بسمه تعالی

مقدمه‌ای بر طراحی سیستم‌های فوتوولتائیک به منظور تولید برق خورشیدی

گردآورندگان: حسین حیدری، علی اکبر سعادتی، امید روشن

ارائه شده توسط شرکت انرژی خورشیدی هورآیش

مقدمه: انرژی خورشید

در سال‌های اخیر به دلیل محدودیت و گرانی سوخت‌های فسیلی و نیز مسائل زیست محیطی، استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر رشد بسیاری داشته است.

امروزه سوخت‌های فسیلی بیش از ۸۰ درصد انرژی مصرفی دنیا را تامین می‌کنند. استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث تولید گازهایی چون کربن دی اکسید، کربن مونواکسید، اکسید ازت و SO_2 می‌شود که باعث آلودگی و سنگین شدن جو زمین و گرم شدن کره زمین می‌گردد. تغییرات آب و هوایی، کاهش لایه اوزون و بارش باران‌های اسیدی از جمله نتایج آنها می‌باشد. همچنین سوخت‌های فسیلی منابعی هستند که طی قرن‌های متمادی در لایه‌های زمین تشکیل شده‌اند و در صورت اتمام دیگر فرصت تولید مجدد آنها وجود ندارد. بنابراین پایان‌پذیر بودن منابع زیرزمینی و اثرات مخرب آنها بر محیط زیست از یک سو و تقاضای رو به رشد انرژی با توجه به افزایش جمعیت و توسعه اقتصاد از سوی دیگر باعث شده است تا این منابع با منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی باد، انرژی خورشیدی، انرژی برق آبی و ... جایگزین گردد. پتانسیل استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر برای تامین انرژی بشر بسیار بالاست. این منابع می‌توانند صدها برابر انرزی مورد نیاز بشر را تولید کنند. به عنوان مثال مطالعات نشان داده است که ۱۰۰۰ برابر انرژی مورد نیاز بشر می‌تواند به طور کامل با استفاده از انرژی خورشید تامین شود. این در حالی است که تنها مقدار بسیار کمی‌از این پتانسیل استفاده می‌شود. البته امروزه با کاهش هزینه احداث سیستم‌های تولید انرژی تجدیدپذیر و افزایش هزینه سوخت‌های فسیلی، انرژی‌های تجدیدپذیر جایگاه مناسبی را می‌توانند به خود اختصاص دهند.

در بین منابع انرژی تجدیدپذیر خورشید بزرگترین منبع تجدیدپذیر انرژی بر روی کره زمین است که می‌تواند به عنوان یک منبع در دسترس در اکثر نقاط جهان به کار گرفته شود. اگر تنها یک درصد از صحراهای جهان توسط نیروگاه‌های خورشیدی به کار گرفته شوند می‌توانند برق مصرفی سالانه جهان را تامین کنند. همچنین تکنولوژی سلول‌های خورشیدی پیوسته ارتقاء می‌یابد و هزینه ساخت آنها نیز پیوسته در حال کاهش است که این خود نوید دهنده ارتقاء جایگاه انرژی خورشیدی نسبت به دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر است.

به طور کلی از انرژی خورشید می‌توان به دو صورت بهره گرفت. یکی استفاده از نور خورشید و تبدیل آن به گرما و تولید حرارت است و دیگری استفاده از نور خوشید و تبدیل آن به الکتریسیته.

۱- استفاده از تابش خورشید و تبدیل آن به گرما

این روش یکی از ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌ها در بهره مندی از انرژی خورشید است. در این روش نور خورشید با برخورد با سطح جاذب مستقیما به گرما تبدیل شده و از گرمای ایجاد شده می‌توان برای مصارف مختلف در صنعت و یا منزل استفاده کرد. استفاده از تابش خورشید برای تولید گرما سابقه‌ای طولانی در زندگی بشر دارد. ساده‌ترین مثال آن قرار گرفتن در مقابل نور خورشید است که باعث گرم شدن بدن فرد می‌شود. یا به عنوان مثال در گذشته خانه‌ها را طوری می‌ساختند که رو به خورشید باشد و از تابش خورشید و گرمای تولید شده بتوانند محیط خانه را گرم کنند. امروزه نیز به شکل‌های پیچیده‌تر و متنوع‌تر با عملکردهای بهینه‌تر از گرمای تولید شده توسط خورشید در صنعت و ساختمان استفاده می‌شود. حدود ۱۳ درصد از بخش‌های صنعتی به انرژی گرمایی کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۷ درصد آنها به گرمای کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نیاز دارند. بنابراین استفاده از گرمای خورشیدی می‌تواند نقش بسیار مهمی در صنعت ایفا کند. از طرف دیگر اگر نیم نگاهی به موقعیت کشورها بیاندازیم خواهیم دید که کشورهای در حال توسعه عمدتا در نزدیکی خط استوا واقع شده‌اند که این باعث شده است تابش‌های زیادی را از سمت خورشید دریافت کنند و بیش از کشورهای دیگر می‌توانند از این موهبت الهی بهره ببرند. کشور ما نیز از نظر جغرافیایی در چنین منطقه‌ای قرار گرفته است بنابراین باید سیاست‌ها و راهکارها طوری تنظیم شود که بتوان از این منبع انرژی بیشترین بهره را گرفت.

در سیستم‌های خورشیدی که برای تولید حرارت به کار گرفته می‌شوند عمدتا از آینه‌های سهموی بزرگ استفاده می‌شود (شکل ۱). این آینه‌ها نور خورشید را در محدوده کوچکی به نام کانون آینه متمرکز می‌کنند. در این محدوده شدت تابش خورشید بسیار افزایش می‌یابد و با قرار دادن یک منبع حاوی سیال در این محدوده می‌توان گرمای تولید شده را جذب کرد و آن را به نقطه مورد نظر انتقال داد.

شکل ۱) آینه‌های خورشیدی سهموی به منظور تولید حرارت.

این سیستم‌ها شکل‌های مختلفی می‌توانند داشته باشند. شکل ۲-الف) یک سیستم دریافت کننده‌ی مرکزی را نشان می‌دهد. در این سیستم از تعداد بسیار زیادی آینه تخت استفاده شده است که دور تا دور یک برج قرار گفته‌اند و نور خورشید را که از زوایای مختلف به آن می‌تابد به قله برج منعکس می‌کنند. بنابراین تابش در آن ناحیه بالا رفته و می‌تواند گرمای زیادی تولید کند. شکل ۲-ب) آینه‌های استوانه‌ای را نشان می‌دهد که نور خورشید را در امتداد یک خط که از کانون آنها عبور می‌کند متمرکز می‌کنند. با قرار دادن یک لوله در امتداد این خط و عبور آب (یا هر سیال دیگر) از داخل آن می‌توان گرمای ایجاد شده را جذب کرد. شکل ۲-ج) نیز آینه‌های بشقابی را نشان می‌دهد که می‌توانند نور موازی که از سمت خورشید می‌آید را در یک نقطه در کانون‌شان متمرکز کنند. با قرار دادن یک مخزن حاوی سیال در این نقطه می‌توان از گرمای تولید شده استفاده کرد.

