

بررسی تلفات اشباع اینورتر بر راندمان نیروگاه‌های فتوولتائیک

عدنان رجائیان^۱ روح الامین زینلی داورانی^۲ عرفان رجائیان^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته- کرمان- ایران

Adnanrajaeyan@yahoo.com

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته- کرمان- ایران

R.zeinali@kgut.ac.ir

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته- کرمان- ایران

Erfanrajaeyan@yahoo.com

چکیده: اینورتر یکی از اجزای اصلی نیروگاه‌های فتوولتائیک می‌باشد. از آنجایی که توان خروجی نیروگاه با عملکرد اینورتر رابطه مستقیم دارد، تلفات اینورتر در تولید و بهره‌وری نیروگاه بسیار تاثیرگذار است. اینورتر دارای تلفات متعددی بوده که مهمترین آن‌ها تلفات اشباع اینورتر و تلفات راندمان اینورتر می‌باشد. از جمله عوامل اثرگذار بر تلفات اشباع و راندمان اینورتر می‌توان به ارتفاع از سطح دریا، دمای محیط، میزان توان DC ورودی، سرعت باد، چگالی هوا، تشعشع و ... اشاره داشت. به دلیل پتانسیل تابشی بالا، گستردگی مساحت و وجود تنوع اقلیمی زیاد استان کرمان، در این مقاله این استان به عنوان یکی از مناطق مستعد جهت نصب نیروگاه‌های فتوولتائیک انتخاب شده و تاثیر عوامل محیطی بر تلفات اشباع و راندمان اینورتر در مناطق مختلف آن شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی تأثیر عوامل متعددی از جمله سرعت باد، تشعشع، ارتفاع از سطح دریا، دمای محیط، تلفات اجزای مختلف نیروگاه، مصرف برق اینورتر در طول عملیات، مصرف برق اینورتر در شب، تلفات سایه، گردوغبار، تلفات ناشی از مازول فتوولتائیک، تلفات ناشی از عدم هماهنگی مازول‌ها و تلفات سیم‌کشی AC در نظر گرفته شده است. همچنین تأثیر میزان ضریب نسبت تبدیل DC به AC اینورتر بر تلفات اشباع اینورتر، توان تولیدی نیروگاه و ضریب ظرفیت نیروگاه بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: تشعشع، تلفات اشباع اینورتر، تلفات راندمان اینورتر، نسبت تبدیل DC به AC، نیروگاه فتوولتائیک

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۶/۲۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۴/۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۶/۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر روح الامین زینلی داورانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - کرمان - انتهای اتوبان هفت باغ علوی - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

کاربرد عمده سیستم‌های انرژی خورشیدی به‌عنوان منبع انرژی متصل به شبکه برق می‌باشد. از دیگر کاربردهای انرژی خورشیدی می‌توان به پمپ‌های آب خورشیدی، استفاده از انرژی خورشیدی در دکل‌های مخابراتی (بخصوص در مناطق دورافتاده)، استفاده از انرژی خورشیدی در ریز شبکه‌ها و شبکه‌های هوشمند و ... اشاره کرد [۱۰،۹].

همان‌طور که بیان شد انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌ویژه انرژی خورشیدی در سید انرژی کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه جایگاه ویژه‌ای یافته است. کشور ایران به دلیل برخورداری از موقعیت جغرافیایی مناسب و داشتن میانگین ۳۰۰ روز آفتابی در سال، مکان مناسبی جهت سرمایه‌گذاری در زمینه انرژی فتوولتائیک است. همان‌طور که در مرجع [۱۱] نشان داده شده است، استان کرمان در میان ۵ استان برتر کشور از لحاظ پتانسیل تولید انرژی خورشیدی می‌باشد. این موضوع سبب شده است که تاکنون حدود ۲۰ مگاوات نیروگاه خورشیدی در استان کرمان به بهره‌برداری برسد و همچنین، چندین نیروگاه دیگر نیز در حال احداث باشد [۱۲]. با توجه به هزینه‌های بالای احداث نیروگاه خورشیدی، افزایش راندمان این نیروگاه‌ها از اهمیت به‌سزایی برخوردار می‌باشد. یکی از موارد اثرگذار بر میزان توان یک نیروگاه خورشیدی راندمان اینورتر مورد استفاده در نیروگاه می‌باشد. با توجه به اینکه عملکرد اینورتر به موقعیت مکانی نصب نیروگاه وابسته است، لذا در این مقاله اثر عملکرد اینورتر بر راندمان یک نیروگاه خورشیدی در تمامی شهرهای استان کرمان مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور بر مبنای موقعیت جغرافیایی و اطلاعات هواشناسی و با استفاده از نرم‌افزارهای System Advisor Model و Meteonorm، یک نیروگاه فتوولتائیک ۱۰ مگاوات در تمام شهرهای استان کرمان طراحی شده است. در شبیه‌سازی تأثیر عوامل نظیر سرعت باد، ارتفاع از سطح دریا، تشعشع، دمای محیط، تلفات ناشی از ماژول فتوولتائیک، تلفات دیود، تلفات ناشی از خطوط انتقال dc و ac، تلفات ناشی از سایه، تلفات اینورتر و ... بر عملکرد مزارع فتوولتائیک در نظر گرفته شده است. در ادامه، ابتدا در بخش ۲ نحوه مدل‌سازی نیروگاه فتوولتائیک شرح داده می‌شود. در بخش ۳ و ۴ یک مزرعه ۱۰ مگاوات شبیه‌سازی و در شرایط مختلف اثر تلفات اشباع اینورتر بر راندمان نیروگاه بررسی شده است. در انتها در بخش ۵ نتیجه‌گیری مقاله ارائه می‌گردد.

