها تأثیر زیادی بر جنبه‌های اقتصادی نیروگاه دارد [31].



شکل 12: یک نیروگاه سهموی خطی



شکل 13: طرحواره یک کلکتور سهموی خطی

بازتابنده‌های سهموی خطی معمولاً بر روی محور بلند خود و در راستای شمالی جنوبی تراز می‌شوند و بر روی یک سامانه ردیابی خورشیدی قرار می‌گیرند که حرکت شرقی غربی خورشید در آسمان را دنبال می‌کند. این سامانه متحرک از فولاد یا آلومینیوم

تولید برق نیروگاهی از خورشید به روش متمرکزکننده گرمایی، معمولاً به سه روش زیر انجام می‌شود [29]:

- 1- نیروگاه سهموی خطی²⁴؛
- 2- نیروگاه برج خورشیدی²⁵؛
- 3- نیروگاه بشقاب خورشیدی²⁶.

نام این نیروگاه‌ها از نوع کلکتور خورشیدی آنها گرفته شده است. در روش اول، از یک بازتابنده سهموی خطی استفاده می‌شود که گرما را در خط کانونی خود متمرکز و به سامانه جذب گرما منتقل می‌کند. تعداد زیادی از این طرف‌ها می‌توانند انرژی لازم برای یک نیروگاه خورشیدی را فراهم کنند. روش دوم شامل آینه‌های تخت بسیار بزرگی است که دور تا دور یک برج خورشیدی چیده شده‌اند. جهت‌دهی آینه‌ها به گونه‌ای است که نور خورشید را به سمت نقطه مشخصی در بالای برج متمرکز و به جذب‌کننده گرما منتقل می‌کند. در روش سوم، از بشقاب‌های بزرگ سهمی‌شکل شبیه به آینه مقعر استفاده می‌شود که نور خورشید را در نقطه کانونی خود به جذب‌کننده انتقال می‌دهد. این بشقاب‌های سهموی چنانچه از حد مشخصی بزرگ‌تر شوند، ضمن افزایش هزینه‌های ساخت، بسیار سنگین خواهند شد. به همین دلیل، برای احداث نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی در مقیاس بزرگ معمولاً یکی از دو روش اول ترجیح داده می‌شود. هر سه روش مذکور، انرژی گرمایی حاصل را به کمک یک سیال جاذب گرما و یک موتور گرمایی به برق تبدیل می‌کنند. سامانه‌های ساده بشقاب خورشیدی از یک موتور گرمایی داخلی و سامانه‌های سهموی خطی یا برج خورشیدی از یک مبدل و توربین بخار مرکزی بهره می‌برند. در ادامه، ویژگی‌های اختصاصی این روش‌ها به‌طور جداگانه معرفی می‌شود [30].

3-1- نیروگاه سهموی خطی

همانگونه که در شکل شماره 12 نشان داده شده، یک نیروگاه سهموی خطی از تعداد زیادی بازتابنده طویل مقعر با سطح مقطع سهمی تشکیل شده است. این بازتابنده‌ها نور خورشید را در خط کانونی خود بازتابانده و متمرکز می‌کنند. برای استفاده از گرمای تولیدشده، لوله‌ای حاوی یک سیال جاذب گرما در طول خط کانونی سهمی قرار می‌گیرد. این لوله دوجداره که «لوله جاذب»²⁷ نیز نامیده می‌شود، به نحوی طراحی شده

24 Parabolic Trough Power Plant

25 Solar Tower Power Plants

26 Solar Dish Power Plants

27 Absorber Tube

می تواند آب، نمک مذاب یا هوا باشد. برج های خورشیدی به طور معمول با قابلیت ذخیره انرژی طراحی می شوند و بنابراین می توانند به صورت شبانه روزی (24 ساعته) کار کنند.

اولین برج های خورشیدی، «سولار 1» و «سولار 2» نام دارند که در کالیفرنیا آمریکا احداث شدند. با این حال، این دو پروژه در حد برنامه های تجربی باقی ماندند و هرگز به مرحله تجاری نرسیدند. سامانه انتقال حرارت سولار 1 (بین سال های 1982 تا 1988) بر پایه آب بود. این سامانه در سال 1996 به نمک مذاب تغییر یافت و فعالیت خود را با نام واحد سولار 2 بین سال های 1996 تا 1999 ادامه داد. ظرفیت اسمی هر دو واحد 10 مگاوات بود. تصویر برج و هلیواستات های این نیروگاه ها در شکل شماره 15 مشاهده می شود.

سامانه نمک مذاب نیروگاه سولار 2 ترکیبی از نیترات های سدیم و پتاسیم با قابلیت ذوب در دمای حدود 220 درجه سانتیگراد بود. در این روش نمک مذاب پس از خروج از مخزن سرد، با عبور از میان دریافت کننده، گرمای حاصل از آینه های مزرعه خورشیدی را جذب می کند و با دمای بیش از 550 درجه سانتیگراد به مخزن نمک داغ وارد می شود. در ادامه، نمک مذاب پس از خروج از مخزن ذخیره و عبور از مبدل حرارتی³⁰، با انتقال گرمای خود به آب و تبخیر آن، موجب حرکت توربین بخار و تولید برق می شود. سپس، نمک مذاب سرد شده با دمای حدود 290 درجه سانتیگراد، دوباره به مخزن ذخیره سرد باز می گردد تا بار دیگر برای عبور از دریافت کننده انرژی خورشیدی آماده می شود. ترتیب این فرآیند را می توان در شکل شماره 16 مشاهده کرد.



شکل 14: نیروگاه برج خورشیدی سولار 2 در کالیفرنیا آمریکا

ساخته می شود. اولین بازتابنده های سهموی خطی، از شیشه های 4 میلی متری با وزن و قیمت بسیار زیاد ساخته می شدند. در سال های اخیر پیشرفت های جدیدی با هدف کاهش هزینه و وزن صورت گرفته است و از روش ها و مواد جدید مانند آلومینیوم جلا یافته به جای آینه های شیشه ای استفاده می شود [32].

بازده تبدیل انرژی، یکی از عوامل کلیدی موفقیت تجاری یک نیروگاه گرمایش خورشیدی است. آینه های بازتابنده باید به خوبی شکل داده و در محل دقیقی نصب شوند تا بیشترین بازده دریافت نور خورشید را داشته باشند. همچنین، سامانه ردیابی خورشید باید وضعیت هر ظرف را در طول روز در بهترین محل تنظیم کند. در نهایت، لوله های جاذب گرما نیز باید در بالاترین بازده ممکن کار کنند. بازده چنین نیروگاهی در تبدیل انرژی خورشید به الکتریسیته حدود 14 درصد است [33].

سیال دریافت کننده گرما که در لوله ها پمپ می شود معمولاً از جنس یک روغن ترکیبی مانند روغن موتور است که امکان کار در دماهای بسیار بالا را دارد. در حین کار ممکن است دمای این مایع به 300 تا 400 درجه سانتیگراد برسد. بعد از عبور از لوله های جاذب، روغن وارد یک سیستم درسته می شود و گرمای آن برای تولید بخار جهت چرخاندن توربین ژنراتور و تولید برق استفاده می شود. در ادامه، سیال بار دیگر برای جذب گرمای بیشتر به کلکتورها باز می گردد و این چرخه به طور پیوسته تکرار می شود.

2-3- نیروگاه برج خورشیدی

نیروگاه های برج خورشیدی، که نمونه آن در شکل شماره 14 دیده می شود، امروز اغلب با نام «نیروگاه های خورشیدی با دریافت کننده مرکزی»²⁸ شناخته می شوند. این نیروگاه ها یکی دیگر از روش های بهره گیری از انرژی گرمایی خورشید هستند که در آنها برج خورشیدی در مرکز مزرعه دریافت کننده نور، متشکل از آرایه های هلیواستات²⁹ (آینه ها)، قرار می گیرد. در بالای برج، دریافت کننده ای برای جذب حرارت خورشید طراحی شده است. برای دستیابی به بازدهی بالاتر، هر آینه یک سامانه ردیابی خورشیدی دارد که جهت آن را مطابق با حرکت خورشید به نحوی تنظیم می کند که بیشترین بازتاب را به سمت دریافت کننده بالای برج داشته باشد.

دریافت کننده نیز به نحوی طراحی می شود که قابلیت جذب انرژی حاصل را با بالاترین بازده داشته باشد و آن را به سیال جاذب حرارت منتقل کند. بنابر طراحی سامانه، این سیال

28 Solar Central Receiver Power Plants

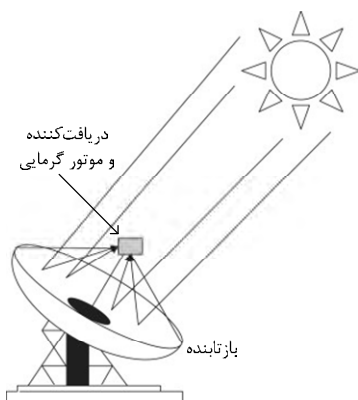
29 Heliostat

30 Heat Exchanger

بر چرخه ترمودینامیکی برایتون³² صورت گرفته است. سازه بشقاب خورشیدی، سازه‌ای مشبک است که روی آن تعداد زیادی آینه انحنادار نصب می‌شود. این آینه‌ها ممکن است از شیشه یا فلز براق ساخته شده و به شکل دایره یا مستطیل باشند. در مرکز این بشقاب پایه‌ای وجود دارد که موتور گرمایی روی آن قرار می‌گیرد. طرحواره بشقاب خورشیدی در شکل شماره 18 دیده می‌شود.