شکل ۲) نیروگاه‌های خورشیدی با شکل‌های مختلف. الف) یک سیستم دریافت کننده‌ی مرکزی. ب) آینه‌های استوانه‌ای خطی. ج) آینه‌های بشقابی.

چنین نیروگاه‌های حرارتی عمدتا اندازه‌های بسیار بزرگ دارند و از نظر هزینه نیز هزینه ساخت و احداث آنها بسیار بالاست این امر باعث شده است از این سیستم‌ها در مقیاس کوچک و مثلا در منازل به صورت شخصی نتوان استفاده کرد. اما این در حالی است که بخشی از انرژی گرمایی در منازل توسط شخص مصرف می‌شود.

برای استفاده از انرژی خورشید به منظور تولید گرما در مقیاس‌های کوچکتر می‌توان از سیستم آبگرمکن خورشیدی استفاده کرد. آبگرمکن‌های خورشیدی نسبت به نیروگاه‌های حرارتی هزینه‌های به مراتب پایین‌تر و اندازه‌های بسیار کوچکتری دارند. این آبگرمکن‌ها به راحتی می‌توانند در پشت بام خانه‌ها نصب شوند و آب گرم مصرفی منزل را فراهم کنند. نصب و راه‌اندازی این آبگرمکن‌ها نیز بسیار ساده و سریع است و چون از نور خورشید برای تولید گرما استفاده می‌کند هیچ هزینه و آلودگی ندارد. شکل زیر نمونه‌ای از این آبگرمکن خورشیدی را نشان می‌دهد که بر روی سقف منزل قرار گرفته و آب گرم مصرفی خانه را تامین می‌کند.

شکل ۳) آبگرمکن خورشیدی نصب شده بر روی پشت بام منزل.

۲- استفاده از تابش خورشید و تبدیل آن به الکتریسیته

روش دیگری برای بهره‌مندی از انرژی خورشید تبدیل آن به برق است. در سیستم‌های حرارتی نور خورشید مستقیم به حرارت تبدیل می‌شود بنابراین به هزینه و تکنولوژی بالایی احتیاج ندارد. اما در سیستم‌های تولید برق خورشیدی تابش خورشید به حرارت تبدیل نمی‌شود بلکه با استفاده از مواد نیمه‌هادی چون سیلیسیوم به الکتریسیته تبدیل می‌گردد.

سیستم‌های تولید برق خورشیدی را سیستم فوتوولتاییک می‌گویند که از دو کلمه فوتون و ولت تشکیل شده است. فوتون‌ها همان بسته‌های انرژی هستند که از خورشید ساطع می‌شوند. در سیستم‌های خورشیدی با برخورد این فوتون‌ها به سلول‌های خورشیدی و جذب آنها توسط الکترون‌ها ولتاژ الکتریکی تولید می‌شود. به همین دلیل سیستم‌های خورشیدی را سیستم‌های فوتوولتاییک

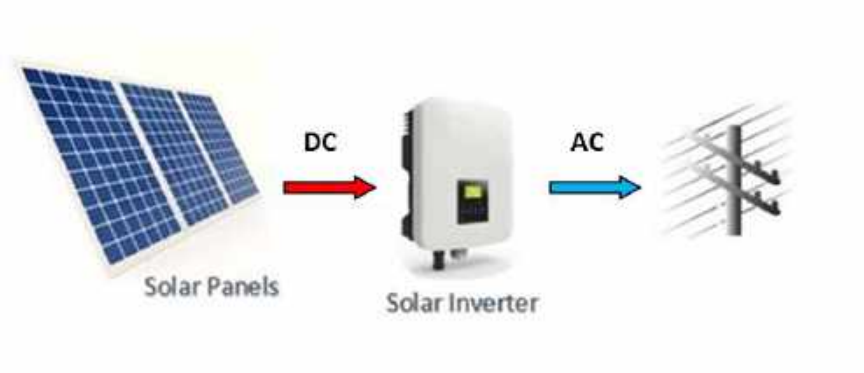
می‌نامند. در سیستم‌های خورشیدی واحد تولید کننده برق سلول‌های خورشیدی هستند. سلول‌های خورشیدی برای اولین بار در دهه ۱۹۵۰ در ماهواره‌های فضایی استفاده شدند. دلیل استفاده از سلول‌های خورشیدی تولید برق در فضا بود. همانطور که می‌دانید ماهواره‌ها خارج از جو زمین قرار دارند و امکان ارسال برق از زمین به ماهواره وجود ندارد. بنابراین ماهواره‌ها می‌بایست همانجا برق مورد نیازشان را تولید می‌کردند و از سلول‌های خورشیدی برای اولین بار بدین منظور استفاده گردید.

سلول‌های خورشیدی اولیه راندمان بسیار پایینی داشتند (حدودا ٤ یا ٥ درصد) و هزینه ساخت آنها نیز بسیار بالا بود. طوری که فقط در مصارف خاص مانند ماهواره‌های فضایی قابلیت استفاده داشتند. امروزه بازده سلول‌های خورشیدی بسیار افزایش پیدا کرده است. سلول‌های خورشیدی در بازار که برای مصارف صنعتی و شخصی مورد استفاده قرار می‌گیرند راندمان ١٦ تا ٢٠ درصد دارند. حتی امروزه در آزمایشگاه سلول‌هایی ساخته می‌شوند که راندمان بیش از ٤٠ درصد دارند. هزینه ساخت سلول‌های خورشیدی نیز امروزه بسیار کاهش پیدا کرده است. بنابراین صنعت خورشیدی می‌تواند در آینده پیشرفت‌های بسیار زیادی را تجربه کند.

سیستم‌های خورشیدی یا همان سیستم‌های فوتوولتاییک به دو دسته متصل به شبکه (On-Grid) و جدا از شبکه (Off-Grid) تقسیم می‌شوند.

١- سیستم‌های خورشیدی متصل به شبکه (On-Grid)

سیستم‌ها خورشیدی متصل به شبکه به سیستم‌هایی اطلاق می‌شود که به شبکه برق شهری متصل شده و برق تولیدی را به شبکه تزریق می‌کنند. در این سیستم پنل‌ها نور خورشید را جذب کرده و آن را تبدیل به الکتریسیته می‌کنند. برق تولیدی پنل‌ها برق مستقیم است بنابراین قبل از ورود به شبکه می‌بایست آن را به برق متناوب تبدیل کرد و بعد به شبکه ارسال کرد. بدین منظور برای متناوب کردن برق پنل از دستگاهی به نام اینورتر استفاده می‌شود که در سیستم خورشیدی متصل به شبکه بین پنل و شبکه برق قرار گرفته و برق مستقیم پنل را به برق متناوب هم فاز و هم ولتاژ با شبکه تبدیل می‌کند و سپس آن را به شبکه ارسال می‌کند (شکل ٤).



