فصل‌نامه‌ی مطالعات اقتصاد انرژی/ سال دهم / شماره‌ی ۴۰/ بهار ۱۳۹۳/ صفحات ۱۰۹ -۹۵

برآورد ارزش اقتصادی تنظیم زاویه‌ی تیلت پنل‌های خورشیدی بر مقدار بهینه با استفاده از داده‌های سنجش از دور

علی درویشی بلورانی
استادیار گروه کارتوگرافی، دانشکده‌ی جغرافیا، دانشگاه تهران و مرکز سنجش از دور و GIS دانشگاه تهران (UT-RGC) ali.darvishi@ut.ac.ir

هادی پاک طینت*
کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران hpaktinat@ut.ac.ir

آرش ابراهیمی
کارشناس ارشد اقتصاد انرژی، a.ebrahimi.g@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۶/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۴/۱۰

چکیده

با توجه به کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش روزافزون آلودگی‌های ناشی از آن‌ها، استفاده از سلول‌های خورشیدی روز به روز در حال افزایش است. یکی از نکته‌های کلیدی در راه اندازی و نصب این پنل‌ها، زاویه قرارگیری این صفحات نسبت به سطح افق است که می‌تواند در بازدهی سیستم بسیار مؤثر باشد . هدف از این مطالعه ارائه‌ی راهکاری برای تنظیم بهینه زاویه قرارگیری پنل‌های خورشیدی نسبت به سطح افق با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور می‌باشد. در همین راستا سه استان هرمزگان، یزد و اردبیل به ترتیب به عنوان نماینده مناطق جنوبی، مرکزی و شمالی به عنوان پایلوت انتخاب شدند. در مرحله اول داده‌های پردازش شده‌ی تابش، برای تجزیه و تحلیل وارد نرم افزار شد و پایگاه اطلاعاتی تشکیل گردید. در مرحله دوم، از طریق داده‌های وارد شده در نرم افزار، لایه‌های رقومی ساخته و طبقه‌بندی شد نتایج نشان داد که زاویه‌ی تیلت بهینه پنل‌های خورشیدی در ایران همواره کم‌تر از عرض جغرافیایی محل است، به طوری که در منطقه جنوبی زاویه‌ی تیلت بهینه برابر با ((۰/۵ الی ۲/۵) - عرض جغرافیایی)، در منطقه مرکزی برابر با ((۱/۵ الی ۳) - عرض جغرافیایی) و در منطقه شمالی برابر با ((۴ الی ۶) - عرض جغرافیایی) می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان داد که با توجه به افزایش ۵/۵ تا ۶ درصدی توان تولید برق، در صورت تنظیم بهینه زاویه‌ی تیلت پنل‌های خورشیدی در یک نیروگاه فتوولتائیک به مساحت ۵ کیلومتر مربع (با ارزش سرمایه گذاری تقریبا برابر با ۳ میلیون یورو (Sunvoltenergy Sp., 2013)) سالانه حداقل ۱۱۲۵۰ میلیون ریال نسبت به حالتی که زاویه‌ی تیلت پنل‌های خورشیدی مساوی با عرض جغرافیایی محل قرار داده شود، منافع بیش‌تری عاید می‌شود.