شکل 17: بشقاب‌های خورشیدی در یک نیروگاه



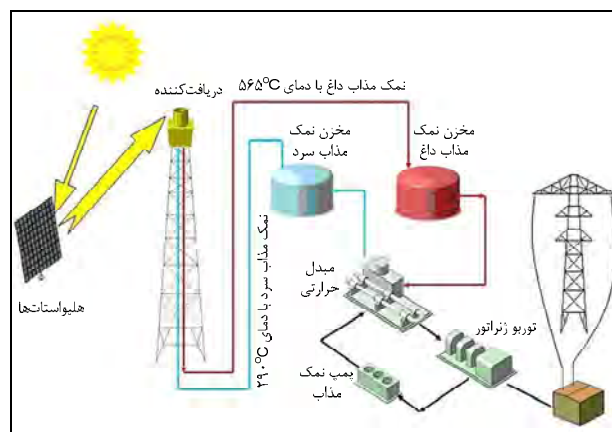
شکل 18: طرحواره یک بشقاب خورشیدی

بشقاب‌های معمولی قطری بین 5 تا 10 متر و سطح بازتابنده‌ای برابر با 20 تا 80 مترمربع دارند و می‌توانند 4 تا 25 کیلووات انرژی تولید کنند. اگرچه بشقاب‌هایی به بزرگی 200 تا 400 مترمربع و توان تولیدی بیش از 50 کیلووات نیز ساخته شده‌اند، عواملی از جمله مواد اولیه و موتور مناسب، توسعه صنعتی آنها را با محدودیت روبرو می‌کند.

توان تولیدی موتورهای استرلینگ موجود از 25 کیلووات فراتر نمی‌رود. این موتورها با بشقاب‌های کوچک‌تر عملکرد بهتری دارند. موتورهای توربین گازی کوچک، موسوم به میکروتوربین‌ها، می‌توانند خروجی بیشتری فراهم کنند؛ ولی



شکل 15: برج و هلیواستات‌های مورد استفاده در نیروگاه‌های سولار 1 و 2



شکل 16: طرحواره نیروگاه برج خورشیدی و اجزای آن

3-3- بشقاب‌های خورشیدی

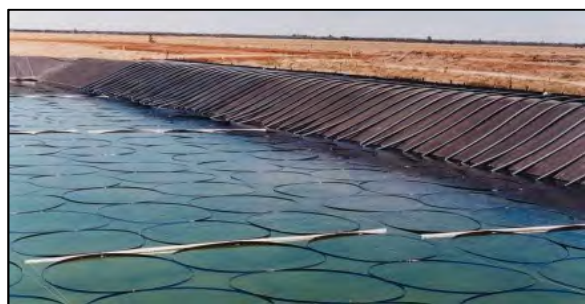
آخرین نوع نیروگاه‌های متمرکزکننده گرمایش خورشیدی، بشقاب‌های خورشیدی است. این نوع نیروگاه با استفاده از یک بشقاب سهموی چرخان، تابش خورشید را دریافت و آن را به نقطه کانونی خود هدایت می‌کند. یک موتور گرمایی که در کانون بشقاب قرار گرفته است با تبدیل گرمای حاصل به حرکت مکانیکی، ژنراتور را به کار می‌اندازد. نمونه‌ای از این بشقاب‌های خورشیدی در شکل شماره 17 دیده می‌شود. در بشقاب‌های خورشیدی رایج، موتور گرمایی خاصی به نام موتور استرلینگ³¹ به کار گرفته می‌شود که دارای بازدهی بسیار بالا است. اخیراً تلاش‌هایی در زمینه به‌کارگیری توربین‌های گازی کوچک مبتنی

32 Brayton Thermodynamic Cycle

31 Stirling

2- لایه غیرهمرفتی میانی، با گرادیان نمکی زیاد، به عمق 1-1/5 m؛
 3- لایه همرفتی زیرین، با غلظت نمکی زیاد، به عمق 3-1 m.
 با تابش نور خورشید، آب شور داخل حوضچه شروع به گرم شدن می‌کند. لایه میانی که غلظت نمکی آن با افزایش عمق زیادتر می‌شود، وظیفه جلوگیری از جابه‌جایی آب گرم از لایه‌های پایینی به لایه‌های بالایی را دارد. زیرا افزایش غلظت در عمق، سبب می‌شود لایه‌های زیرین به دلیل سنگینی امکان حرکت به سمت بالا و تبادل حرارت را نداشته باشند. در صورتی که در حوضچه‌های آب شیرین، آب گرم لایه‌های پایینی در اثر جریان همرفتی ناشی از کاهش چگالی و سبک شدن به سمت بالا حرکت می‌کند و لایه‌های زیرین خنک باقی می‌ماند. در نتیجه این فرآیند، لایه همرفتی پایدار از آب شور داغ در ته حوضچه و همچنین لایه همرفتی خنک‌تری با غلظت نمک کمتر در بالای آن ایجاد می‌شود. در حالت معمول، دمای لایه زیرین به حدود 70-90°C می‌رسد. برای جلوگیری از تبخیر و ایجاد موج بر روی حوضچه، معمولاً از یک پوشش شفاف روی حوضچه استفاده می‌شود.

برای تولید الکتریسته از حوضچه خورشیدی، آب شور داغ از لایه زیرین گرفته و در یک مبدل حرارتی برای گرم کردن و تبخیر سیال استفاده می‌شود. بخار سیال، توربین را به حرکت درآورده و در قسمت خروجی توربین چگالیده می‌شود. این فرآیند چگالش ممکن است به وسیله منبعی از آب سرد انجام شود؛ اما اگر حوضچه خورشیدی در منطقه‌ای خشک و بدون منبع آب واقع شده باشد، این فرآیند می‌تواند با استفاده از لایه آب سرد بالای حوضچه خورشیدی انجام شود. با چنین آرایشی حوضچه خورشیدی به یک نیروگاه کاملاً مستقل تبدیل می‌شود. شکل شماره 21 طرحواره عملکرد حوضچه خورشیدی برای تولید الکتریسته را نشان می‌دهد.



شکل 19: حوضچه خورشیدی «پیرامید هیل» در استرالیا

بازده آنها از موتورهای استرلینگ به مراتب کمتر است [33].
 بشقاب‌های دارای موتورهای استرلینگ در اندازه‌هایی بین 5 تا 25 کیلووات ساخته می‌شوند. بازده نظری این موتورها در حدود 40 درصد و بازده عملی آنها نزدیک به 30 درصد است. میکروتوربین‌هایی با ظرفیت بیش از 100 کیلووات نیز وجود دارد؛ اما بیشترین ظرفیت آزمایش شده آن در یک سامانه بشقابی 30 کیلووات بوده است. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، این موتورها بازده نسبتاً پایینی در حدود 25 تا 35 درصد دارند. همانند روش‌های سهموی خطی و برج‌های خورشیدی، بشقاب‌های خورشیدی نیز می‌توانند از سامانه ردیابی خورشید برای رسیدن به بیشترین بازده استفاده کنند.

کشورهای اروپایی به همراه استرالیا و آمریکا بیشترین تحقیقات را در زمینه سامانه‌های خورشیدی انجام داده‌اند. اولین سامانه بشقاب خورشیدی در دهه 1980 در کشور آمریکا آزمایش شد. هزینه بشقاب و دسترسی به موتورهای استرلینگ از جمله عوامل موثر بر تجاری‌سازی این سامانه است. تولید محدود موتورهای استرلینگ یکی از دلایل اصلی توجه بیشتر به میکروتوربین‌ها است. با این حال، به نظر می‌رسد با افزایش فعالیت‌های توسعه‌ای جدید، تولید موتورهای استرلینگ در آینده نزدیک افزایش یابد.

4- سایر فناوری‌های تولید برق از انرژی خورشید

فناوری‌های متمرکزکننده گرمایش خورشیدی و فتوولتائیک اصلی‌ترین گزینه‌های تولید برق خورشیدی هستند؛ اما روش‌های دیگری هم برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی وجود دارد که هنوز در مسیر ارزیابی و آزمایش یا توسعه قرار دارند. مهم‌ترین این روش‌ها حوضچه‌های خورشیدی³³ و تنوره خورشیدی³⁴ هستند که در ادامه به‌طور خلاصه توضیح داده می‌شوند.