شکل ٤) شماتیک سیستم خورشیدی متصل به شبکه.

ویژگی‌های قابل توجه سیستم‌های فوتوولتاییک از جمله به کارگیری در مقیاس‌هاس کوچک و بزرگ، امکان استفاده در مناطق شهری و روستایی و زمان بری کم مراحل نصب و راه‌اندازی آنها باعث شده است که استفاده از این سیستم‌ها جایگاه ویژه‌ای در بین سایر انرژی‌های تجدیدپذیر داشته باشد.

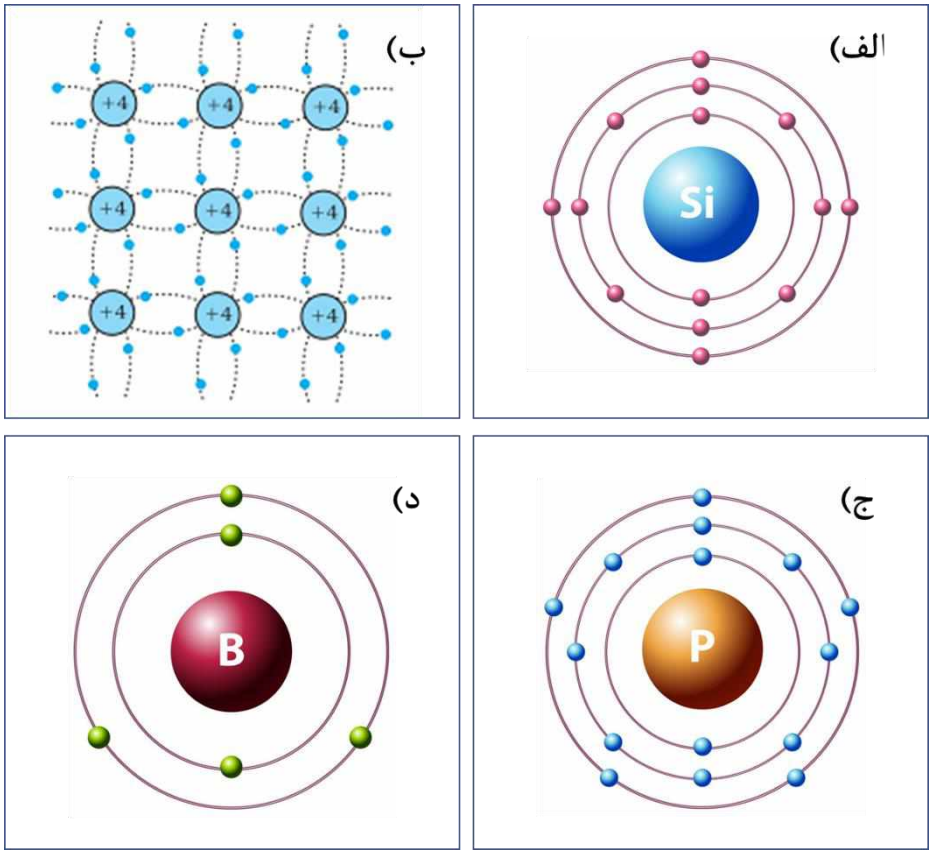
۲- سیستم‌های خورشیدی جدا از شبکه (Off-Grid)

سیستم‌های جدا از شبکه همانطور که از نامشان پیداست به سیستم‌هایی گفته می‌شود که به شبکه برق شهری متصل نیستند و برق تولیدی آنها مستقیما توسط شخص مصرف می‌شود. این سیستم‌ها تنها در نقاطی راه‌اندازی و استفاده می‌شوند که در آن محدوده شبکه برق در دسترس نباشد. مانند زمین‌های کشاورزی یا مثلا روستاهایی که هنوز شبکه برق به آنجا راه نیافته است یا باغ‌ها و ویلاهایی را در نظر بگیرید که از منطقه مسکونی دور هستند. چنین اشخاصی می‌توانند به راحتی از سیستم‌های خورشیدی جدا از شبکه استفاده کرده و برق مورد نیازشان را از این طریق تامین کنند.

همانطور که در بالا به آن اشاره شد، واحد تولید کننده برق در سیستم‌های خورشیدی، سلول‌های خورشیدی هستند. سلول‌های خورشیدی عمدتا از سیلیکون ساخته می‌شوند. سیلیکون عنصری نیمه‌رساناست و به دلیل خواص ویژه‌ای که نیمه‌رساناها از خود نشان می‌دهند عمدتا در قطعات الکترونیکی و همچنین سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین سیلیکون عنصری بسیار فراوان و ارزان است و در پوسته کره زمین به راحتی یافت می‌شود که این نیز خود می‌تواند دلیل دیگری بر استفاده از سیلیکون در سلول‌های خورشیدی باشد.

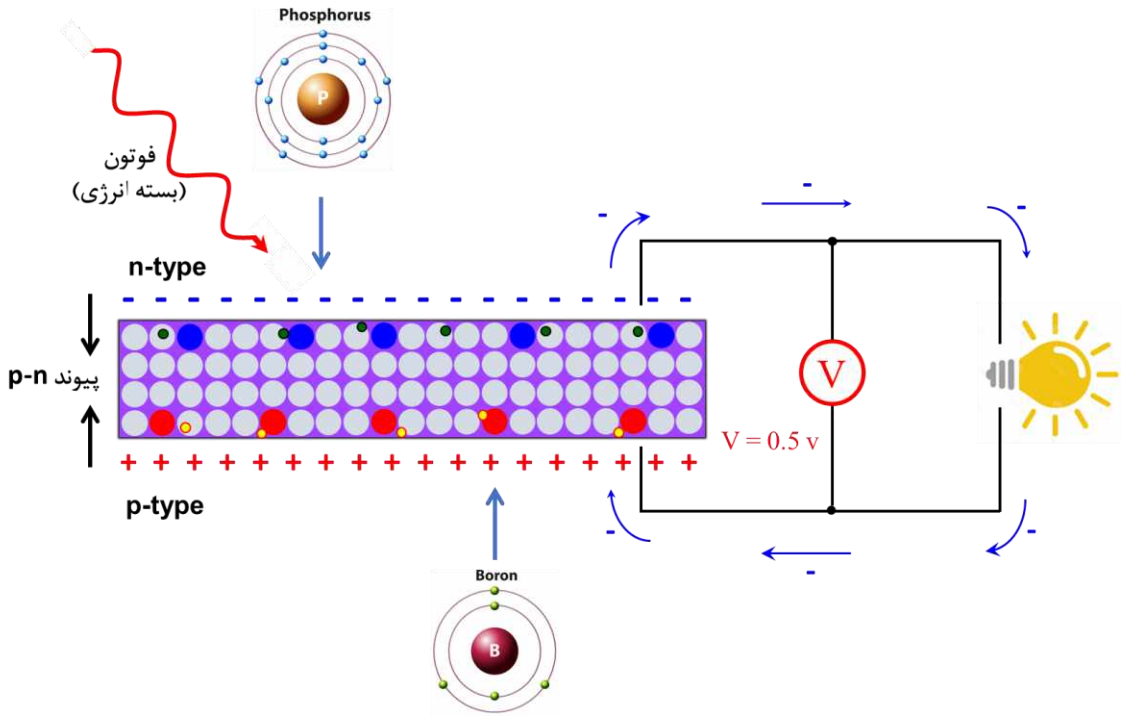
در یک سلول خورشیدی اتم‌های سیلیکون در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و یک لایه نازک سیلیکونی را تشکیل می‌دهند. یک سلول خورشیدی که فقط از اتم‌های سیلیکون تشکیل شده باشد نمی‌تواند به تنهایی برق تولید کند. دلیل این امر این است که اتم‌های سیلیکون در لایه ظرفیتشان (آخرین لایه الکترونی) تعداد ٤ الکترون پیوندی دارند (شکل ٥-الف) و هنگامی‌که این اتم‌ها در کنار یکدیگر قرار