طبقه بندی **JEL**: A10 , A19 , A30

کلید واژه: زاویه‌ی تیلت، فتوولتائیک، اقتصاد، تنظیم بهینه، سنجش از دور

---

*- نویسنده مسئول

۱ـ مقدمه

انرژی یکی از مؤلفه‌های ضروری برای فعالیت‌های صنعتی و نیاز همه‌ی مردم در زندگی امروزی است. توسعه‌ی پایدار اقتصادی به منابع انرژی با کارایی نسبی بالاتر، هزینه کم‌تر و تمیزتر نیازمند است. با توجه به شرایط آب‌وهوایی ایران، انرژی خورشیدی یکی از بهترین و اقتصادی‌ترین انرژی‌های تجدید پذیر محسوب می‌شود که می‌تواند به‌خوبی در ایران گسترش پیدا کند و جایگزین منابع فعلی انرژی گردد. میزان تابش نور خورشید در کشور ایران حدود ۵ کیلووات ساعت انرژی در روز در متر مربع است و بیش از ۹۰ درصد خاک ایران در سال ۳۰۰ روز در معرض تابش نور خورشید قرار دارد (ثقفی، ۱۳۸۸). مطابق با گزارش آژانس بین المللی انرژی، الکتریسیته‌ی خورشیدی تا سال ۲۰۵۰ بالغ بر ۲۰ الی ۲۵ درصد از تولید الکتریسیته‌ی جهان را شامل می‌شود. از موضوعات کلیدی در استفاده از این انرژی تجدیدپذیر، بالا بردن راندمان سیستم‌های فتوولتائیک و در نتیجه کاهش هزینه‌های تولید در این سیستم‌ها می‌باشد. یکی از پارامترهای اساسی تعیین کننده‌ی میزان کارایی سیستم‌های خورشیدی، میزان انرژی تابشی رسیده به سطح این سیستم‌هاست. میزان انرژی خورشیدی برخورد کرده بر سطح یک جمع‌آوری کننده‌ی خورشیدی[1] در مقیاس‌های زمانی مختلف، تابع پیچیده‌ای از بسیاری از فاکتورها شامل تابش محلی، جهت و زاویه‌ی سطح جمع‌آوری کننده خورشیدی و مشخصات بازتاب زمینی است. در چند سال اخیر مطالعات زیادی، مدل‌هایی را برای پیش‌بینی تابش خورشیدی در سطح شیب‌دار ارائه کرده‌اند ولی بیش‌تر این مدل‌ها در موارد خاصی کاربرد دارند، تعدادی از آن‌ها نیازمند محاسبات ویژه‌ای هستند و برخی دیگر نیز محدودیت‌هایی در وسعت به کارگیری دارند.

همان‌طور که ذکر شد یکی از پارامترهای اساسی در میزان انرژی تابشی برخورد کرده به سطح سیستم‌های فتوولتائیک، زاویه‌ی تیلت[2] پنل[3] خورشیدی است. در منابع مرتبط با موضوع در بیش‌تر موارد بیان شده است که در نیمکره‌ی شمالی جهت بهینه قرارگیری پنل‌ها رو به جنوب (گونرهان و همکاران[4]، ۲۰۰۷) می‌باشد و زاویه‌ی تیلت بهینه تنها بستگی به عرض جغرافیایی محل دارد (بن غانم[5]، ۲۰۱۱). به عبارت دیگر

1- Solar Collector
2- Tilt Angle
3- Panel
4- Gunerhan et al.
5- Benghanem

زاویه‌ی تیلت پنل‌های خورشیدی در یک محل برابر با عرض جغرافیایی آن محل در نظر گرفته شده است. اگر اتمسفر زمین نسبت به تابش خورشیدی کاملا شفاف[۱] بود، میزان انرژی که می‌توانست به وسیله‌ی یک جمع‌آوری کننده خورشیدی جمع‌آوری شود، در زاویه‌ی تیلتی برابر با عرض جغرافیایی و جهتی رو به جنوب به حداکثر می‌رسید (لویس[۲]، ۱۹۸۷). ولی در واقعیت چنین شرایطی وجود خارجی ندارد. مطالعات اخیر در این زمینه حاکی از آن است که طیف گسترده‌ای از زاویه‌ی تیلت بهینه به وسیله‌ی مطالعات مختلف تشخیص داده شده است و بیش‌تر آن‌ها برای مکان‌های مشخصی ارائه شده‌اند.