4-1- حوضچه‌های خورشیدی

با وجود گذشت چند سال از معرفی مفهوم حوضچه خورشیدی و مطالعاتی که در نقاط مختلف دنیا قابلیت آن را برای تولید برق در طول سال به اثبات رسانده است، این فناوری هنوز توسعه چندانی نداشته است. حوضچه خورشیدی که نمونه‌ای از آن در شکل شماره 19 دیده می‌شود، معمولاً از سه لایه آب شور با غلظت‌های مختلف تشکیل شده است:

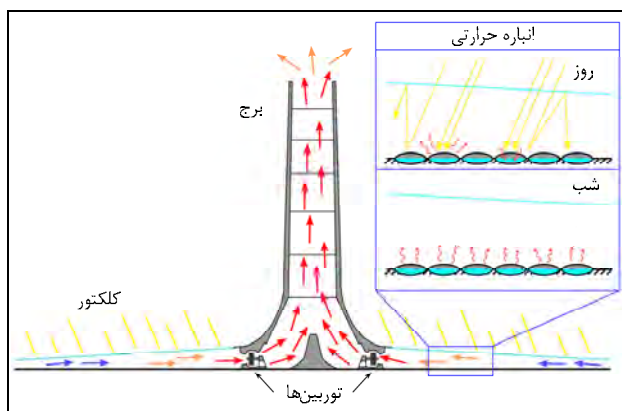
1- لایه همرفتی بالایی، با غلظت نمکی کم، به عمق 0/4-0/2

33 Splar Pond
 34 Solar Updraft Tower

جریان بزرگی از هوای همرفتی را به سمت تنوره و خروج از آن ایجاد می‌کند. در همین زمان هوای تازه و خنک از اطراف گلخانه به داخل کشیده می‌شود. توربین‌ها که در دهانه پایینی تنوره قرار دارند، به وسیله جریان هوای بالارونده چرخانده می‌شوند و الکتریسیته تولید می‌کنند. نحوه عملکرد تنوره خورشیدی در شکل شماره 23 نشان داده شده است.



شکل 22: نمونه آزمایشی تنوره خورشیدی در اسپانیا

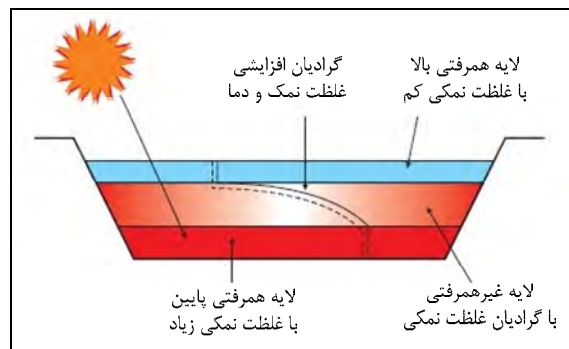


شکل 23: طرحواره عملکرد تنوره خورشیدی

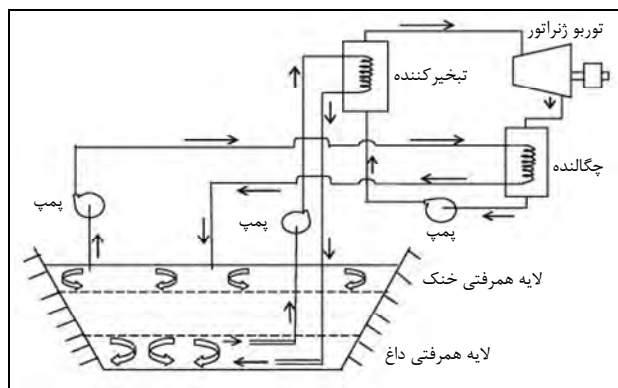
5- معرفی نمونه‌هایی از نیروگاه‌های در دست اجرا

5-1- نمونه‌هایی از نیروگاه‌های فتوولتائیک

سهولت نصب و راه‌اندازی و مزیت رقابتی فناوری فتوولتائیک نسبت به سایر فناوری‌های تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته، سبب رشد و گسترش قابل توجه کاربرد آن در نقاط مختلف دنیا شده است. در حالی که تا پایان سال 2007 مجموع ظرفیت فتوولتائیک نصب‌شده در جهان کمتر از 10 گیگاوات بود، از سال 2008 تا 2013 این رقم جهش خیره‌کننده‌ای داشته و به حدود 136 گیگاوات رسیده است. شکل شماره 24 روند افزایش ظرفیت نصب‌شده در هر سال و مجموع ظرفیت نصب‌شده تا



شکل 20: طرحواره لایه‌های تشکیل‌دهنده حوضچه خورشیدی



شکل 21: چرخه تولید الکتریسیته از حوضچه خورشیدی

عملکرد یک حوضچه خورشیدی را می‌توان تا اندازه‌ای شبیه به یک مزرعه زمین‌گرمایی با دمای پایین دانست. ژنراتورهای حوضچه‌های خورشیدی نیز همانند واحدهای زمین‌گرمایی، اغلب از نوع توربین‌های چرخه رانکین ارگانیک³⁵ هستند. مهم‌ترین مزیت فناوری حوضچه‌های خورشیدی، ترکیب دریافت و ذخیره انرژی است. به همین دلیل، این سامانه قابلیت تولید شبانه‌روزی برق در طول سال را دارد.

2-4- تنوره خورشیدی

تنوره خورشیدی (که گاهی به اشتباه برج خورشیدی نامیده می‌شود) جزء فناوری‌های نوظهور در زمینه بهره‌گیری از انرژی خورشیدی است. شکل شماره 22 نمونه‌ای از یک تنور خورشیدی آزمایشی در شهر مادرید اسپانیا را نشان می‌دهد. در این سامانه از انرژی خورشید برای گرم کردن هوا، ایجاد جریان همرفتی رو به بالا و حرکت توربین بادی متصل به ژنراتور استفاده می‌شود. به این منظور مساحت بزرگی همانند یک گلخانه دور باز با شیشه پوشانده می‌شود که در مرکز آن تنوره قرار می‌گیرد.

در ساعات روز، نور خورشید هوای درون ناحیه پوشیده با شیشه را گرم می‌کند. این هوای گرم‌شده به دلیل وزن کمتر،

35 Organic Rankine Cycle

کادمیوم تلوراید) در زمینی به وسعت 796 هکتار نصب می‌شود. کشورهای هند، چین و آلمان نیز چهار مورد از بزرگترین نیروگاه‌های فتوولتائیک را با فناوری سیلیکونی احداث کرده‌اند که در این میان، فقط در نیروگاه 221 مگاواتی هند از فناوری لایه نازک آمورف استفاده شده است. این نیروگاه که هم‌اکنون، سومین نیروگاه بزرگ فتوولتائیک دنیا محسوب می‌شود، مجموعه‌ای از 19 پروژه 1 تا 25 مگاواتی است که در زمینی به مساحت دو هزار هکتار احداث شده است. نیروگاه 200 مگاواتی گولمود چین نیز که چهارمین نیروگاه بزرگ دنیاست از فناوری سیلیکون تک‌بلوری با ردیاب تک‌محوره استفاده می‌کند. پنجمین نیروگاه بزرگ دنیا نیز مویرو نام دارد و به ظرفیت 166 مگاوات در کشور آلمان و در زمینی به مساحت 350 هکتار بر روی یک معدن قدیمی ذغال سنگ احداث شده است. نیروگاه مویرو که برق 67,500 خانوار را تأمین می‌کند، در سال 2012 جایزه برترین پروژه خورشیدی سال جهان را از آن خود کرد [37].

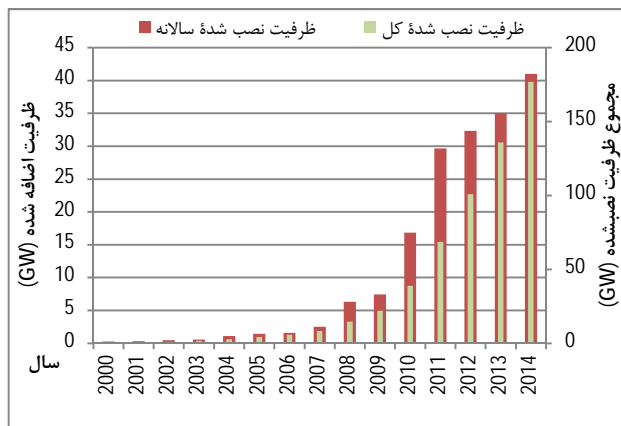
علاوه بر نیروگاه‌های نصب‌شده، نیروگاه‌های بزرگ بسیاری نیز هم‌اکنون در دست احداث است که از آن جمله می‌توان به نیروگاه 550 مگاواتی توپاز در ایالت کالیفرنیا آمریکا اشاره کرد. در این نیروگاه نیز از فناوری لایه نازک کادمیوم تلوراید استفاده خواهد شد. کار احداث این نیروگاه از سال 2011 آغاز شده و انتظار می‌رود تا پایان سال 2014 به اتمام برسد [38]. از دیگر پروژه‌های برنامه‌ریزی شده برای احداث در چند سال آینده، می‌توان به پروژه‌های زیر اشاره کرد [39]:

- نیروگاه 2,700 مگاوات وستلند در آمریکا (تا 2015)؛
- نیروگاه 2,000 مگاوات اوردوس در چین (تا 2020)؛
- نیروگاه 1,000 مگاوات محمدبن‌رشید در امارات (تا 2030)؛
- نیروگاه 1,000 مگاوات نپر در صربستان (تا سال 2016)؛
- نیروگاه 750 مگاوات مک‌کوی در انگلیس (تا سال 2016)؛
- و چندین نیروگاه 200 تا 600 مگاوات در کشورهای چین، ژاپن، آمریکا، پاکستان، شیلی، اسپانیا و یونان.