می‌گیرند و تشکیل یک شبکه سیلیکونی را می‌دهند، هر چهار الکترون آنها با الکترون‌های اتم‌های کناری درگیر شده و پیوند کووالانسی تشکیل می‌دهند (شکل ۵-ب). در این حالت الکترون آزادی وجود ندارد که بتواند تابش خورشید را جذب کرده و الکتریسیته تولید کند، بنابراین به هنگام تابش نور به شبکه سیلیکونی برق تولید نمی‌شود. برای برطرف کردن این مشکل باید به شبکه سیلیکونی ناخالصی اضافه گردد طوری که بتوان الکترون آزاد تولید کرد. ناخالصی‌هایی که بدین منظور به شبکه سیلیکونی اضافه می‌شوند دو عنصر فسفر و بور هستند. عنصر فسفر همانطور که در شکل ۵-ج نشان داده شده است در لایه ظرفیت خود تعداد ۵ الکترون پیوندی دارد. هنگامی‌که یک اتم فسفر به صفحه بالایی سلول خورشیدی تزریق می‌شود این اتم وارد شبکه سیلیکونی شده و جای یکی از اتم‌های سیلیکون را می‌گیرد. در این حالت ٤ الکترون لایه ظرفیت اتم فسفر با الکترون‌های اتم‌های سیلیکون مجاور پیوند برقرار کرده و یک الکترون آزاد می‌ماند. این الکترون آزاد وارد شبکه سیلیکونی شده و اگر تعداد بیشتری اتم فسفر به شبکه سیلیکونی تزریق شود باعث می‌شود صفحه فوقانی لایه سیلیکونی (سلول خورشیدی) دارای چگالی الکترون باشد و بار منفی به خودش بگیرد. در این حالت قسمت بالایی لایه سیلیکونی که قبلا یک نیمه رسانای خنثی بود تبدیل به نیمه رسانای منفی یا نیمه رسانای نوع n (n-type) می‌شود.



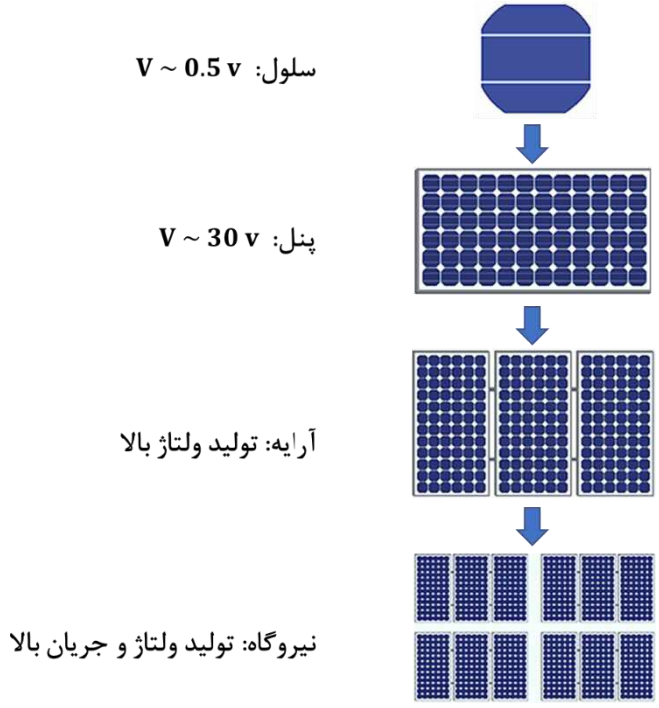
شکل ۵) الف) ساختار الکترونی اتم سیلیکون. ب) شبکه متشکل از اتم‌های سیلیکون و ساختار الکترونی اتم‌های ج) فسفر و د) بور.

در قسمت زیرین سلول خورشیدی نیز عنصر بور تزریق می‌شود. لایه ظرفیت عنصر بور بر خلاف دو عنصر فسفر و سیلیکون دارای ۳ الکترون پیوندی است (شکل۵-د). با تزریق این عنصر به صفحه پایینی سلول خورشیدی و جایگزینی آن با اتم‌های سیلیکون، هر سه الکترون لایه ظرفیت با الکترون‌های اتم‌های سیلیکون مجاور پیوند برقرار کرده و جای یک الکترون در این حالت خالی می‌ماند. جای خالی الکترون را حفره می‌گویند و حفره بار مثبت دارد. با تزریق تعداد بیشتری اتم فسفر به شبکه سیلیکونی، صفحه پایینی سلول خورشیدی بار مثب به خودش می‌گیرد و همین امر باعث می‌شود سلول خورشیدی که یک نیمه رسانای خنثی بوده اکنون به نیمه رسانای مثبت یا همان نیمه رسانای نوع p (p-type) تبدیل شود. در حالتی که یک نیمه رسانای نوع n و یک نیمه رسانای نوع p در مجاورت یکدیگر قرار بگیرند بین آن‌ها پیوند p-n ایجاد می‌شود. وجود این پیوند p-n و شکل‌گیری ناحیه تهی از بار که در بین این دو ناحیه ایجاد می‌شود، باعث می‌شود تا سلول خورشیدی توانایی این را داشته باشد که نور خورشید را جذب کرده و الکتریسیته تولید کند. در این حالت با برخورد فوتون‌ها به الکترون‌های لایه بالایی (نمیه رسانای نوع n) انرژی فوتون کاملا به الکترون منتقل شده و باعث می‌شود الکترون‌ها از قید هسته جدا شده و در صفحه بالایی سلول خورشیدی تجمع کنند. با تجمع الکترون‌ها بر روی سلول خورشیدی اختلاف پتانسیل یا همان ولتاژ الکتریکی تولید می‌شود که به واسطه آن و در صورت وجود مصرف کننده در مدار خارجی، الکترون‌ها به سمت مصرف کننده (مثلا لامپ) حرکت کرده و در آنجا انرژی الکتریکی را که به واسطه جذب فوتون کسب کرده بودند تخلیه می‌کنند و باعث روشن شدن لامپ در مدار می‌شوند (شکل ٦).