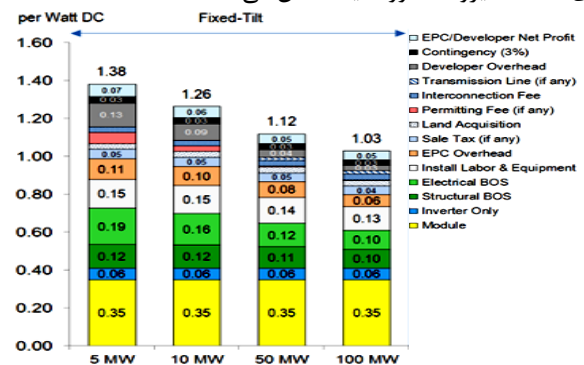
۲- مدل‌سازی نیروگاه فتوولتائیک

پنل فتوولتائیک در شرایط استاندارد می‌تواند، توان نامی خود را تولید کند. شرایط استاندارد شرایطی است که در آن تشعشع خورشید برابر ۱ کیلووات بر مترمربع، دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و جرم هوا برابر AM ۱/۵ باشد. اما در عمل سلول‌های فتوولتائیک تحت شرایط استاندارد کار نمی‌کنند و تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرند. ماکزیمم توان پنل بر اساس رابطه (۱) بیان می‌گردد [۱۳].

با توجه به رشد تقاضای انرژی [۱] و افزایش اهمیت محیط‌زیست، تحقیقات و تکنولوژی‌هایی که جایگزین منابع تجدیدناپذیر و سوخت‌های فسیلی آلاینده می‌باشند روزبه‌روز گسترده‌تر می‌شوند. در حال حاضر اغلب سیستم‌های انرژی در دنیا مبتنی بر سوخت‌های فسیلی می‌باشند. این در حالی است که سوخت‌های فسیلی غیرقابل بازیافت بوده و به‌طور مستقیم گازهای گلخانه‌ای را به محیط‌زیست وارد می‌کنند [۲]. این قضیه منجر به وارد شدن اثرات مخرب جدی به محیط‌زیست و سلامت عمومی جامعه شده است. در کنار این مسائل موضوع نوسانات قیمت سوخت‌های فسیلی نیز تأثیر مستقیم بر قیمت و امنیت انرژی داشته است [۳]. این مباحث سبب شده است تا کشورهای جهان با مسائل مربوط به انرژی برخوردی متفاوت داشته باشند که در این میان، جایگزینی انرژی‌های فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی‌های آبی، خورشیدی، بادی، زیست‌توده و زمین‌گرمایی با استقبال فراوانی روبرو شده است [۴،۵]. پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که تا سال ۲۰۴۰ انرژی‌های تجدیدپذیر با تأمین ۳۴ درصد از کل انرژی موردنیاز دنیا به بزرگ‌ترین منبع انرژی تبدیل می‌شوند [۶].

در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از انرژی خورشیدی با استقبال فراوانی روبرو شده است. انرژی خورشیدی عظیم‌ترین منبع انرژی در جهان است. این انرژی پاک، ارزان و بی‌پایان بوده و در بیشتر مناطق کره زمین قابل دسترس می‌باشد. در سال‌های اخیر انرژی خورشیدی در مقایسه با دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر بالاترین نرخ رشد را به دست آورده و نصب سیستم‌های فتوولتائیک و تحقیقات مرتبط با آن، به سرعت در حال افزایش است. برخی از تحلیلگران بازار انتظار دارند که نصب سیستم‌های فتوولتائیک تا سال ۲۰۵۰ به ۲۵ درصد از تولید کل انرژی موردنیاز جامعه برسد [۷].

با توجه به ظرفیت نیروگاه فتوولتائیک احداث شده، هزینه اولیه آن متغیر می‌باشد و هرچه ظرفیت آن بیشتر باشد، هزینه تولید انرژی کمتر می‌گردد. شکل (۱) هزینه تولید هر وات انرژی را برای ظرفیت‌های مختلف نیروگاه فتوولتائیک نشان می‌دهد.



شکل (۱): هزینه تولید هر وات انرژی در ظرفیت‌های مختلف نیروگاه

فتوولتائیک [۸]

معمول ضریب انباشت برای سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بین ۷۰ تا ۷۵ درصد لحاظ می‌شود.

اگر تشعشع (G) بر سطح ماژول فتوولتائیک عمود نباشد (زاویه تابش بر سطح ماژول، صفر نباشد)، میزان تشعشع بر اساس زاویه تابش تغییر می‌کند و طبق رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$G' = G \times \cos(\theta) \quad (7)$$

که در آن، G' میزان تشعشع بر سطح ماژول در شرایطی است که زاویه تابش بر سطح آن صفر نباشد. θ زاویه بین یک اشعه از خورشید و خط عمود بر سطح پنل است. زاویه تابش را می‌توان با استفاده از رابطه (۸)، محاسبه نمود.

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \theta_z + \sin \beta \sin \theta_z \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (8)$$

که در آن β شیب صفحه پنل نسبت به سطح زمین^۱، γ زاویه پنل نسبت به محور جنوب، θ_z زاویه سمت^۲ و γ_s زاویه آزیموت^۳ خورشید است. γ_s از جهت جنوب اندازه‌گیری می‌شود و در بعدازظهرها مثبت و قبل از ظهرها منفی است. زاویه سمت خورشید، از رابطه (۹)، محاسبه می‌شود.

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (9)$$

که در آن δ زاویه انحراف^۴، ϕ عرض جغرافیایی^۵ و ω زاویه ساعت^۶ است. زاویه انحراف و زاویه ساعت به ترتیب از رابطه (۱۰) و رابطه (۱۱) محاسبه می‌شوند.

$$\delta = 23.45 \frac{\pi}{180} \sin \left(2\pi \left(\frac{284+n}{365.25} \right) \right) \quad (10)$$

$$\sin \omega = \frac{\sin \alpha \cdot \sin \delta \cdot \sin \phi}{\cos \delta \cdot \cos \phi} \quad (11)$$

که در آن‌ها، α زاویه ارتفاع^۱ خورشید و n شماره روز سال بر اساس تاریخ میلادی است و میزان آن برای اول ژانویه یک می‌باشد. در مزارع فتوولتائیک با تعداد بیش از یک ستون از آرایه‌های خورشیدی، دو مدل سایه بر روی پنل‌ها ممکن است ایجاد شود. در مدل اول، پهنای آرایه‌ها (W) از فاصله بین ستون‌های آرایه‌ها (C_w) کمتر است و احتمال بروز سایه تنها در یک سمت از آرایه وجود خواهد داشت. طبق مرجع [۱۵]، در این حالت، در صورت برابر بودن شیب صفحات و زاویه نصب نسبت به جنوب، فرم سایه ایجادشده مستطیل شکل خواهد بود.