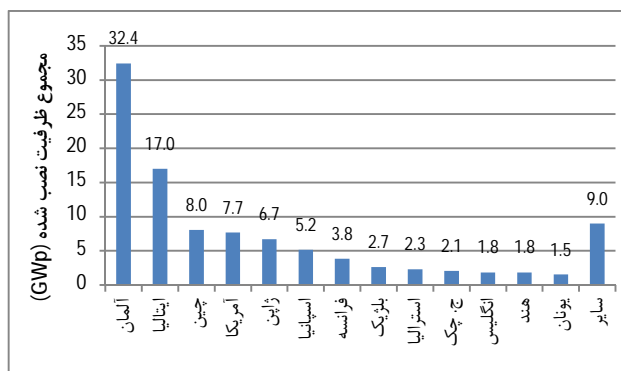


شکل 26: نیروگاه 390 مگاواتی آگوا در ایالت آریزونا آمریکا

پایان سال 2013 و پیش‌بینی آن در 2014 را نشان می‌دهد [34] و 35]. بر این اساس، پیش‌بینی می‌شود در سال 2014، 41 گیگاوات سامانه فتوولتائیک جدید در کشورهای مختلف نصب شود [35]. شکل شماره 25 نیز وضعیت کشورهای پیشرو در زمینه بیشترین ظرفیت نصب‌شده تا پایان سال 2012 را نشان می‌دهد [36]. تا پایان سال 2013 تعداد نیروگاه‌های نصب‌شده با ظرفیت بیش از 50 مگاوات از مرز 60 نیروگاه گذشته است که 17 مورد آنها ظرفیت‌های 100 مگاوات به بالا دارند.



شکل 24: روند افزایش ظرفیت سالانه نیروگاه‌های فتوولتائیک از 2000 تا 2013 و پیش‌بینی رشد در سال 2014 [34 و 35]



شکل 25: مجموع ظرفیت نصب‌شده فتوولتائیک در کشورهای جهان تا پایان سال 2012 [36]

جدول شماره 1 (بخش ضمیمه) اطلاعات مربوط به 11 نیروگاه بزرگ فتوولتائیک دنیا را نشان می‌دهد. از میان این نیروگاه‌ها، هفت نیروگاه در آمریکا احداث شده که شش مورد آن بر پایه فناوری سلول لایه نازک کادمیوم تلوراید است.

بزرگترین نیروگاه فتوولتائیک نصب‌شده، نیروگاهی با نام آگوا کالینت در ایالت آریزونا آمریکا است که ظرفیت نهایی آن 390 مگاوات است و تا پایان سال 2013، 251 مگاوات آن نصب شده است. در این نیروگاه 5,200 مدول خورشیدی کادمیوم تلوراید، ساخت شرکت فرست سولار (بزرگترین تولیدکننده سلول‌های

سه‌موی خطی در مساحتی بالغ بر 647 هکتار نصب شده است که سالانه 662 گیگاوات ساعت برق تولید می‌کند.

شانزده سال پس از تکمیل اولین پروژه نیروگاه سه‌موی خطی، در ماه ژوئن سال 2007 نیروگاه دیگری با ظرفیت 64 مگاوات در ایالت نوادا به بهره‌برداری رسید که از آن به‌عنوان رنسانسی در تولید برق به شیوه گرمایش خورشیدی یاد می‌شود. این نیروگاه تحت قانون ایالتی نوادا در منطقه‌ای به مساحت 160 هکتار در 65 کیلومتری جنوب غربی لاس‌وگاس واقع شده است. مطابق این قانون 20 درصد از الکتریسیته مصرفی ایالت نوادا تا سال 2013، باید از طریق منابع تجدیدپذیر و 5 درصد آن از طریق انرژی خورشیدی تأمین شود [40]. در سال 2013 نیز نیروگاه دیگری با ظرفیت 280 مگاوات در ایالت آریزونا به بهره‌برداری رسید.

با وجود پیشتازی آمریکا در ساخت نخستین نیروگاه سه‌موی خطی، اسپانیا گوی سبقت را از این کشور ربوده و از سال 2008 تاکنون نزدیک به 25 طرح بالای 50 مگاوات را به بهره‌برداری رسانده است. بزرگترین این طرح‌ها، نیروگاهی با نام سولاین به ظرفیت 200 مگاوات است که در چهار فاز در سال‌های 2012 و 2013 به بهره‌برداری رسید. این نیروگاه می‌تواند برق مورد نیاز 104 هزار خانه را تأمین کند.

ایران نیز اولین کشور آسیایی بود که در سال 2008 یک طرح آزمایشی به ظرفیت 250 کیلووات را در شهر شیراز و به دنبال آن، طرح 17 مگاواتی را در نیروگاه سیکل ترکیبی شهر یزد به بهره‌برداری رساند. اما طرح‌های دیگر این قاره به سه کشور تایلند، امارات متحده عربی و هند اختصاص دارد. تایلند در سال 2011 نیروگاهی به ظرفیت 5 مگاوات راه‌اندازی کرد و در سال 2013 دو کشور امارت و هند نیروگاه‌هایی به ظرفیت 100 مگاوات و 50 مگاوات را به بهره‌برداری رساندند. در اروپا غیر از اسپانیا، طرحی 5 مگاواتی نیز در ایتالیا اجرا شده است.

علاوه بر نیروگاه‌های احداث‌شده، بیش از 20 طرح دیگر با ظرفیت‌های بیش از 50 مگاوات در نقاط مختلف، از جمله آمریکا، اسپانیا، مراکش، آفریقای جنوبی و هند در حال پیگیری است.

مشخصات 10 نیروگاه بزرگ خورشیدی با فناوری سه‌موی خطی در جدول شماره 2 (بخش ضمیمه) آورده شده است.



شکل 27: نیروگاه 250 مگاواتی کالیفرنیا در آمریکا



شکل 28: نیروگاه 221 مگاواتی چارانکا در هند



شکل 29: نیروگاه 200 مگاواتی گولمود در چین



شکل 30: نیروگاه 166 مگاواتی موبرو در آلمان

2-5- نمونه‌هایی از نیروگاه‌های سه‌موی خطی

اولین نیروگاه سه‌موی خطی در سال 1984 با ظرفیتی معادل 14 مگاوات در صحرای موجاو ایالت کالیفرنیا به بهره‌برداری رسید این نیروگاه بخشی از یک طرح 9 واحدی به ظرفیت مجموع 354 مگاوات بود که در سال 1990 فاز نهایی آن تکمیل شد. در این طرح 9 واحدی بیش از 936 هزار دریاقت‌کننده

3-5- نمونه‌هایی از نیروگاه‌های برج خورشیدی

شرکت آمریکایی برایت‌سورس در آمریکا پروژه ساخت نیروگاه برج خورشیدی 400 مگاواتی در صحرای موجاو ایالت کالیفرنیا را در دستور کار قرار داده است. این نیروگاه از سه واحد 133 مگاواتی تشکیل شده و در آن از 173,500 هلیواستات در زمین به مساحت 1,420 هکتار استفاده شده است. برج‌های این نیروگاه از نوع LPT550 است و 140 متر ارتفاع دارد. هزینه احداث این نیروگاه 2/2 میلیارد دلار اعلام شده است.

اسپانیا یکی از فعال‌ترین کشورها در زمینه نیروگاه‌های خورشیدی با دریافت‌کننده مرکزی است. در این زمینه سه پروژه در این کشور تحت حمایت اتحادیه اروپا قرار گرفته‌اند. اولین پروژه به نام PS10 یک واحد تولید انرژی از نوع برج خورشیدی با ظرفیت 11 مگاوات است که از چرخه مستقیم آب/بخار و سامانه ذخیره آبی استفاده می‌کند. دومین پروژه، نیروگاه PS20 با ظرفیت 20 مگاوات بود که در سال 2009 تکمیل و وارد شبکه شد. سومین پروژه نیز گماسولار نام دارد که در سال 2011 با ظرفیت 17 مگاوات به بهره‌برداری رسید.

علاوه بر نیروگاه‌های مذکور، چند طرح 120، 110 و 50 مگاواتی نیز در سرزمین‌های اشغالی فلسطین، آمریکا و آفریقای جنوبی دنبال می‌شود. طرح‌های دیگری نیز در کشورهای آلمان و ترکیه با ظرفیت‌های 1/5 و 5 مگاوات اجرا و در سال‌های 2008 و 2013 به بهره‌برداری رسیده است. جدول شماره 3 (بخش ضمیمه) مشخصات این نیروگاه‌ها را نشان می‌دهد.

4-5- نمونه‌هایی از سایر نیروگاه‌های خورشیدی

علی‌رغم ظرفیت مناسب فناوری بشقاب خورشیدی برای تولید برق در مقیاس نیروگاهی و واحدهای کوچک‌تر، نبود سرمایه‌گذاری کافی و پایین بودن نرخ رشد فناوری، سبب شده است از این فناوری در نیروگاه‌های برق خورشیدی استفاده نشود. تنها طرح نیروگاهی اجرا شده در این زمینه، نیروگاه ماریکوپا در ایالت آریزونا آمریکا است که با ظرفیت 1/5 مگاوات در سال 2010 عملیات احداث آن آغاز شد؛ اما در پایان سال 2011 به دلیل بحران اقتصادی، پروژه ناتمام ماند.