شکل ٦) طرح‌واره سلول خورشیدی و نحوه عملکرد آن.

میزان برقی که سلول‌های خورشیدی تولید می‌کنند مقدار قابل توجهی نیست. اگر ولتاژ دو سر سلول خورشیدی را توسط ولت‌متر اندازه‌گیری کنید خواهید دید که هر سلول حدودا ۰٫۵ ولت ولتاژ تولید می‌کند که مقدار بسیار کمی‌است و کاربردی ندارد. بنابراین، در یک مرحله فراتر، شرکت‌های سازنده پنل سلول‌ها را با یکدیگر به صورت سری متصل کرده تا بتوانند ولتاژ بالاتر تولید کنند. با سری کردن سلول‌ها با یکدیگر پنل‌های خورشیدی یا همان ماژول‌ها تولید می‌شوند که می‌توانند ولتاژهای قابل قبولی را ایجاد کنند (به عنوان مثال محدوده ولتاژی ۲۰ تا ٤۰ ولت). در مرحله بعد برای دستیابی به ولتاژهای بالاتر می‌توان پنل‌ها را با یکدیگر به صورت سری متصل کرد و آرایه‌ها را تشکیل داد. در آرایه‌ها ولتاژهای بالا تولید می‌شوند (از مرتبه چند صد ولت) اما ممکن است نیاز باشد جریان و ولتاژ تولیدی سیستم نیز از آنچه که هست بیشتر شود. بنابراین در مرحله نهایی با قرار دادن آرایه‌ها در کنار یکدیگر می‌توان به ولتاژها و جریان‌های بالاتر دست یافت و یک نیروگاه یا مزرعه خورشیدی احداث کرد (شکل ۷).



شکل ۷) واحدهای مختلف در سیستم‌های فوتوولتاییک.

سلول‌های خورشیدی سیلیکونی انواع مختلفی دارند که به طور کلی می‌توان آنها را به سه دسته مونوکریستال (تک‌کریستال)، پلی‌کریستال (چندکریستال) و آمورف تقسیم کرد. سلول‌های خورشیدی تحت فرایندهای گرمایی ساخته می‌شوند. در این فرایندها دمای سلول خورشیدی طی چندین مرحله افزایش پیدا کرده تا شبکه منظمی‌از اتم‌های سیلیکون تشکیل شود. اگر فرایندهای گرمایی که برای ساخته شدن سلول در نظر گرفته می‌شود فرایندهای بسیار خاص و پیچیده باشد در این حالت سلول

خورشیدی بدست آمده یک شبکه بلوری یکدست وخالص دارد که در آن اتم‌ها به صورت کاملا منظم در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و از این رو به آن تک‌کریستال یا تک‌بلور (یا همان مونوکریستال) می‌گویند. اگر فرایندهای گرمایی که برای ساخته شدن سلول به کار برده می‌شود فرایندهای خیلی خاص و پیچیده‌ای نباشد در این حالت سلول خورشیدی بوجود آمده شده نظم کمتری دارد. این سلول‌ها از چند حوزه تک‌کریستال تشکیل شده‌اند که در کنار یکدیگر قرار گرفته و به یکدیگر متصل هستند. بنابراین از این جهت به این سلول‌ها سلول پلی‌کریستال یا چندکریستال یا چندبلور می‌گویند. سلول‌های مونوکریستال به دلیل شبکه یکدست و نظم بالایی که دارند راندامان بالاتری نسبت به سلول‌های پلی‌کریستال دارند. بازده سلول‌های مونوکریستال حدودا بین ۱۸ تا ۲۰ درصد در نظر گرفته می‌شود در حالی که سلول‌های پلی‌کریستال راندمان حدودا بین ۱۶ تا ۱۸ درصد دارند. نوع دیگری از سلول‌ها وجود دارند که به آنها سلول‌های آمورف می‌گویند. سلول‌های آمورف معمولا روی صفحات منعطف پرینت می‌شوند و از این رو خاصیت انعطاف پذیری دارند. در این سلول‌ها اتم‌ها جایگاه مشخصی ندارد و به صورت نامنظم در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. سلول‌های آمورف چون شبکه منظمی‌ندارند از این رو بازدهی آنها پایین است. بازدهی سلول‌های آمورف حدودا بین ۸ تا ۱۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. ویژگی قابل توجه و کاربردی در سلول‌های خورشیدی آمورف انعطاف پذیر بودن آنهاست که بر روی سطوح منحنی به راحتی می‌توانند نصب و استفاده شوند.

مبانی برق خورشیدی

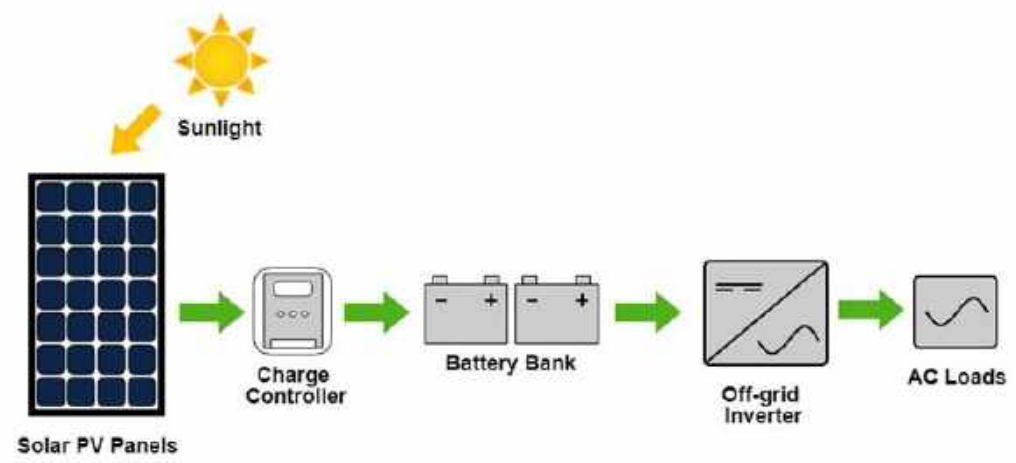
می‌توان گفت تمام پدیده‌هایی که در حوزه برق رخ می‌دهند همگی به بارهای الکتریکی مرتبط می‌شوند. بار الکتریکی خاصیتی است که به الکترون‌ها و پروتون‌ها (ذرات زیراتمی) نسبت داده می‌شود. ذرات باردار طبق این خاصیت به یکدیگر نیرو وارد می‌کنند. به عنوان مثال اگر یک الکترون در کنار یک الکترون دیگر قرار داده شود این دو الکترون به یکدیگر نیروی دافعه وارد می‌کنند. قرارگیری یک الکترون در کنار یک پروتون باعث می‌شود این دو ذره یکدیگر را جذب کنند. وجود همین نیروها و درواقع همان بارهای الکتریکی باعث بوجود آمدن ولتاژ، جریان و ... در سیستم‌های برقی می‌شوند. به عنوان مثال در هر ناحیه‌ای که تجمع بار باشد در آن ناحیه انرژی الکتریکی وجود دارد. ناحیه‌ای با بار الکتریکی منفی انرژی الکتریکی منفی تولید می‌کند و ناحیه‌ای با بار مثبت انرژی الکتریکی مثبت دارد. بین دو ناحیه با انرژی‌های الکتریکی متفاوت (مثبت و منفی) اختلاف پتانسیل الکتریکی وجود دارد (که به عنوان مثال در سلول خورشیدی باعث بوجود آمدن ولتاژ می‌شود). وجود اختلاف پتانسیل نیز می‌تواند باعث حرکت بارهای الکتریکی و ایجاد جریان در مدار گردد. بارهای الکتریکی یا همان الکترون‌ها تحت تاثیر ولتاژ تمایل دارند تا