ابعاد سایه ایجادشده در این حالت از معادله (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$W_s = W - (D + A \cos \beta) \times \frac{\sin \beta |\sin(\gamma_s - \gamma_c)|}{\tan \alpha \cdot \cos \beta + \sin \beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma_c)} \quad (12)$$

$$H_s = A \left\{ 1 - \frac{D + A \cos \beta}{\frac{A \sin \beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma_c)}{\tan \alpha} + A \cos \beta} \right\} \quad (13)$$

$$P_{\max} = FF \times I_{sc}(G) \times V_{oc}(T_c) \quad (1)$$

که در آن P_{\max} حداکثر توانی است که توسط سلول تولید می‌شود. $I_{sc}(G)$ و $V_{oc}(T_c)$ به ترتیب جریان اتصال کوتاه^۱ در تشعشع G و ولتاژ مدار باز^۲ سلول در دمای سلول می‌باشند. همچنین FF ضریب انباشت^۳ بوده و جهت مشخص نمودن عملکرد سلول خورشیدی استفاده می‌شود. $I_{sc}(G)$ و $V_{oc}(T_c)$ به ترتیب بر اساس رابطه (۲) و رابطه (۳) محاسبه می‌گردند.

$$I_{sc}(G) = I_{sc,STC} \times \frac{G}{G_{STC}} \times (1 + \alpha(T_c - T_{STC})) \quad (2)$$

$$V_{oc}(T_c) = V_{oc,STC} \times (1 + \beta(T_c - T_{STC})) \times \left[\ln \left(\frac{G}{G_c} + 1 \right) \times C_V - C_R \times G \right] \quad (3)$$

در این روابط G تشعشع خورشید و G_{STC} میزان تشعشع در شرایط استاندارد بوده و مقدار آن برابر با ۱۰۰۰ وات بر مترمربع است. $I_{sc,STC}$ و $V_{oc,STC}$ به ترتیب جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدارباز ماژول در شرایط استاندارد می‌باشند. T_c دمای سلول و T_{STC} دما در شرایط استاندارد بوده و برابر با ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین α و β به ترتیب ضریب کاهش جریان و ضریب افت ولتاژ در اثر افزایش دما می‌باشند. ضرایب C_V ، C_R و C_G ضرایب اصلاحی معادله ولتاژ بوده و به ترتیب برابر با $2/514 \times 10^{-3}$ ، $1/593 \times 10^{-2}$ و $1/0.88 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{w}$ در نظر گرفته می‌شوند.

برای محاسبه درجه حرارت سلول، ابتدا طبق رابطه (۴) درجه حرارت پشت صفحه ماژول (T_{Back}) بر اساس تابش خورشید، ضرایب a و b، دمای محیط و سرعت باد محاسبه می‌شود [۱۴].

$$T_{Back} = G \cdot e^{a+b \cdot V_{wind}} + T_{Ambient} \quad (4)$$

که در آن $T_{Ambient}$ دمای محیط، V_{wind} سرعت باد، G تابش خورشید، ضریب a حد بالا در دمای ماژول که در سرعت باد کم و سطوح بالای تابش خورشید تعریف می‌شود و ضریب b بیانگر نرخ کاهش دمای ماژول فتوولتائیک بر اساس افزایش سرعت باد است. درنهایت با استفاده از رابطه (۵) دمای سلول (T_c) بر اساس دمای پشت صفحه ماژول، تابش خورشید و dT محاسبه می‌شود.

$$T_c = T_{Back} + (G / G_{STC}) \times dT \quad (5)$$

که در آن T_{Back} حرارت پشت صفحه ماژول و dT تفاوت دما بین سلول و سطح پشتی ماژول در تابش مرجع 1000 w/m^2 است.

همچنین FF که در رابطه (۱) بیان شد، دارای مقدار ثابتی برای هر سلول مشخص بوده و طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc,STC} \times I_{sc,STC}} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، V_{mp} و I_{mp} به ترتیب ماکزیمم ولتاژ و ماکزیمم جریان در نقطه ماکزیمم توان خروجی، $V_{oc,STC}$ و $I_{sc,STC}$ به ترتیب ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه در شرایط استاندارد هستند. بطور

که در آن‌ها، γ_s و α به ترتیب زاویه عرضی و طولی خورشید در آسمان و γ_c زاویه نصب صفحات نسبت به خط واصل بین دو قطب است. همچنین D فاصله بین آرایه‌ها و β شیب نصب آن‌ها است. W و A نیز طول و عرض آرایه‌ها و W_s و H_s به ترتیب طول و عرض سایه ایجاد شده می‌باشند.

در مدل دوم پهنای آرایه‌ها (W) از فاصله بین ستون‌های آرایه‌ها (C_w) بیشتر است. در این حالت با توجه به کم بودن فاصله بین ستون‌های نصب آرایه‌ها احتمال بروز سایه در دو سوی آرایه پشتی وجود دارد. این مدل از سایه در اثر آرایه‌های ردیف جلویی واقع در ستون آرایه و ستون‌های مجاور آن ایجاد می‌شود. در این حالت ارتفاع سایه‌های ایجاد شده در دو سوی آرایه با یکدیگر برابر بوده و از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود. پهنای سایه واقع شده در سمت مخالف محل خورشید در آسمان نسبت به ظهر محلی با توجه به رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود. پهنای سایه ایجاد شده در سمت قرارگیری خورشید در آسمان (W'_s) از رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد.

$$W'_s = \frac{(D + A \cos \beta) \sin \beta |\sin(\gamma_s - \gamma_c)|}{\tan \alpha \cdot \cos \beta + \sin \beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma_c)} - C_w \quad (14)$$

در نهایت با توجه به نوع سایه و سطح سایه ایجاد شده بر روی پنل میزان توان تولیدی پنل کاهش خواهد یافت.