در کالیفرنیا نیز به واسطه مشوق‌های موجود، شرکتی به نام استرلینگ انجین سیستمز قراردادهای مربوط به احداث دو واحد بزرگ تولید انرژی بر پایه فناوری بشقاب خورشیدی را به ظرفیت‌های 850 و 700 مگاوات در سن برناردینو و دره ایمپریال کالیفرنیا به تصویب رساند. ولی در پی بحران اقتصادی آمریکا و مزیت رقابتی فوق‌العاده فناوری فتوولتائیک، این دو پروژه را در سال 2011 ورشکسته اعلام و دو طرح فتوولتائیک را جاگزین



شکل 31: نیروگاه خورشیدی سهموی خطی سولانا در آریزونا، آمریکا، به ظرفیت 280 مگاوات [41]



شکل 32: نیروگاه خورشیدی سهموی خطی سولابن در اسپانیا به ظرفیت 200 مگاوات [42]



شکل 33: نیروگاه خورشیدی حرارتی یزد با فناوری سهموی خطی به ظرفیت 17 مگاوات [43]



شکل 34: نیروگاه خورشیدی سهموی خطی شمس 1 در امارات متحده عربی، به ظرفیت 100 مگاوات [44]

یعنی ضریب ظرفیت، هزینه و مساحت زمین براساس اطلاعات در دسترس از 29 نیروگاه بزرگ خورشیدی (جدول 1 تا 3 بخش ضمیمه) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

ضریب ظرفیت³⁶ یک نیروگاه، نسبت توان خروجی عملی آن در یک دوره‌ی زمانی معین (اغلب یک‌ساله)، به توان خروجی بالقوه‌ی آن است که اگر امکان کار با تمام ظرفیت خود را داشت، حاصل می‌شد³⁷ [52 و 53]. این ضریب با رابطه زیر محاسبه می‌شود [52]:

$$CF(\%) = \frac{E_p (Whr)}{C_p (W) \times \underbrace{8760(hr)}_{365 \times 24}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، E_p توان تولیدی نیروگاه در عمل در یک سال بر حسب وات ساعت (W.h)، C_p ظرفیت اسمی نیروگاه بر حسب وات و 8,760 تعداد ساعات یک سال است.

ضریب ظرفیت یک نیروگاه خورشیدی به پتانسیل تابش محلی در طول سال، زاویه نصب مدول‌ها، نوع پایه‌ها (ثابت یا ردیاب) و مواردی مانند تمیزی مدول‌ها، در سایه قرار نگرفتن آنها و نقص‌های فنی احتمالی بستگی دارد. محدوده معمول ضریب ظرفیت نیروگاه‌های فتوولتائیک پایه ثابت بین 11% (مثلا در اقلیم آلمان) تا 25% (مثلا در اقلیم کالیفرنیا جنوبی آمریکا) تغییر می‌کند. ضریب ظرفیت را می‌توان از طریق ردیاب‌های خورشیدی و دریافت پرتوی مستقیم خورشید بین 25% تا 40% افزایش داد.

همان‌طور که در شکل شماره 38 ملاحظه می‌شود، ضریب ظرفیت نیروگاه‌های گرمایی در مجموع از ضریب ظرفیت نیروگاه‌های فتوولتائیک حدود 50% بیشتر است که دلیل آن، بازده بیشتر نیروگاه‌های گرمایش خورشیدی نسبت به فتوولتائیک است.

در مقابل، مقایسه هزینه احداث نیروگاه در فناوری فتوولتائیک و گرمایشی در شکل شماره 39 نشان‌دهنده برتری

آنها کرد. دو پروژه بشقاب خورشیدی نیز به دو شرکت انگلیسی ای.ای.اس. سولار و کی.رود فروخته شد و هنوز خبری از ادامه آنها منتشر نشده است [45، 46، 47 و 48].

در زمینه فناوری تنوره خورشیدی نیز جز چند طرح تحقیقاتی کار خاصی انجام نشده است. تنها طرح عملیاتی به ظرفیت 27/5 مگاوات در چین نیز که از سال 2009 آغاز شده، هنوز پیشرفت قابل ذکری نداشته است.



شکل 35: نیروگاه برج خورشیدی اویانپاسولار متشکل از سه واحد به ظرفیت مجموع 400 مگاوات در کالیفرنیا آمریکا [49]



شکل 36: نیروگاه‌های برج خورشیدی PS10 (جلو) و PS20 (عقب) به ظرفیت 11 و 20 مگاوات در اسپانیا [50]



شکل 37: نیروگاه بشقاب خورشیدی ماریکوپا به ظرفیت 1/5 مگاوات در ایالت آریزونا آمریکا که ناتمام رها شد [51]

5-5- تحلیل ضریب ظرفیت، هزینه و مساحت زمین در

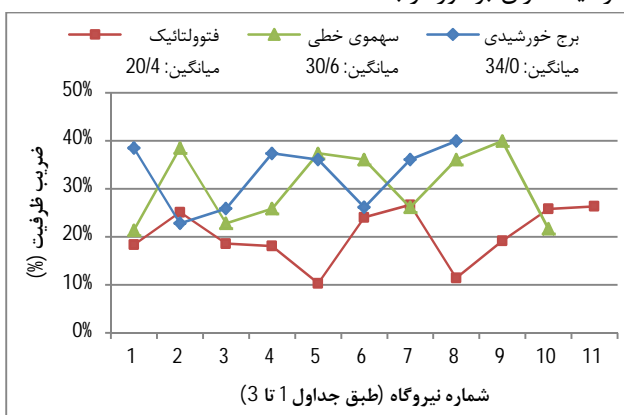
بزرگ‌ترین نیروگاه‌های خورشیدی جهان

در این بخش سه مشخصه اصلی نیروگاه‌های خورشیدی،

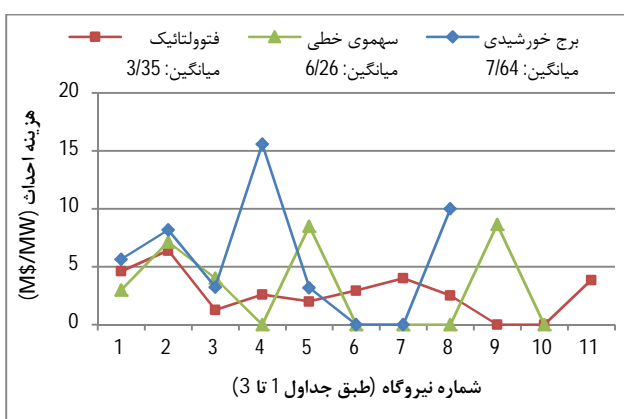
36 Capacity Factor

37 دقت شود که ضریب ظرفیت با بازده تفاوت دارد. بازده یک مولد انرژی، نسبت انرژی مفید استخراج‌شده به انرژی موجود در منبع انرژی است [54] و عامل تعیین‌کننده آن، نوع و سطح فناوری مولد است؛ درحالی‌که ضریب ظرفیت یک مولد، نسبت توان تولیدشده در یک دوره‌ی زمانی مشخص به حداکثر توان قابل تولید (با کار در ظرفیت کامل) در همان دوره‌ی زمانی است [53] و دو عامل تعیین‌کننده آن، ساعات فعالیت و میزان دسترسی به منبع انرژی است. بازده و ضریب ظرفیت دو مشخصه عملکردی یک نیروگاه محسوب می‌شوند [55].

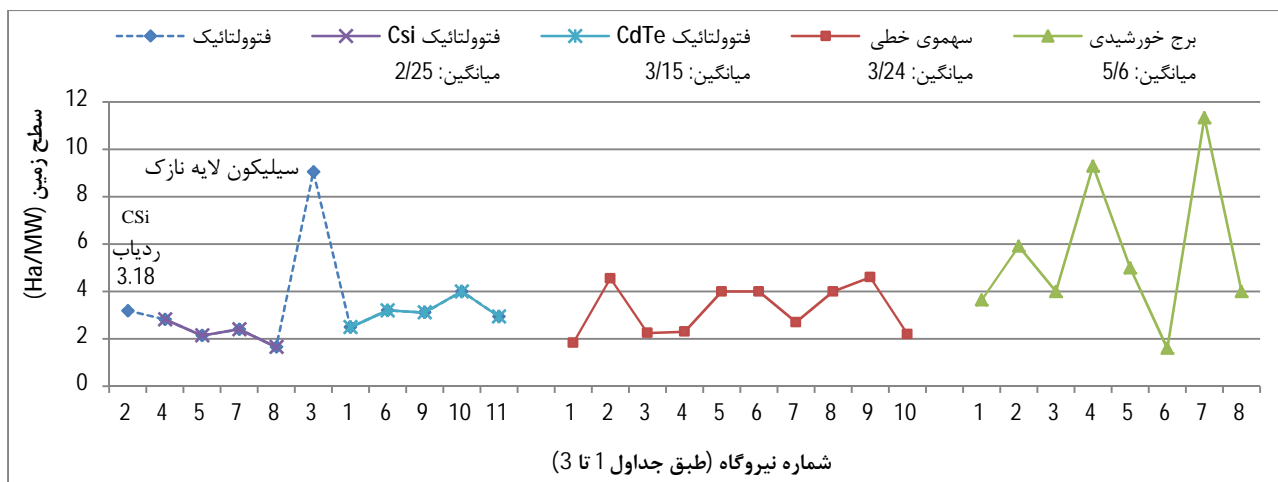
سرمایه‌گذاران برخوردار باشد.