از ناحیه‌ای با ولتاژ پایین‌تر به ناحیه‌ای با ولتاژ بالاتر حرکت کنند. در اثر حرکت بارها، جریان الکتریکی در مدار ایجاد می‌شود.

در برق واحد اندازه‌گیری بار کولن است، واحد اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل ولت است و جریان را نیز با آمپر بیان می‌کنند. مفهوم دیگری به نام توان الکتریکی نیز در برق وجود دارد که بر حسب وات است و برابر است با مقدار کار انجام شده یا همان مقدار انرژی مصرف شده (یا تولید شده) در واحد زمان. در طراحی یک سیستم خورشیدی حتما باید توان وسیله‌های مصرفی مشخص باشد. چرا که با دانستن آن می‌توان مقدار انرژی مصرفی را در سیستم محاسبه کرد و سیستم خورشیدی را طراحی کرد.

اجزای اصلی سیستم خورشیدی جدا از شبکه

سیستم‌های خورشیدی جدا از شبکه از ٤ جزء اصلی تشکیل شده‌اند. پنل‌ها که وظیفه دارند برق مصرفی را در سیستم خورشیدی تامین کنند، باتری‌ها که بتوانند برق تولیدی پنل را در خود ذخیره کنند، اینورتر که بتواند برق مستقیم باتری را به برق متناوب تبدیل کند و شارژکنترلر یا همان شارژر خورشیدی که باید بین پنل و باتری قرار بگیرد و پروسه شارژ باتری را مدیریت می‌کند (شکل ۸).



شکل ۸) اجزای اصلی سیستم خورشیدی جدا از شبکه.

باتری در سیستم خورشیدی جدا از شبکه

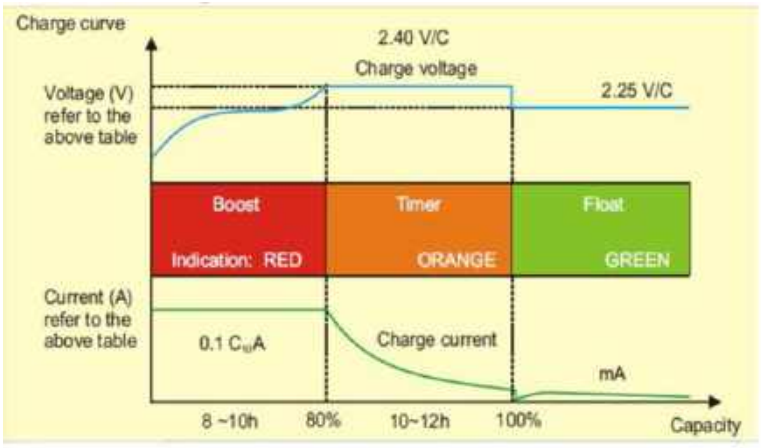
وجود باتری‌ها در سیستم‌های خورشیدی جدا از شبکه کاملا ضروری هست. چرا که ممکن است مصرف‌کننده‌ها در هنگام شب که تابش خورشید وجود ندارد و پنل نیز تولیدی ندارد استفاده شوند. بنابراین باید منبعی وجود داشته باشد تا بتوان برق تولیدی را در آن ذخیره کرد و در مواقعی که پنل تولیدی ندارد یا تولید آن کم است از این منبع استفاده کرد.

باتری‌ها انواع مختلف و تقسیم بندی‌های مختلفی دارند اما می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی قابل شارژ و غیر قابل شارژ تقسیم کرد. به عنوان مثال باتری‌های نیکل-کادمیوم، لیتیوم-یون و باتری‌های سرب اسید (Lead Acid) از نوع باتری‌های قابل شارژ هستند که می‌توانند در سیستم خورشیدی مورد استفاده قرار گیرند. در بخش باتری‌های غیر قابل شارژ نیز می‌توان باتری‌های قلیایی، لیتیومی، جیوه‌ای و باتری‌های سرکه‌ای را نام برد اما از این باتری‌ها در سیستم خورشید نمی‌توان استفاده کرد. چرا که در سیستم خورشیدی باتری در روز باید شارژ شود و شب توسط مصرف کننده تخلیه می‌گردد و نیاز است تا دوباره روز بعد توسط پنل شارژ گردد. بنابراین در سیستم‌های خورشیدی حتما باید از باتری‌های قابل شارژ استفاده شود.

نکته بسیار مهم در مورد باتری‌ها در سیستم خورشیدی طول عمر آنهاست. طول عمر باتری‌ها محدود است و بستگی به عمق تخلیه آنها دارد. طول عمر هر باتری بستگی به این دارد که در هر بار استفاده از باتری چه میزان از شارژ باتری تخلیه می‌شود. هرچقدر میزان تخلیه باتری بیشتر باشد از ظرفیت و کارایی آن بیشتر کاسته می‌شود و طول عمر آن کاهش می‌یابد. بنابراین در سیستم‌های خورشیدی باید راهکاری اتخاذ شود که باتری بیش از حد تخلیه نگردد.