توان DC تولید شده توسط پنل‌ها با استفاده از اینورتر به توان AC تبدیل شده و به مصرف کننده تحویل داده می‌شود. نسبت تبدیل DC به AC در اینورتر، از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$\text{نسبت تبدیل DC به AC} = \frac{\text{کل توان DC تولید شده توسط پنلها}}{100} \quad (15)$$

در نهایت جهت ارزیابی راندمان نیروگاه خورشیدی با توجه به انرژی خالص تولیدی سالیانه و ظرفیت نیروگاه فتوولتائیک احداث شده، ضریب ظرفیت^{۱۱} نیروگاه از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$\text{ضریب ظرفیت} = \frac{\text{انرژی خالص سالیانه (کیلووات ac سال)}}{\text{ظرفیت نیروگاه (کیلو ولت آمپر ac) * ۸۷۶۰ (ساعت سال)}} \quad (16)$$

۳- شبیه‌سازی نیروگاه فتوولتائیک

با استفاده از نرم‌افزار (SAM) System Advisor Model و Meteornorm یک مزرعه ۱۰ مگاوات در مناطق مختلف استان کرمان شبیه‌سازی شده است.

نرم‌افزار قدرتمند SAM یک روش دقیق و کاربردی برای طراحی و تجزیه و تحلیل انواع انرژی‌های نو است. این نرم‌افزار قابلیت شبیه‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک، بادی، زیست‌توده، زمین‌گرمایی، آبگرم کن‌های خورشیدی، و ... را دارا می‌باشد [۱۶]. این نرم‌افزار دارای

قابلیت انتخاب انواع ماژول‌های فتوولتائیک از جمله مونوکریستال، پلی کریستال و ... می‌باشد. همچنین اینورترهای متنوعی جهت استفاده در شبیه‌سازی وجود خواهد داشت. از قابلیت‌های مهم این نرم‌افزار این است که در صورت موجود نبودن ماژول یا اینورتر مورد نظر، می‌توان آن را به صورت دستی به محیط نرم‌افزار اضافه نمود. در شبیه‌سازی توسط SAM می‌توان تأثیر عوامل متعددی از جمله سایه، سرعت باد، تشعشع، ارتفاع از سطح دریا، برف، دمای محیط، تلفات دیود و اتصالات، تلفات سیم‌کشی DC و AC، مصرف برق اینورتر، مصرف اینورتر در شب، تلفات آلودگی و گردوغبار، تلفات ناشی از عدم هماهنگی ماژول‌ها، راندمان اینورتر و ... را لحاظ نمود. از قابلیت‌های دیگر این نرم‌افزار توانایی برقراری ارتباط با دیگر نرم‌افزارها همچون نرم‌افزار Meteornorm می‌باشد. در این پژوهش داده‌های هواشناسی توسط نرم‌افزار Meteornorm ایجاد شده و به نرم‌افزار SAM منتقل شده است. نرم‌افزار Meteornorm ابزاری بسیار قدرتمند و معتبر جهت ایجاد اطلاعات اقلیمی مناطق مختلف می‌باشد. این نرم‌افزار مجهز به اطلاعات ۸۳۵۰ ایستگاه هواشناسی در مناطق مختلف و ۵ عدد ماهواره می‌باشد [۱۷]. لازم به ذکر است که تراکم ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده این نرم‌افزار در کشور ایران و کشورهای حاشیه خلیج فارس بسیار زیاد و مطلوب است. از ویژگی‌های مهم Meteornorm اطلاعات آنلاین برنامه است که جدیدترین اطلاعات هواشناسی اقلیم مورد نظر را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. همچنین کاربران قادر خواهند بود تاریخچه اطلاعات یک منطقه جغرافیایی خاص را در گذر زمان مشاهده کنند. این نرم‌افزار اطلاعات هواشناسی را در بازه‌های زمانی دقیقه، ساعت، روز، ماه و ... در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

مشخصات پنل مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است. همچنین برای تبدیل ولتاژ DC به AC از اینورتر مدل Power Electronics: FS1 100CU1503 600v [CEC 20018] استفاده شده است. جدول (۲) اطلاعات مربوط به اینورتر مورد استفاده را بیان می‌کند. شکل‌های (۲) و (۳) نحوه پیکربندی نیروگاه را نشان می‌دهند.

جدول (۱): مشخصات ماژول فتوولتائیک مورد استفاده.

مشخصه	مقدار
راندمان نامی	20.5763 %
بیشینه توان (P_{mp})	444.682 wdc
V_{mp}	76.7 vdc
I_{mp}	5.8 Adc
V_{oc}	90.5 vdc
I_{sc}	6.2 Adc
دمای عملکرد عادی سلول	44.5 °C
مساحت ماژول	2.162 m ²
تعداد سلولها	128

Modules		Inverters		Sizing messages (see Help for details):	
Nameplate capacity	10,000.012 kWdc	Total capacity	8,235.108 kWac	Actual DC/AC ratio is 1.21.	
Number of modules	22,488	Total capacity	8,360.170 kWdc		
Modules per string	12	Number of inverters	7		
Strings in parallel	1,874	Maximum DC voltage	1,200.0 Vdc		
Total module area	48,619.1 m ²	Minimum MPPT voltage	849.0 Vdc		
String Voc	1,086.0 V	Maximum MPPT voltage	1,200.0 Vdc		
String Vmp	920.4 V	Battery maximum power	0.000 kWdc		

Voltage and capacity ratings are at module reference conditions shown on the Module page.