بهترین روش برای جمع‌آوری حداکثر انرژی روزانه، استفاده از سیستم‌های ردیاب خورشیدی[۳] است. ردیاب‌ها علاوه بر گران بودن، برای گردش به انرژی نیاز دارند و در برخی موارد نیز فاقد کارایی لازم می‌باشند (بن غانم،۲۰۱۱). از آن گذشته با توجه به متحرک بودن سیستم‌های ردیاب خورشیدی، احتمال خرابی آن‌ها بالاست، در صورتی که پنل‌های خورشیدی به دلیل نداشتن قطعات متحرک، خرابی بسیار پایینی دارند و از قابلیت اطمینان فوق العاده بالایی برخوردارند، به گونه‌ای که برای تأمین انرژی در ماهواره‌ها از آن‌ها استفاده می‌شود، بنابراین در صورت استفاده از ردیاب‌های خورشیدی قابلیت اطمینان مجموعه سیستم پایین می‌آید (انجمن انرژی خورشیدی آلمان، ۲۰۰۵)[۴]. با توجه به موارد ذکر شده، در بیش‌تر موارد پنل‌های خورشیدی را در یک زاویه‌ی تیلت بهینه به صورت ثابت قرار می‌دهند (بن غانم، ۲۰۱۱).

در این مطالعه روشی برای تنظیم بهینه‌ی زاویه‌ی تیلت پنل‌های خورشیدی با استفاده از داده‌های سنجش از دور در سه استان هرمزگان، یزد و اردبیل به‌صورت آزمایشی ارائه شده است. لازم به ذکر است که به صورت سنتی در اکثر موارد زاویه‌ی تیلت پنل‌های خورشیدی (فتوولتائیک[۵]) در زاویه‌ای برابر با عرض جغرافیایی محل قرار داده می‌شود.

سازمان‌دهی مقاله بدین صورت است که در بخش دوم، سوم و چهارم به ترتیب پیشینه‌ی تحقیق، مبانی نظری و سپس محدوده‌ی مورد مطالعه آورده شده است. در

1- Transparent
2- Lewis
3- Tracker
4- The German Solar Energy Society
5- Photovoltaic

بخش پنجم، روش شناسی تحقیق توضیح داده شده و نتایج و یافته‌ها در بخش ششم آورده شده است. در نهایت نتیجه‌گیری وپیشنهادات پایان بخش مقاله است.

۲- پیشینه‌ی تحقیق

در چند سال اخیر تحلیل‌ها و ارزیابی‌های گوناگونی در ارتباط با تنظیم بهینه زاویه‌ی تیلت پنل‌های خورشیدی در قالب تحقیقات گوناگون انجام گرفته است که هر یک از آن‌ها از مدل‌ها و روش‌های متعددی با توجه به اهداف و فروض خود استفاده کرده‌اند.

چانگ[1] (۲۰۰۹) با استفاده از سیستم جی‌دی‌اس[2] موقعیت خورشید را در هر لحظه محاسبه کرده و سپس با استفاده از داده‌های به‌دست آمده، زاویه‌ی تیلت بهینه پنل‌های خورشیدی را به‌دست آورده است. نتایج حاکی از آن است که در عرض‌های زیر ۶۵ درجه، زاویه‌ی تیلت بهینه حدود۰/۷۶ الی ۰/۹۱ برابر زاویه‌ی عرض جغرافیایی است.

چنگ و همکاران[3] (۲۰۰۹)، میزان همبستگی بین کارایی سیستم‌های فتوولتائیک با پنل‌های نصب شده در زاویه‌ی تیلت بهینه و سیستم‌های فتوولتائیک با پنل‌های نصب شده در زاویه‌ی تیلت برابر با عرض جغرافیایی را در ۲۰ ایستگاه در ۱۴ کشور با عرض جغرافیایی بین ۰ تا ۸۵ درجه را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داده است که به طور میانگین ۹۸/۶٪ از کارایی سیستمی با زاویه‌ی تیلت بهینه با استفاده از عرض جغرافیایی به عنوان زاویه‌ی تیلت به‌دست می‌آید.

بن غانم (۲۰۱۱)، با استفاده از معادلاتی که به منظور محاسبه تابش خورشیدی برخوردی به سطح بسط داده بود، مجموع تابش برخوردی به سطح پنل‌های خورشیدی را با زاویه‌ی تیلتی بین ۰ تا ۹۰ درجه برای هر ماه از سال در ایستگاه مدینه محاسبه و سپس با استفاده از نرم افزار متلب[4]، زاویه‌ی تیلت بهینه پنل‌های خورشیدی را به صورت ماهانه در شهر مدینه برآورد کرده است. نتایج نشان می‌دهد میانگین سالانه‌ی زاویه‌ی تیلت بهینه برای شهر مدینه ۲۳/۵ درجه می‌باشد که یک درجه‌ی کم‌تر از عرض جغرافیایی محل است.