شکل 38: مقایسه ضریب ظرفیت نیروگاه‌های بزرگ خورشیدی



شکل 39: مقایسه هزینه احداث نیروگاه‌های بزرگ خورشیدی



شکل 40: نمودار سطح اشغال شده زمین در نیروگاه‌های بزرگ خورشیدی

100 درصدی فناوری فتوولتائیک بر فناوری گرمایش خورشیدی است؛ عامل بسیار مهمی که باعث شده توسعه نیروگاه‌های فتوولتائیک بسیار سریع‌تر و گسترده‌تر از فناوری گرمایش خورشیدی باشد. در این نمودار، عدد صفر نشانه در دسترس نبودن اطلاعات است.

در شکل شماره 40 نیز نمودار سطح زمین اشغال شده نیروگاه‌ها با هم مقایسه شده است که نشان‌دهنده برتری نسبی فناوری فتوولتائیک نسبت به دو فناوری گرمایش خورشیدی (سهموی خطی و برج خورشیدی) است. البته، فناوری لایه نازک سیلیکون آمورف که جزء فناوری‌های فتوولتائیک است، سطح قابل توجهی (حدود 9 هکتار بر مگاوات) را اشغال کرده است. دلیل اصلی این موضوع نیز به بازده کم مدول‌های آمورف (بین 7% تا 11%) بازمی‌گردد که برای تأمین ظرفیت نامی مورد نیاز، باید تعداد زیادی از آنها در مساحت بیشتری نصب شود. دو فناوری سیلیکون بلوری و کادمیوم تلوراید پایه‌ثابت نیز به‌طور میانگین، 2/25 و 3/15 هکتار بر مگاوات از سطح زمین را اشغال می‌کنند. البته، نیروگاه تک‌بلوری کالیفرنیا به دلیل استفاده از ردیاب خورشیدی تک‌محوره، حدود 40% فضای بیشتری نسبت به میانگین فناوری سیلیکون بلوری اشغال کرده است.

به این ترتیب، به نظر می‌رسد دو عامل هزینه احداث و سطح زمین مورد نیاز سبب شده است تا فناوری فتوولتائیک علی‌رغم توان خروجی کمتر، از اقبال بیشتری در میان سیاست‌گذاران و

6- نتیجه‌گیری

بهره‌گیری از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر برای تأمین انرژی الکتریکی راه‌کاری اجتناب‌ناپذیر در مسیر توسعه پایدار کشورها در جهان امروز است. بی‌شک اگر دولت‌ها و فعالان بخش انرژی، در

این مسیر از شتاب مناسب بهره‌نبرند، آینده بازار تولید انرژی را به رقبای خویش واگذار خواهند کرد. یکی از منابع سرشار انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی است که به دو صورت نور و گرما قابل استفاده است. انرژی نور با استفاده از فناوری فتوولتائیک و

پیشرفت چندانی نداشته است. به طوری که دو پروژه بزرگ 850 و 700 مگاواتی مطرح شده در آمریکا به دلیل بحران مالی متوقف و به فتوولتائیک تغییر فناوری دادند. سایر روش‌های گرمایشی نیز در حد طرح‌های مطالعاتی و آزمایشی کوچک باقی مانده‌اند.

مقایسه توان خروجی، هزینه احداث و سطح زمین مورد نیاز در بزرگ‌ترین نیروگاه‌های خورشیدی جهان در دو فناوری فتوولتائیک و گرمایش خورشیدی به خوبی علت پیشی گرفتن فناوری فتوولتائیک در رشد و توسعه گسترده آن را نشان می‌دهد. با وجود آن که فناوری فتوولتائیک برخوردار است، هزینه بالاتر احداث و همچنین، فضای بیشتری که اشغال می‌کند (عامل دیگری برای افزایش احتمالی هزینه‌ها) باعث شده تا گسترش آن با محدودیت‌هایی همراه باشد. علاوه بر اینها، سهولت نصب و راه‌اندازی سامانه‌های فتوولتائیک و مهم‌تر از آن، انعطاف‌پذیری این فناوری برای نصب در شرایط مختلف محیطی (هوای سرد یا گرم)، روی زمین یا روی سقف منازل و ساختمان‌ها، مناطق شهری یا خارج شهر، نداشتن آلودگی صوتی و شیمیایی و مصرف حداقل آب ممکن، عوامل دیگری هستند که شرایط رشد و توسعه را برای آن مساعدتر ساخته است. امروز بیش از 90 درصد برق خورشیدی جهان با فناوری فتوولتائیک به دست می‌آید و کشورها و شرکت‌های بی‌شماری از عواید اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مشارکت در این صنعت بزرگ جهانی بهره‌مند می‌شوند.

7- تقدیر و تشکر

تهیه‌کنندگان این مقاله وظیفه خود می‌دانند از کلیه اعضای پروژه نیروگاه خورشیدی جهاد دانشگاهی صنعتی شریف به خاطر همکاری‌هایشان و به‌طور مشخص، از جناب آقای مهندس کوروس حمزه به دلیل پذیرفتن بازخوانی مقاله و ارائه راهنمایی‌ها و نکات بجا و همین‌طور از آقای مهندس مهدی رشیدزاد به دلیل کمک در تهیه گزیده مطالب این مقاله، تشکر نمایند.

8- ضمیمه

جزئیات اطلاعات نیروگاه‌های منتخب و بزرگ احداث شده با استفاده از فناوری‌های فتوولتائیک و گرمایش خورشیدی در جداول شماره 1، 2 و 3 آمده است. تحلیل‌های آماری این مقاله براساس اطلاعات این جداول انجام شده است.

انرژی گرمایی از طریق ژنراتورهای با محرک توربین یا موتورهای گرمایی به همراه انواع فناوری‌های متمرکزکننده گرمایش خورشیدی به الکتریسیته تبدیل می‌شود. سلول‌های خورشیدی در مسیر پیشرفت خود تحولات بزرگی را شاهد بوده‌اند و سه نسل از فناوری‌های سیلیکون بلوری، لایه نازک (سیلیکونی، کادمیوم تلوراید و CIGS) و فناوری‌های نوظهور را پشت سر گذاشته‌اند. دستیابی به بیشترین بازده و کمترین هزینه دو هدف توسعه این سه نسل از فناوری‌های سلول خورشیدی بوده است. از این سه نسل، سلول‌های سیلیکون بلوری بیش از 90% بازار را در اختیار دارند و پس از آنها، سلول‌های لایه نازک سیلیکونی آمورف و کادمیوم تلوراید بیشترین کاربرد را داشته‌اند.

فناوری فتوولتائیک امروز در بیش از 40 کشور جهان کاربرد دارد که پنج کشور آلمان، ایتالیا، چین، آمریکا و ژاپن با نصب بیش از 70% ظرفیت جهانی، گوی سبقت را از سایرین ربوده‌اند. براساس آمار منتشرشده، در سال 2013 نزدیک به 35 گیگاوات ظرفیت جدید به سامانه‌های فتوولتائیک جهان اضافه شده و پیش‌بینی می‌شود در سال 2014 این رقم به 41 گیگاوات برسد. در سه سال گذشته نزدیک به 16 طرح بالای 100 مگاوات در سه کشور آمریکا، هند، آلمان و چین با استفاده از فناوری‌های سیلیکون بلوری، لایه نازک سیلیکون آمورف و کادمیوم تلوراید نصب شده است. طرح‌های زیادی نیز در مقیاس هزارمگاوات و چندمگاوات نیز در کشورهای مختلف در افق 3 تا 15 سال در دستور کار قرار گرفته است.

فناوری‌های گرمایشی نیز به دو دسته متمرکزکننده (شامل سهموی خطی، برج خورشیدی و بشقاب‌های خورشیدی) و غیرمتمرکزکننده (شامل حوضچه‌های خورشیدی و تنوره خورشیدی) تقسیم می‌شود. از میان انواع فناوری‌های گرمایشی، دو فناوری سهموی خطی و برج خورشیدی به ترتیب از اقبال و توسعه بیشتری، به‌ویژه در کشورهای اسپانیا و آمریکا، برخوردار بوده‌اند و بیش از 20 طرح دیگر با ظرفیت‌های بیش از 50 مگاوات در کشورهای آمریکا، اسپانیا، مراکش، آفریقای جنوبی و هند در حال پیگیری است. فناوری بشقاب خورشیدی نیز علی‌رغم پتانسیل بالا و بازدهی بیشتری که نسبت به دو فناوری گرمایشی دیگر دارند، به دلیل محدودیت ساخت و تولیدی موتورهای استرلینگ و آینه‌های سهموی، و همچنین، هزینه‌های غیرقابل رقابت آن در مقایسه با فناوری‌های مشابه و فناوری فتوولتائیک،

جدول 1: جزئیات اطلاعات نیروگاه‌های منتخب و بزرگ احداث شده با استفاده از فناوری فتوولتائیک [39]