شکل (۲): تعداد و ظرفیت پنل و اینورتر مورد استفاده

	Subarray 1	Subarray 2	Subarray 3	Subarray 4
	<input type="button" value="Edit shading..."/>	<input type="button" value="Edit shading..."/>	<input type="button" value="Edit shading..."/>	<input type="button" value="Edit shading..."/>
Number of modules along side of row	4	4	4	4
Number of modules along bottom of row	47	36	36	36
Number of rows	30	39	39	39
Modules in subarray from System Design page	5,640	5,616	5,616	5,616
Self shading	Standard (Non-line)	Standard (Non-line)	Standard (Non-line)	Standard (Non-line)
Module orientation	Portrait	Portrait	Portrait	Portrait
Length of side (m)	7.66853	7.66853	7.66853	7.66853
GCR from System Design page	0.325	0.325	0.325	0.325
Row spacing estimate (m)	23.5955	23.5955	23.5955	23.5955

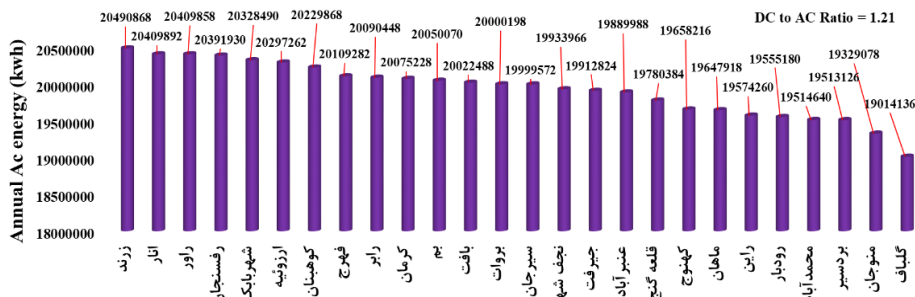
شکل (۳): نحوه ساختار آرایه‌ها در نیروگاه فتوولتائیک

۴- نتایج شبیه‌سازی

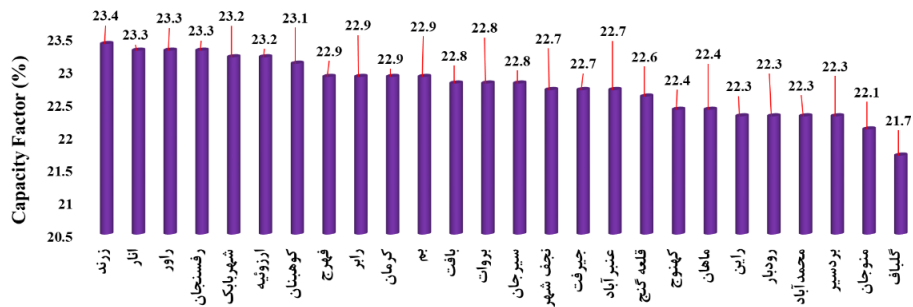
همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، در ابتدا تعداد ۷ اینورتر برای تبدیل توان DC پنل‌ها به توان AC در نظر گرفته و لذا با توجه به ظرفیت نامی مجموع پنل‌ها و اینورترها نسبت تبدیل DC به AC برابر با ۱/۲۱ بدست می‌آید. برای این نسبت تبدیل، میزان توان AC خروجی نیروگاه فتوولتائیک و میزان ضریب ظرفیت آن در مناطق مختلف استان کرمان، به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. همچنین تلفات ناشی از سایه در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۶) مشخص است، بیشترین تلفات سایه مربوط به منطقه کوهبنان و کمترین تلفات سایه مربوط به منطقه قلعه گنج است. تلفات سایه در منطقه کوهبنان حدود ۱۷ درصد بیشتر از تلفات سایه در منطقه قلعه گنج است. با توجه به اینکه کوهبنان در شمال استان کرمان و قلعه گنج در جنوب استان واقع شده است، واضح است که با افزایش فاصله از خط استوا خطوط تابش خورشید مورب‌تر و لذا تلفات سایه افزایش بیشتری خواهد داشت.

جدول (۲): مشخصات فنی اینورتر مورد استفاده در شبیه‌سازی

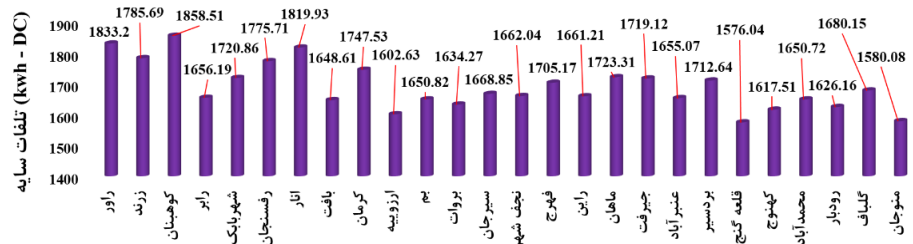
مشخصه	مقدار
راندمان	98.319 %
بیشینه توان AC	1.17644 e+06 Wac
بیشینه توان DC	1.19431e+06 Wdc
مصرف داخلی در روز	2066.88 Wdc
مصرف داخلی در شب	358.91 Wac
ولتاژ نامی AC	600 Vac
بیشینه ولتاژ DC	1200 Vdc
بیشینه جریان DC	1270.54 Adc
کمینه ولتاژ DC در حالت دریافت بیشینه توان	849 Vdc
ولتاژ DC نامی	940 Vdc
کمینه ولتاژ DC در حالت دریافت بیشینه توان	1200 Vdc



شکل (۴): انرژی AC تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در مدت زمان یک سال در شرایطی که نسبت تبدیل DC به AC برابر با ۱/۲۱ باشد



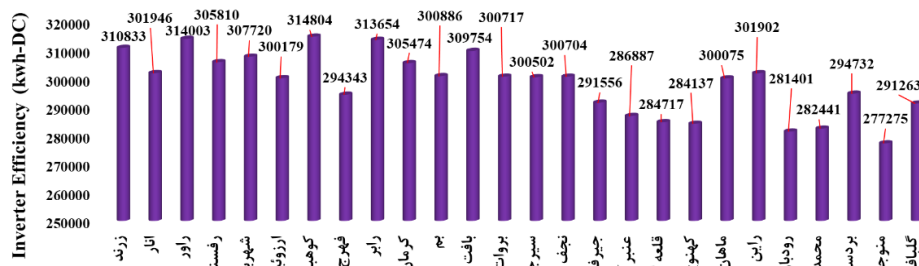
شکل (۵): میزان ضریب ظرفیت نیروگاه فتوولتائیک در شرایطی که نسبت تبدیل DC به AC برابر با ۱/۲۱ باشد