شارژکنترلر در سیستم خورشیدی جدا از شبکه

به دلیل وجود باتری در سیستم خورشیدی جدا از شبکه وجود شارژکنترلر نیز در این سیستم ضرورت دارد. شارژکنترلرها همانطور که از نامشان پیداست و در بالا نیز بدان اشاره شد وظیفه مدیریت و کنترل شارژ باتری را در سیستم خورشیدی بر عهده دارند. برای اینکه باتری را توسط پنل شارژکرد می‌توان پنل را مستقیم به باتری متصل کرد اما این کار باعث می‌شود پنل به باتری آسیب وارد کند و از طول عمر آن می‌کاهد. همانطور که شکل ۹ نشان می‌دهد فرایند شارژ باتری از چند مرحله مختلفت تشکیل شده است و در هر مرحله باتری باید با ولتاژ و جریان مشخصی شارژ شود. در مرحله boost که ۸۰ درصد پروسه شارژ باتری را شامل می‌شود، باتری باید با جریان بالا شارژ شود. مرحله bulk نیاز به جریان کمتر و ولتاژ بیشتر دارد و در مرحله پایانی نیز هنگامی‌که باتری کاملا پر شد جریان ورودی به سمت باتری باید قطع گردد. در صورتی که پنل مستقیما به باتری متصل شود عملیات شارژباتری به درستی انجام نمی‌شود و باتری آسیب می‌بیند چرا که ولتاژ و جریان تولیدی پنل ثابت نیست و با تغییر شدت تابش نور خورشید تغییر می‌کند. بنابراین وجود وسیله‌ای به نام شارژکنترلر بین باتری و پنل کاملا ضروری است تا با تغییر و تنظیم ولتاژ و جریان پنل، باتری را به روش صحیح و مناسب شارژکند.



شکل ۹) مراحل مختلف شارژ باتری.

اینورتر در سیستم خورشیدی جدا از شبکه

در سیستم خورشیدی برق تولیدی پنل‌ها برق مستقیم یا همان برق dc است. باتری‌ها که در سیستم خورشیدی استفاده می‌شوند نیز برق مستقیم تولید می‌کنند، این در حالی است که مصرف‌کننده‌های ما در منزل عمدتا مصرف‌کننده‌های ac هستند و نمی‌توان آنها را مستقیما به باتری یا پنل متصل کرد. بنابراین وجود مبدلی که بتواند برق dc را به ac تبدیل کند در سیستم خورشیدی کاملا ضروری است. مبدل‌هایی که چنین کاری را انجام می‌دهند اینورتر نام دارند. اینورترها در سیستم خورشیدی جدا از شبکه به باتری‌ها متصل می‌شوند و در خروجی برق متناوب با ولتاژ ۲۲۰ ولت (یا ۱۱۰ ولت) و فرکانس ۵۰ هرتز (یا ۶۰ هرتز) تولید می‌کنند. با متصل کردن اینورتر به سیستم خورشیدی می‌توان خروجی مناسب را دریافت کرد و وسیله‌های مصرفی ac را توسط آن روشن کرد.

اینورترها در حالت کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند، اینورترهای متصل به شبکه و اینورترهای جدا ازشبکه. دسته اول اینورترهایی هستند که در سیستم خورشیدی متصل به شبکه قرار می‌گیرند و برق dc پنل‌ها را به برق ac همفاز و هم ولتاژ با شبکه تبدیل کرده و آن را به شبکه تزریق می‌کنند. به این اینورترها اینورترهای متصل به شبکه می‌گویند که آنها نیز خود به دو دسته "با قابلیت ذخیره‌سازی انرژی" و "بدون قابلیت ذخیره‌سازی انرژی" تقسیم می‌شوند. اینورترهای با قابلیت ذخیره‌سازی انرژی می‌توانند به باتری متصل شده و بخشی از انرژی تولیدی را در باتری ذخیره کنند در حالی که اینورترهای بدون قابلیت ذخیره‌سازی این امکان را ندارند.

دسته دوم اینورترهای جدا از شبکه هستند که در سیستم خورشیدی جدا از شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند و از این رو به آنها اینورترهای جدا از شبکه می‌گویند. همانطور که قبلا نیز به آن اشاره شد، این اینورترها در سیستم خورشیدی جدا از شبکه به باتری متصل شده و برق dc باتری را به برق ac تبدیل می‌کنند. اینورترهای جدا از شبکه نیز خود به دو دسته اینورترهای شبه‌سینوسی و اینورترهای

تمام‌سینوسی تقسیم می‌شوند. این اینورترها با توجه به نوع وسیله مصرف‌کننده در سیستم خورشیدی تعیین می‌شوند. اینورترهای تمام‌سینوسی برای وسیله‌های حساس به کیفیت موج به کار برده می‌شوند در حالی که در اینورترهای شبه‌سینوسی کیفیت موج اهمیت چندانی ندارد.

روند محاسباتی طراحی سیستم خورشیدی جدا از شبکه (Off-Grid)

طراحی سیستم خورشیدی جدا از شبکه روند محاسباتی مشخصی دارد. با مشخص بودن اطلاعات مصرف‌کننده‌ها (توان و مدت زمان مصرف) می‌توان انرژی مصرفی را تعیین کرد. با توجه به اینکه مصرف‌کننده‌ها قرار است در شب نیز روشن بمانند بنابراین در مرحله بعد باید برای سیستم باتری با ظرفیت مناسب نیز مشخص شود. سپس با در نظر گرفتن انرژی مصرفی و ظرفیت باتری‌ها و همچنین با توجه میزان تابش خورشید در شبانه‌روز می‌توان مقدار و تعداد پنل مورد نیاز برای تولید انرژی را مشخص کرد. در مرحله پایانی نیز پس از مشخص شدن مقدار باتری و پنل و توان وسیله‌های مصرفی، شارژکنترلر و اینورتر مناسب نیز انتخاب می‌گردد.

برای طراحی سیستم خورشیدی جدا از شبکه باید مراحل زیر به ترتیب طی شوند:

۱) محاسبه مجموع انرژی مصرفی و مجموع توان

قدم اول در طراحی سیستم خورشیدی جدا از شبکه محاسبه انرژی مصرفی است.

با در دست داشتن توان مصرفی دستگاه (p) بر حسب وات و مدت زمان استفاده (مدت زمان روشن بودن دستگاه) بر حسب ساعت و با استفاده از رابطه‌ی $E = P \times t$ ابتدا انرژی مصرفی را محاسبه می‌کنیم.

مجموع توان نیز در این قسمت محاسبه می‌شود که برابر است با جمع توان تک‌تک وسیله‌ها.

۲) محاسبه مقدار باتری:

پس از محاسبه انرژی مصرفی نوبت به محاسبه مقدار باتری است که باید در سیستم خورشیدی قرار گیرد و مسولیت ذخیره انرژی تولید شده توسط پنل‌ها و تغذیه مصرف‌کننده‌ها را بر عهده دارد.