ردیف	نام پروژه	کشور	ظرفیت MW	تولید سالانه GWh	هزینه احداث (M\$)	فناوری	تعداد مدول	مساحت زمین (هکتار)	تاریخ بهره‌برداری
1	Agua Caliente [60]	آمریکا	390*	627	1.800	CdTe، ثابت	5.200.000	971	2013 و 2014
2	California Valley Solar Ranch [61]	آمریکا	250+	550	1.600	SCSi، ردیاب	770.000	796	2013 و 2014
3	Charanka Solar Park [62]	هند	221‡	≈ 360	280	TLSi، ثابت	نامشخص	2.000	2012
4	Huanghe Hydropower Golmud Solar Park [63]	چین	200	317	520	SCSi، ثابت	نامشخص	564	2011
5	Solarpark Meuro [37]	آلمان	166	170	332	MCSi، ثابت	664.000	355	2011 و 2012
6	Copper Mountain [65]	آمریکا	150	316	440	CdTe، ثابت	2.420.000	480	2010 و 2013
7	Mesquite Solar 1 [66]	آمریکا	150	350	600	MCSi، ثابت	800.00	360	2013
8	Neuhardenberg [67]	آلمان	145†	160	365	MCSi، ثابت	600.00	240	2012
9	Catalina Solar Project [68]	آمریکا	143	240	نامشخص	CdTe و CIGS	1.100.000	445	2012 و 2013
10	Campo Verde [65], [69]	آمریکا	146	330	نامشخص	CdTe، ثابت	1.820.000	584	2013
11	Imperial Solar Energy Center South [64]	آمریکا	130	300	500	CdTe، ثابت	1.700.000	382	2013

* تا پایان سال 2013، 251 MW نصب شد. † اولین واحد 130 MW در فوریه 2013 نصب شد. ‡ مجموعه‌ای از 19 نیروگاه 1 تا 25 مگاواتی † مجموعه‌ای از 11 نیروگاه

CdTe: سلول کادمیوم تلوراید CIGS: سلول مس، ایندیوم، گالیوم و سلنیوم SCSi: سلول سیلیکون تک‌بلوری MCSi: سلول سیلیکون چندبلوری

جدول 2: جزئیات اطلاعات بزرگترین نیروگاه‌های احداث شده با استفاده از فناوری متمرکزکننده سهموی خطی [59]

ردیف	نام پروژه	کشور	ظرفیت (MW)	تولید سالانه (GWh)	هزینه احداث (M\$)	تعداد سهموی ³⁸	سطح هر مجموعه سهموی (m ²)	مساحت زمین (هکتار)	تاریخ بهره‌برداری
1	Solar Energy Generating Systems	آمریکا	354	662	1.060	نامشخص	نامشخص	648	1984-1990
2	Solana	آمریکا	280	944	2.000	3.232	680	1.275	2013
3	Solaben	اسپانیا	200	400	800	1.440	833	450	2013
4	Solnova	اسپانیا	150	340	نامشخص	1.080	833	345	2009
5	Andasol	اسپانیا	150	491	1.275	1.872	817	600	2008-2011
6	Extresol	اسپانیا	150	474	≈ 1.215	1.872	817	600	2010 و 2012
7	Palma del Rio	اسپانیا	100	229	نامشخص	1.592	470	270	2010 و 2011
8	Manchasol	اسپانیا	100	316	نامشخص	1.248	817	400	2011
9	Valle Solar	اسپانیا	100	350	864	1.248	817	460	2011
10	Helioenergy	اسپانیا	100	190	نامشخص	720	833	220	2011 و 2012

جدول 3: جزئیات اطلاعات بزرگترین نیروگاه‌های احداث شده با استفاده از فناوری برج خورشیدی (دریافت کننده مرکزی) [59]

ردیف	نام پروژه	کشور	ظرفیت (MW)	تولید سالانه (GWh)	هزینه احداث (M\$)	تعداد و ارتفاع برج (m)	تعداد هلیواستات	سطح هر هلیواستات (m ²)	مساحت زمین (هکتار)	تاریخ بهره‌برداری
1	Ivanpah	آمریکا	390	1.080	2.200	3 ، 140	173.500	نامشخص	1.420	2013
2	Crescent Dunes	آمریکا	110	485	900	1 ، 160	17.170	62	650	2013
3	PS20	اسپانیا	20	48	65	1 ، 165	1.250	120	80	2009
4	Gemasolar	اسپانیا	19/9	110	310	1 ، 140	2.650	120	185	2011
5	PS10	اسپانیا	11	24	35	1 ، 115	624	120	55	2006
6	Sierra SunTower	آمریکا	5	21,5*	نامشخص	2 ، نامشخص	2400	نامشخص	8	2009
7	Jülich Solar Tower	آلمان	1/5	2,2	نامشخص	1 ، 60	2000	نامشخص	17	2008
8	Mersin Solar Plant	ترکیه	5	14	50	1 ، نامشخص	510	نامشخص	20	2013

* اعداد دارای زیرخط به منزله تخمین نویسندگان مقاله با توجه به پتانسیل خورشیدی منطقه و پروژه‌های مشابه در منطقه و جهان است.

38 Solar Collector Assemblies (SCAs)

فهرست منابع

- [1] The German Energy /SocietyDeutsche Gesellschaft fur Sonnenenergie (DGS); *Planning and installing photovoltaic systems : a guide for installers, architects, and engineers*, 2nd ed. 2008.
- [2] Goetzberger A.; Hebling C.; Schock H.W.; "Photovoltaic Materials, History, Status and Outlook", Materials Science and Engineering R: Reports, Vol. 40, Issue 1. p.p. 1-46, 2003.
- [3] Shah, A.; Meier, J.; Buechel, A.; Kroll, U.; Steinhäuser, J.; Meillaud, F.; Schade, H.; Dominé, D.; "Towards very low-cost mass production of thin-film silicon photovoltaic (PV) solar modules on glass", Thin Solid Films, Vol. 502, Issue 1-2, p.p. 292–299, 28 April 2006, Elsevier B.V. 2005-09-02.
- [4] NREL, "Best Research-Cell Efficiencies", US Department of Energy, Apr. 2013.
- [5] Al-Ghamdi, A.A.; Khan, Shamshad A.; Nagat, A.; Abd El-Sadek, M.S.; "Synthesis and optical characterization of Nanocrystalline CdTe thin films", Optics & Laser Technology, Vol. 42, Issue 8, p.p. 1181–1186, 2010.
- [6] Birkmire, Robert W.; McCandless, Brian E.; "CdTe thin film technology: Leading thin film PV into the future", Current Opinion in Solid State and Materials Science, Vol. 14, Issue 6, p.p. 139-142, 2010.
- [7] "Solar in Depth: Cadmium Telluride (CdTe)", sited on Sep. 2013; Available in: http://solarcellcentral.com/solar_page.html#tf_cells
- [8] "2012 Top Solar Module Manufacturers Worldwide", sited on Sep. 2013; Available in: http://solarcellcentral.com/companies_page.html.
- [9] Tinoco, T.; Rincón, C.; Quintero, M.; Pérez, G. Sánchez (1991). "Phase Diagram and Optical Energy Gaps for CuInyGal-ySe2 Alloys", Physica Status Solidi (a), Vol. 124, Issue 2, 427-434, 1991.
- [10] Hedström J.; Ohlsen H.; Bodegard M.; Kylvner A.; Stolt L.; Hariskos D.; Ruckh M.; Schock H.W.; "ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se2 thin film solar cells with improved performance". Proceedings of 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p.p. 364–371, 1993.
- [11] "Empa takes thin film solar cells to a new level. A new world record for solar cell efficiency". empa.ch, Jan. 18th, 2013.
- [12] "Top 10 World's Most Efficient CI(G)S Modules", Solarplaza.com. Retrieved on 2013-02-18.
- [13] Miasole. "MiaSolé Achieves 15.7% Efficiency with Commercial-Scale CIGS Thin Film Solar Modules", Retrieved 30 November 2012.
- [14] Bisquert, Juan; "Dye-sensitized solar cells", Departament de Física, Universitat Jaume I
- [15] Bisquert, J.; Cahen, D.; Hodes, G.; Rühle, S.; Zaban, A.; "Physical chemical principles of photovoltaic conversion with nanoparticulate, mesoporous dye-sensitized solar cells", Journal of Physical Chemistry B, Vol. 108, p.p. 8106-8118, 2004.
- [16] Stathatos, E.; "Dye Sensitized Solar Cells as an Alternative Approach to the Conventional Photovoltaic Technology Based on Silicon - Recent Developments in the Field and Large Scale Applications, Solar Cells - Dye-Sensitized Devices, Prof. Leonid A. Kosyachenko (Ed.), 2011, ISBN: 978-953-307-735-2, In Tech; Available in: <http://www.intechopen.com/books/solar-cells-dye-sensitized-devices/dye-sensitized-solar-cells-as-an-alternative-approach-to-the-conventional-photovoltaic-technology-ba>
- [17] McGehee D.G.; Topinka M.A.; "Solar cells: Pictures from the blended zone". Nature Materials, Vol. 5, No. 9, p.p. 675–676, 2006. doi:10.1038/nmat1723.
- [18] Nelson J.; "Organic photovoltaic films", Current Opinion in Solid State and Materials Science, Vol. 6, p.p. 87–95, 2002, doi:10.1016/S1359-0286(02)00006-2.
- [19] Halls J.J.M.; Friend R.H.; (ed.: Archer M.D.; Hill R.D.); "Clean electricity from photovoltaic", London: Imperial College Press, p.p. 377–445, 2001, ISBN 1860941613.
- [20] Kearns D.; Calvin M.; "Photovoltaic Effect and Photoconductivity in Laminated Organic Systems". J. Chem. Phys, Vol. 29, No. 4, p.p. 950–951, 1958, doi:10.1063/1.1744619.
- [21] Ghosh A.K.; et al.; "Photovoltaic and rectification properties of Al/Mg phthalocyanine/Ag Schottky-barrier cells". J. Appl. Phys, Vol. 45, p.p. 230–236, 1974, doi:10.1063/1.1662965.
- [22] "Multijunction Photovoltaic Cell", Wikipedia, the Free Encyclopedia, Cited on Sep. 2013; Available in: http://en.wikipedia.org/wiki/Multijunction_photovoltaic_cell.
- [23] "Tandem solar cells", available in: <http://www.superstrate.net/pv/limit/tandem.html>.
- [24] Scharber MC; Sariciftci NS.; "Efficiency of bulk-heterojunction Organic Solar Cells", Journal of Progress in Polymer Sciences, 2013; available in: <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.001>.
- [25] Yastrebova N. V.; "High-efficiency multi-junction solar cells: Current status and future potential", Centre for Research in Photonics, University of Ottawa, April 2007; Available in: <http://sunlab.site.uottawa.ca/pdf/whitepapers/HiEfficMjSc-CurrStatus&FuturePotential.pdf>.
- [26] S. Kurtz.; "Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry". www.nrel.gov. p. 5 (PDF: p. 8). Retrieved 2012-02-08.
- [27] Julio Chaves; "Introduction to Nonimaging Optics", CRC Press, 2008 ISBN 978-1420054293.
- [28] Roland Winston et al.; "Nonimaging Optics", Academic Press, 2004 ISBN 978-0127597515.