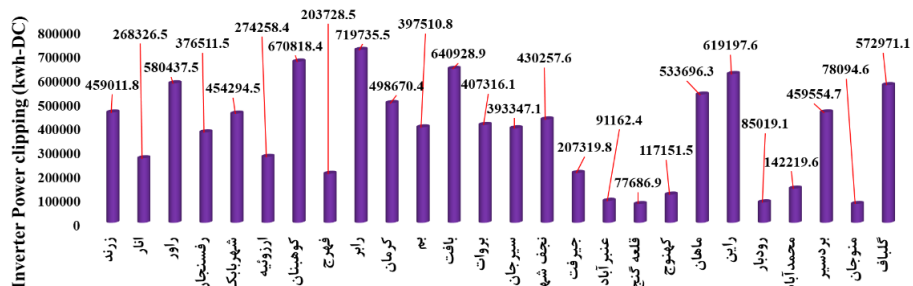
شکل (۶): تلفات سایه در نیروگاه فتوولتائیک در مدت زمان یک سال در مناطق مختلف استان کرمان

خروجی از آرایه فتوولتائیک بیشتر از حداکثر سطح توان DC ورودی اینورتر شود. در پاسخ به این شرایط، اینورتر ولتاژ DC را برای کاهش توان DC تنظیم می‌کند. این کار با افزایش ولتاژ، به بیش از ولتاژ MPP انجام می‌شود، بنابراین جریان DC کاهش یافته و منجر به کاهش توان از نقطه بهینه خود می‌شود [18]. شکل (۸) میزان تلفات اشباع اینورتر را در مناطق مختلف استان کرمان نشان می‌دهد.

مزرعه فتوولتائیک دارای تلفات دیگری از قبیل تلفات راندمان اینورتر و تلفات اشباع اینورتر می‌باشد. از آنجاکه راندمان اینورتر ۱۰۰ درصد نمی‌باشد، همواره مقداری از توان DC تولیدی توسط آرایه‌ها در اینورتر تلف می‌شود که به آن تلفات راندمان اینورتر می‌گویند. شکل (۷) میزان تلفات راندمان اینورتر را در مناطق مختلف استان کرمان نشان می‌دهد. تلفات اشباع اینورتر زمانی اتفاق می‌افتد که توان DC



شکل (۷): میزان تلفات راندمان اینورتر در مدت زمان یک سال در مناطق مختلف استان کرمان



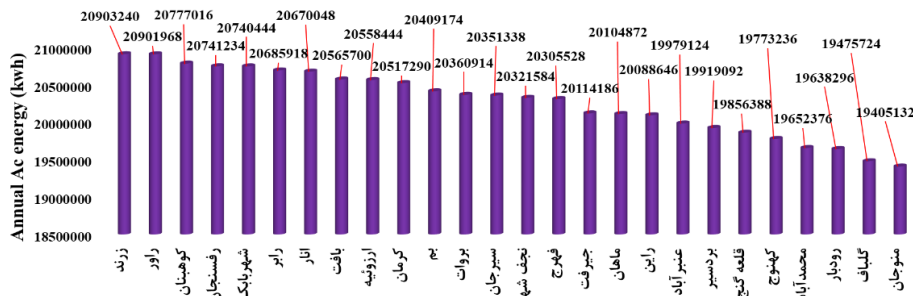
شکل (۸): میزان تلفات اشباع اینورتر در مدت زمان یک سال در شرایطی که نسبت تبدیل DC به AC برابر با ۱/۲۱ باشد

نیروگاه خورشیدی، تعداد اینورتر را به ۸ عدد افزایش داده و در نتیجه میزان نسبت تبدیل DC به AC برابر با ۱/۰۶ می‌شود. در این حالت توان تولیدی مزارع فتوولتائیک و ضریب ظرفیت آن‌ها به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. همچنین شکل (۱۱) میزان

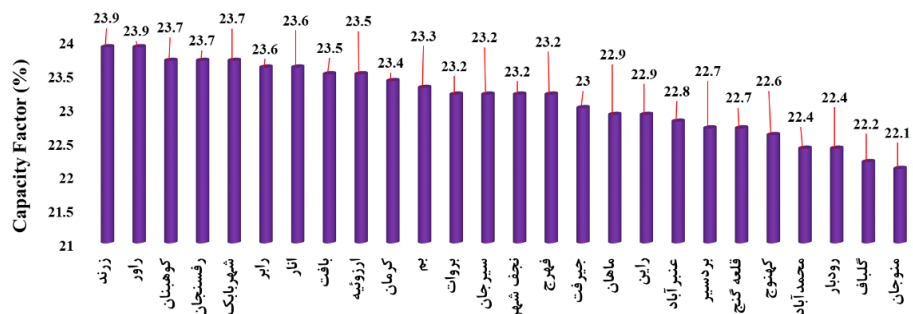
همان‌گونه که از شکل (۸) مشخص است در صورتی که نسبت تبدیل DC به AC برابر با ۱/۲۱ باشد، میزان تلفات اشباع اینورتر در اکثر مناطق استان کرمان زیاد است و تولید این مناطق کاهش چشمگیر یافته است. برای بررسی اثر تلفات اشباع اینورتر بر عملکرد

درصدی، رتبه کوهبنان در میزان تولید انرژی خورشیدی را از جایگاه هفتم به جایگاه سوم در استان کرمان ارتقا داده است. همچنین چنانچه تعداد اینورترهای مورد استفاده به ۹ عدد افزایش یابد، تلفات اشباع اینورتر به صفر خواهد رسید. در این حالت میزان تولیدی مزارع فتوولتائیک در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مقایسه شکل-های (۴) و (۱۲) نشان می دهد چنانچه تلفات اشباع اینورتر به صفر کاهش یابد، توان تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در کوهبنان به میزان ۳/۲ درصد افزایش خواهد یافت.