همانطور که می‌دانید ظرفیت باتری‌ها بر حسب آمپرساعت بیان می‌شود. این در حالی است که مقدار انرژی مصرفی که در مرحله قبل محاسبه شد بر حسب وات‌ساعت بدست می‌آید. برای تبدیل وات‌ساعت به آمپرساعت نیاز است تا مقدار انرژی مصرفی بدست آمده بر حسب وات‌ساعت را بر ولتاژ باتری (که ۱۲ ولت است) تقسیم کنیم. در این مرحله مقدار باتری مورد نیاز بر حسب آمپرساعت بدست می‌آید، اما هنوز یک نکته دیگر در مورد باتری‌ها باقیست. همانطور که در بالا به آن اشاره شد اگر باتری‌ها به طور کامل تخلیه شوند از عمر آنها به شدت کاسته می‌شود، بنابراین مقدار باتری در سیستم خورشیدی باید بیشتر از آنچه که مورد

نیاز است در نظر گرفته شود تا همواره بخشی از باتری‌ها پس از استفاده پر بمانند و تاثیر منفی شدید بر طول عمر آنها نداشته باشد.

۳) محاسبه مقدار پنل:

پس از اینکه مقدار باتری در سیستم مشخص شد، نوبت به محاسبه مقدار پنل است. مقدار پنل در سیستم خورشیدی باید طوری باشد که بتواند در طول یک شبانه‌روز (که فقط ۵ ساعت تابش مفید برای آن در نظر گرفته می‌شود) برق مورد نیاز برای شارژ باتری را تولید کند. بنابراین پنل باید بتواند به اندازه ظرفیت باتری برق تولید کند. با تبدیل ظرفیت باتری به وات‌ساعت، انرژی تولیدی پنل بر حسب وات‌ساعت مشخص می‌شود. با استفاده از این مقدار و با در نظر گرفتن ساعت تابش مفید ایران (۵ ساعت) می‌توان به راحتی توان و تعداد پنل مورد نیاز را بدست آورد.

٤) تعیین نحوه چیدمان (آرایش) باتری‌ها و پنل‌ها

مرحله چهارم مربوط می‌شود به تعیین آرایش باتری‌ها و پنل‌ها. ممکن است در یک سیستم خورشید از چندین باتری و چندین پنل به صورت همزمان استفاده شود. باتری‌ها می‌توانند به صورت سری یا موازی و یا ترکیب سری-موازی به یکدیگر متصل شوند. همچنین پنل‌ها نیز به همین شکل می‌توانند آرایش سری یا موازی و یا ترکیب سری-موازی داشته باشند.

آرایش باتری‌ها در سیستم خورشدی باید طوری باشد که ولتاژنهایی مجموعه باتری‌ها ۱۲، ۲٤ یا ٤۸ ولت شود. یعنی از ترکیب سری-موازی در اتصال باتری‌ها باید طوری استفاده شود که یکی از این ولتاژها حاصل گردد. آرایش پنل‌ها نیز درست مثل آرایش باتری‌ها مهم است. در یک سیستم خورشیدی که ممکن است چندین پنل داشته باشد، باید پنل‌ها را طوری به یکدیگر متصل کرد که بتوانند با بالاترین عملکرد باتری‌ها را شارژکنند. شرط لازم برای شارژشدن باتری‌ها توسط پنل این است که ولتاژتولیدی پنل‌ها از ولتاژمجموعه باتری‌ها بیشتر باشد تا پنل بتواند به سمت باتری جریان فرستاده و باتری را در سیستم خورشیدی شارژکند.

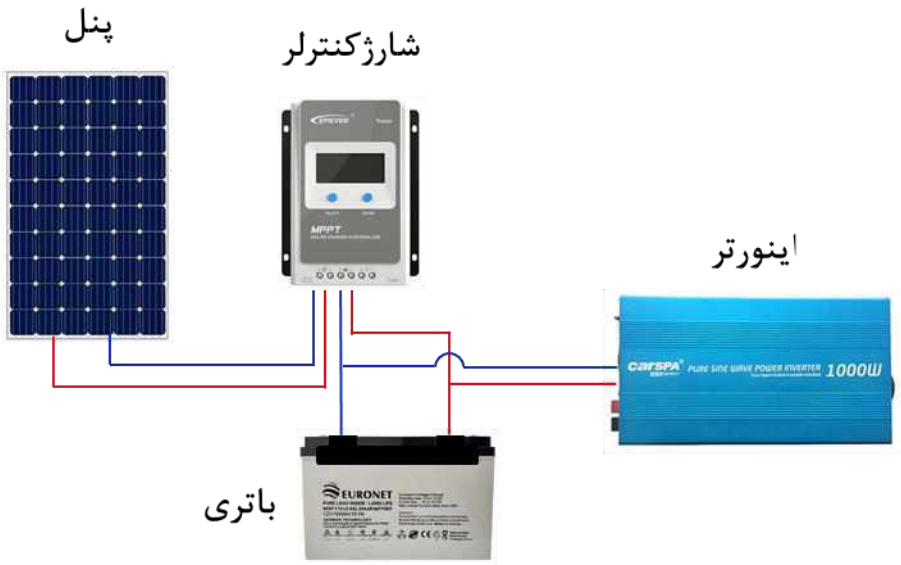
۵) انتخاب شارژکنترلر مناسب

در مرحله نهایی پس از مشخص شدن توان مصرفی و مقدار باتری و پنل و همچنین آرایش باتری‌ها و پنل‌ها، اقدام به انتخاب شارژکنترلر و اینورتر می‌نماییم. همانطور که قبلا بیان شد شارژکنترلر در سیستم خورشیدی بین پنل و باتری‌ها قرار می‌گیرد و به همین دلیل از سمت پنل و باتری با محدودیت‌هایی مواجه است. در انتخاب شارژکنترلر چهار محدودیت وجود دارد که سه تای آن از سمت پنل و یکی از سمت باتری است. محدودیت از سمت باتری برابر است با ولتاژ باتری و محدودیت از سمت پنل برابر است با جریان، توان و ولتاژپنل. بنابراین در انتخاب شارژکنترلر باید هر چهار محدودیت عنوان شده به طور همزمان برقرار باشند.

٦) انتخاب اینورتر مناسب

انتخاب اینورتر نیز درست مانند شارژکنترلر محدودیت‌هایی دارد. اینورتر از طرفی به باتری متصل می‌شود، بنابراین باید بتواند ولتاژ باتری را قبول کند و از طرفی نیز مصرف‌کننده‌ها به آن متصل می‌شوند بنابراین باید بتواند توان مصرفی مصرف‌کننده‌ها را هنگامی‌که وسیله‌ها روشن هستند در اختیار آنها قرار دهد. با در دست داشتن ولتاژ باتری‌ها و توان مصرف‌کننده‌ها که در مراحل قبلی مشخص شدند به راحتی می‌توان اینورتر مناسب را برای سیستم خورشیدی در نظر گرفت.

شکل ۱۰ طرح‌واره کلی سیستم خورشیدی جدا از شبکه و نحوه اتصالات آنها به یکدیگر را نشان می‌دهد.



شکل ۸) طرح‌واره کلی سیستم خورشیدی جدا از شبکه و نحوه اتصال اجزای آن به یکدیگر.