- [29] Donald Ahrens C; "Meteorology today" , 2010.
- [30] Mukund R. Patel; "Wind and Solar Power Systems, 2000.
- [31] Soteris A. Kalogirou; "Solar Energy Engineering Processes and Systems", 2009.
- [32] Parabolic Trough Power Plant System Technology [Online]. [2010?] [cited 2013 may 20] http://www.nrel.gov/csp/troughnet/power_plant_systems.html.
- [33] Gilbert M. Masters; "Renewable and Efficient Electric Power Systems", 2004.
- [34] "Global Market Outlook for Photovoltaics Until 2016", EPIA, May 2013; Available in: http://www.epia.org/uploads/tx_epiapublications/Global-Market-Outlook-2016.pdf.
- [35] "IHS: PV installations worldwide to hit 41GW in 2014", PV-Tech, Oct. 2013; Available in: http://www.pv-tech.org/news/ihs_pv_installations_worldwide_to_hit_45gw_in_2014.
- [36] "Solar power by country", Wikipedia, the Free Encyclopedia, [cited 2013, Sep.]; Available in: http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_by_country.
- [37] "Canadian Solar project scoops POWER-GEN award", Renewable Energy Installer, Jan. 8th, 2013; Available in: <http://www.renewableenergyinstaller.co.uk/2013/01/canadian-solar-project-scoops-power-gen-award/>.
- [38] "Topaz Solar Farm", First Solar, Retrieved July 22, 2013; Available in: <http://www.firstsolar.com/Projects/Topaz-Solar-Farm>.
- [39] "Large systems under construction or in planning", Wikipedia, the free encyclopedia, [cited 2014, Feb.]; Available in: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_photovoltaic_power_stations#cite_note-pv-tech.org-21.
- [40] U.S. Parabolic Trough Power Plant Data [Online] [2010?] [cited 2013 may 20]; Available in: http://www.nrel.gov/csp/troughnet/power_plant_data.html#solar_one.
- [41] "Abengoa Solar Solana Generating Station Sortie", Gunther Portfolio, Jan. 2013; Available in: <http://guntherportfolio.com/2013/01/abengoa-solar-solana-generating-station-sortie/>.
- [42] "Abengoa closes financing and begin operation of Solaben 1 & 6 CSP plants in Spain", CSP World, Sep. 2013; Available in: <http://www.csp-world.com/news/20130930/001204/abengoa-closes-financing-and-begin-operation-solaben-1-6-csp-plants-spain>.
- [43] «نیروگاه‌های خورشیدی حرارتی»، شرکت ایستاب آفتاب انرژی، [2008] http://www.istabaftab.com/Products/Solar_Power_Plant/
- [44] "Masdar Launches Shams 1, the World's Largest Concentrated Solar Power Plant in Operation", May 2013; Available in: <http://www.masdar.ae/en/media/detail/masdar-launches-shams-1-the-worlds-largest-concentrated-solar-power-plant-i>.
- [45] SES Stirling Energy Systems [Online] [2009?] [cited 2013 may 18]; Available in: californiaphoton.com/cache/g/Stirling_solarOne.html.
- [46] "Stirling Energy caves in against PV's falling costs", Renewable Energy Focus, Oct. 2011; Available in: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/21168/stirling-energy-caves-in-against-pvs-falling-costs/>.
- [47] "AES Solar buys Tesser Solar's Imperial Valley project with intent to turn CSP into PV", PV-Tech, Feb. 2011; Available in: http://www.pv-tech.org/news/aes_solar_buys_tessera_solars_imperial_valley_project_with_intent_to_turn_c.
- [48] "Stirling Energy Systems", Wikipedia, the free encyclopedia, Cited on Feb. 2013; Available in: http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_Energy_Systems.
- [49] "Ivanpah Solar Electric Generating System Reaches 'First Sync' Milestone", Sep. 2013; Available in: <http://ivanpahsolar.com/blog>.
- [50] "PS20 solar power plant", Wikipedia, the free encyclopedia, [Cited 2014, Jan.]; Available in: http://en.wikipedia.org/wiki/PS20_solar_power_tower.
- [51] "Maricopa Solar Project", CSP World, [Cited 2014, Jan.]; Available in: <http://www.csp-world.com/cspworldmap/maricopa-solar-project>.
- [52] "Capacity Factor", Wikipedia, free encyclopedia; Available in: http://en.wikipedia.org/wiki/Capacity_factor.
- [53] "Electric Power Annual 2009", U.S. Energy Information Administration, pp. 11 and 97, April 2011; Available in: <http://www.eia.gov/electricity/annual/archive/03482009.pdf>.
- [54] "Plant Efficiency", Wikipedia, free encyclopedia; Available in: http://en.wikipedia.org/wiki/Plant_efficiency.
- [55] "Performance Factors of a Power Plant"; Available in: http://www.engineeringtoolbox.com/power-plant-efficiency-d_960.html.
- [56] Secret.R; "How made, Solar cell", volume 1; Available in: <http://www.madehow.com/Volume-1/Solar-Cell.html>.
- [57] M.A. Green; "Solar Cells Operating Principles, Technology and System Applications", Prentice-Hall, 1986
- [58] Luther J.; Nast M.; Fisch N.; Christoffers D.; Pfisterer F.; Meissner D.; Nitsch J.; "Solar Technology" 2002, Wiley-VCH, 2008, Weinheim. doi:10.1002/14356007.a24_369

- [59] “Concentrating Solar Power Projects by Project Name”, NREL, [cited 2014 Feb. 20]; Available in: http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by_project.cfm.
- [60] RPS Project Status Table - February Update; Available in: http://www.cpuc.ca.gov/NR/rdonlyres/B617EAAA-8E77-4D37-B557-03735BE47526/0/RPS_Project_Status_Table_2012_FebFinal.xls.
- [61] Energy Division Resolution E-4229; Available in: http://docs.cpuc.ca.gov/Published/Final_resolution/97784.htm.
- [62] Preparations in full swing for opening of ‘Gujarat Solar Park’; Available in: <http://deshgujarat.com/2012/04/15/in-photos-preparations-in-full-swing-for-opening-of-gujarat-solar-park/>.
- [63] “China-PV Power Station”. China Central Television. Oct 29, 2011. Archived from the original on 20 February 2012. Retrieved April 2012; Available in: <http://web.archive.org/web/20120220092842/http://newscontent.cctv.com/news.jsp?fileId=120151>
- [64] MarketWatch: Tenaska Solar Ventures Chooses First Solar to Construct Imperial Solar Energy Center South; Available in: <http://www.marketwatch.com/story/tenaska-solar-ventures-chooses-first-solar-to-construct-imperial-solar-energy-center-south-2011-09-27>.
- [65] Denis Lenardic. Large-scale photovoltaic power plants ranking 1 - 50 PVresources.com, 2011; Available in: <http://www.pvresources.com/PVPowerPlants/Top50.aspx>.
- [66] “Mesquite Solar 1”. Sempra Generation. Retrieved 2013-04-25; Available in: <http://www.semprausgp.com/energy-solutions/solar-mesquite-solar.html>.
- [67] Lima Group: BV Neuhardenberg; Available in: <http://www.lima-group.com/en-au/references/contract-for-services.php?showproject=55>.
- [68] Catalina Solar Project; Available in: http://www.edf-re.com/projects/detail/catalina_solar_project/.
- [69] First Solar: First Solar Sells 139-Megawatt Campo Verde Solar Project; Available in: <http://investor.firstsolar.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=758547>