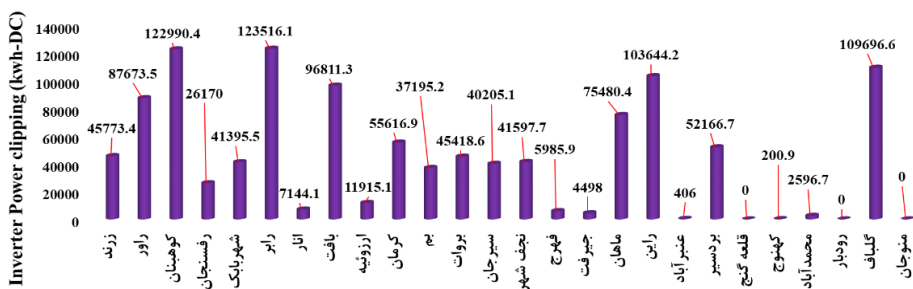
تلفات اشباع اینورتر در مزارع فتوولتائیک را نشان می دهد. مقایسه شکل های (۸) و (۱۱) نشان می دهد با افزایش تعداد اینورتر (کاهش نسبت تبدیل DC به AC از ۱/۲۱ به ۱/۰۶) تلفات اشباع اینورتر برای کلیه مناطق استان به شدت کاهش یافته، بطوریکه تلفات اشباع در کوهبنان حدود ۸۰ درصد کاهش داشته است. مقایسه شکل های (۴) و (۹) نشان می دهد این کاهش شدید در تلفات اشباع اینورتر بسیار مهم بوده و افزایش قابل توجه توان تولیدی مزارع فتوولتائیک را به دنبال خواهد داشت. به طور مثال توان تولیدی نیروگاه فتوولتائیک کوهبنان نسبت به حالت قبل ۲/۷ درصد افزایش خواهد یافت. این افزایش ۲/۷



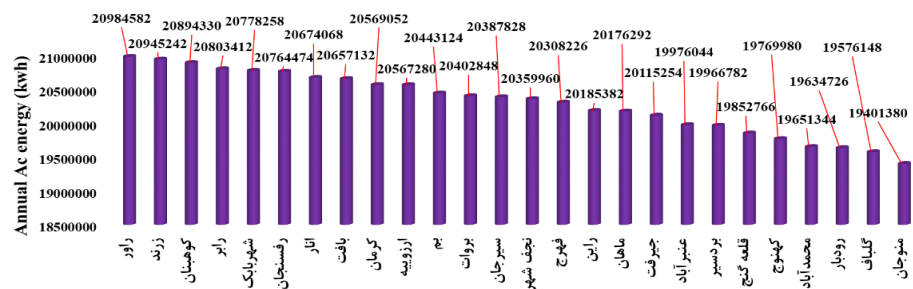
شکل (۹): انرژی AC تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در مدت زمان یک سال در شرایطی که نسبت تبدیل DC به AC برابر با ۱/۰۶ باشد



شکل (۱۰): میزان ضریب ظرفیت نیروگاه فتوولتائیک در شرایطی که نسبت تبدیل DC به AC برابر با ۱/۰۶ باشد



شکل (۱۱): میزان تلفات اشباع اینورتر در مدت زمان یک سال در شرایطی که نسبت تبدیل DC به AC برابر با ۱/۰۶ باشد



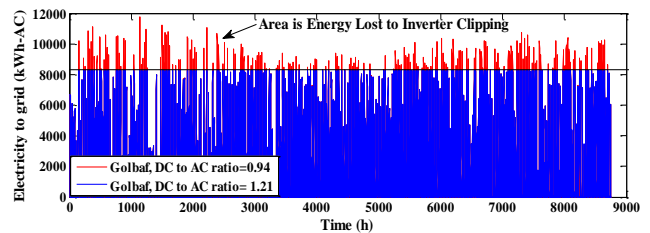
شکل (۱۲): انرژی AC تولیدی نیروگاه فتوولتائیک در مدت زمان یک سال در شرایطی که تلفات اشباع اینورتر برابر با صفر باشد

بر اساس اطلاعات هواشناسی هر منطقه یک مزرعه فتوولتائیک ۱۰ مگاوات در نرم افزار SAM شبیه سازی شده است. در این شبیه سازی تأثیر عوامل مختلف محیطی و جغرافیایی و همچنین تلفات مختلف مرتبط با اجزای نیروگاه در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد، تلفات اشباع اینورتر تأثیر قابل توجهی بر راندمان نیروگاه داشته و کاهش تلفات اشباع اینورتر سبب افزایش قابل توجه در میزان تولید نیروگاه فتوولتائیک خواهد شد. نکته مهمی که در نتایج مشاهده می شود این است که این تأثیر برای مناطق مختلف یکسان نبوده و میزان تلفات اشباع اینورتر وابستگی شدیدی به منطقه جغرافیایی و منحنی تابش سالیانه منطقه مورد نظر خواهد داشت. نتایج مقاله نشان می دهد میزان تلفات اشباع اینورتر وابستگی شدیدی به مقدار تابش ساعتی یک منطقه داشته و هر چه در یک منطقه انحراف تابش ساعتی از میزان متوسط سالیانه بیشتر باشد، میزان تلفات اشباع اینورتر افزایش قابل ملاحظه ای خواهد داشت. همچنین تنها گزینه کاهش تلفات اشباع اینورتر افزایش تعداد اینورترهای مورد استفاده در نیروگاه می باشد و این موضوع سبب افزایش هزینه سرمایه گذاری خواهد شد.

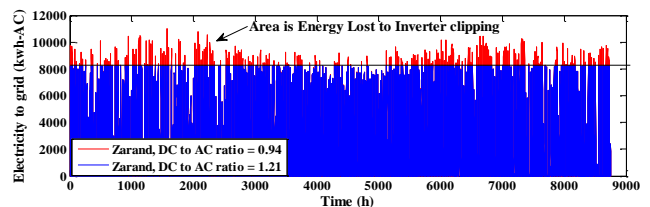
مراجع

- [۱] مهدی پرویزی مساعد، فرید فرمانی، امجد انوری مقدم، اشکان رحیمی کیان، حسن منصف، "جایابی و تعیین اندازه بهینه و چند هدفه مولد-های انرژی تجدید پذیر در یک شبکه توزیع با در نظر گرفتن مدل بار"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال دوازدهم، شماره اول، ص ۵۹-۶۸، بهار و تابستان ۱۳۹۴.
- [۲] حمیدرضا تودجی، "استفاده از اینورتر چند سطحی با کنترل کننده غیرخطی مستقیم برای اتصال مزرعه خورشیدی به شبکه"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره پانزدهم، شماره یک، ص ۶۵-۷۴، بهار ۱۳۹۷.
- [۳] بهنام نامور بهرغانی، محمد آقا شفیعی، معین ابوالقاسمی، محمد مرادی دالوند، محمد احمدیان، "تعیین اندازه بهینه منابع تولید پراکنده ریز شبکه مستقل از شبکه جهت تأمین بارهای الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن تأثیر هزینه های سرمایه گذاری، بهره برداری و زیست محیطی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره دوازدهم، شماره یک، ص ۳۵-۴۶، بهار و تابستان ۱۳۹۴.
- [۴] محمدعلی یزدان پناه جهرمی، سید مسعود برکاتی، "دیدگاهی جدید در طراحی و بهینه سازی سیستم های تجدید پذیر تولید انرژی الکتریکی: ارزیابی معیارهای تطابق تولید و مصرف توان همراه با بررسی قابلیت اطمینان سیستم"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره سیزدهم، شماره سه، ص ۳۷-۴۸، پاییز ۱۳۹۵.
- [5] H. Abu-Rub, M. Malinowski, and K. Al-Haddad, Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2014, pp. 1-729.
- [6] World Energy Outlook 2015, Int. Energy Agency (IEA), Paris, France, 2015.
- [7] Technology RoadMap Solar Photovoltaic Energy, Int. Energy Agency (IEA), Paris, France, 2014.
- [8] R. Fu, D. Feldman, R. Margolis, M. Woodhouse, K. Ardani, U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark:

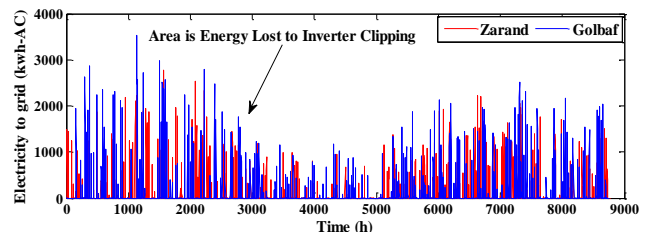
نکته دیگری که از نتایج شکل (۱۱) استنباط می شود عدم وابستگی تلفات اشباع اینورتر به میزان تولید نیروگاه و وابستگی شدید به منحنی تابش سالیانه منطقه مورد نظر می باشد. به طور مثال همان طور که از شکل (۹) مشاهده می شود، میزان تولید توان در زرد به مراتب از میزان تولید توان در گلباف بیشتر است. این در حالیست که نتایج شکل (۱۱) نشان می دهد تلفات اشباع اینورتر در گلباف بیش از دو برابر تلفات اشباع اینورتر در زرد می باشد. باید توجه داشت که تلفات اشباع اینورتر بستگی به میزان تولید ندارد و مربوط به میزان انحراف از معیار در تولید است. برای درک بهتر این مسئله میزان تولید و اشباع اینورتر را در گلباف و زرد مقایسه می کنیم. شکل (۱۳) و شکل (۱۴) به ترتیب میزان تولید و اشباع اینورتر را در گلباف و زرد نشان می دهند. شکل (۱۵) میزان انحراف از معیار در توان تولیدی را برای این دو شهر مقایسه می کند. همان گونه که از شکل (۱۵) مشخص است، میزان انحراف از معیار تولید در گلباف بیشتر از زرد بوده و لذا نسبت به نیروگاه فتوولتائیک زرد اینورترهای نیروگاه گلباف در زمان های بیشتری در ناحیه اشباع خواهند بود.



شکل (۱۳): میزان تولید و اشباع اینورتر را در گلباف



شکل (۱۴): میزان تولید و اشباع اینورتر را در زرد



شکل (۱۵): میزان انحراف از معیار تولید در زرد و گلباف

۵- نتیجه گیری

در این مقاله اثر تلفات اشباع اینورتر بر راندمان نیروگاه فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور با استفاده از نرم افزار METEONORM اطلاعات هواشناسی شهرهای استان کرمان به عنوان یک استان با پتانسیل بالای تولید انرژی خورشیدی استخراج و

- Q1 2017, National Renewable Energy Laboratory, 2017, 1-73.
- [9] E. Romero-Cadaval, B. Francois, M. Malinowski, and Q. C. Zhong, Gridconnected photovoltaic plants: An alternative energy source, replacing conventional sources, *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 9, no. 1, pp. 18–32, Mar. 2015.
- [10] M. Masera, et al. Smart (Electricity) Grids for Smart Cities: Assessing Roles and Societal Impacts, *Proceedings of the IEEE*. vol.106, no.4, PP.613-625, April 2018.
- [۱۱] عدنان رجائیان، عرفان رجائیان، روح الامین زینلی داورانی، "تهیه اطلس انرژی خورشیدی ایران بر مبنای پنل فتوولتائیک ثابت و پنل فتوولتائیک مجهز به سیستم ردیاب خورشیدی"، کنفرانس بین‌المللی مهندسی دانش‌بنیان و نوآوری، دوره چهارم، تهران- دانشگاه علم و صنعت ایران، دی‌ماه ۱۳۹۶.
- [12] Available from: <http://www.irna.ir/fa/News/82538983>
- [13] Ongun, I. Weighted efficiency measurement of PV inverters: introducing η_{ZMIR}. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 15, No. 5-6, May – June 2013, p. 550 – 554
- [14] King, D., et al. Sandia National Laboratories. Photovoltaic array performance model SAND 2004-3535. Albuquerque, New Mexico, USA. 2004. Available from: <http://prod.sandia.gov/techlib/accesscontrol.cgi/2004/043535.pdf>
- [15] Horoufiany, M. and Ghandehari, R., Optimal fixed reconfiguration scheme for PV arrays power enhancement under mutual shading conditions, *IET Journal of Renew. Power Gener.*, 2017, Vol. 11 Iss. 11, pp. 1456-1463
- [16] SAM Software, Available from : <https://sam.nrel.gov/>
- [17] Meteonorm Software, Available from: <https://www.meteonorm.com/>
- [18] Available from: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/dc-to-ac-conversion/inverter-saturation>

زیر نویس ها

-
- ¹ Short Circuit Current
² Open Circuit Voltage
³ Fill Factor
⁴ Tilt Angle
⁵ Zenith Angle
⁶ Azimuth Angle
⁷ Declination Angle
⁸ Latitude Angle
⁹ Hour Angle
¹⁰ Elevation Angle
¹¹ Capacity Factor