1- Chang
2- Julian Dating System(JDS)
3- Cheng et al
4- MATLAB

رولندز و همکاران[1] (۲۰۱۱)، با محاسبه و مدل‌سازی تابش خورشیدی، شبیه‌سازی بازده پنل‌های خورشیدی، داده‌های نیازهای ساعتی بازار الکتریسیته و جزئیات رژیم قیمت الکتریسیته از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ برای دو موقعیت مختلف، زاویه‌ی تیلت بهینه را برآورد کرده و نتایج نشان داده است که همواره زاویه‌ی تیلت بهینه کم‌تر از عرض جغرافیایی محل می‌باشد.

۳- مبانی نظری

انرژی خورشیدی

زمین در فاصله‌ی ۱۵۰ میلیون کیلومتری خورشید واقع شده است و ۸ دقیقه و ۱۸ ثانیه طول می‌کشد تا نور خورشید به زمین برسد. سرمنشاء تمام اشکال مختلف انرژی‌های شناخته شده تاکنون شامل سوخت‌های فسیلی ذخیره شده در زمین، انرژی‌های بادی، آبشارها، امواج دریاها و غیره از خورشید می‌باشد. یکی از مزایایی که انرژی خورشیدی را از سایر منابع متمایز می‌کند، فراوانی و دسترسی آسان به آن است، به‌طوری‌که اگر انسان می‌توانست کل انرژی که در طول یک روز به زمین می‌رسد، را مهار کند، قادر بود انرژی یک سال کل کره زمین را تأمین کند (چاپو[2]، ۲۰۰۸). انرژی خورشید می‌تواند همانند سایر انرژی‌ها به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم به دیگر اشکال انرژی همانند گرما و الکتریسیته تبدیل شود، ولی موانعی شامل ضعف علمی و تکنیکی در تبدیل، متغیر و متناوب بودن مقدار انرژی به دلیل تغییرات جوی و فصول سال و جهت تابش، محدوده‌ی توزیع بسیار وسیع و غیره موجب شده است که نتوان استفاده مناسبی از این موهبت خدایی داشت.

سیستم‌های فتوولتائیک

سیستم‌های فتوولتائیک، تبدیل کننده‌ای هستند که به طور مستقیم و بدون هیچ واسط حرارتی نور خورشید را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند (پاریدا و همکاران[3]، ۲۰۱۱). اصل مقدماتی در این تکنولوژی پدیده‌ی فتوالکتریک[4] است که اولین بار به وسیله‌ی

1- Rowlands et al
2- Chapo
3- Parida et al.
4- Photoelectric

انیشتن مطرح شده است. بر اساس این پدیده وقتی یک ذره‌ی[1] انرژی نوری یعنی یک فوتون در یک ماده نفوذ کند، این احتمال وجود دارد که بوسیله الکترون جذب شود و الکترون انتقال پیدا کند. سلول‌های فتوولتائیک کریستال‌هایی هستند که از لایه‌های نازکی از جنس نیمه‌ی هادی نظیر سیلیکون و آرسینورگالیم[2] ساخته شده‌اند. وقتی فوتون‌ها به یک سلول فتوولتائیک برخورد می‌کنند مقداری از آن توسط سلول‌های نیمه‌ی هادی جذب می‌شوند. وقتی که نور خورشید به اندازه‌ی کافی توسط جسم نیمه‌ی رسانا جذب شود، الکترون‌ها از اتم‌های جسم جدا می‌شوند. رفتار خاص سطح جسم در طول ساختن باعث می‌شود سطح جلویی سلول برای الکترون‌های آزاد، بیش‌تر پذیرش یابد، بنابراین الکترون‌ها به‌طور طبیعی به سطح مهاجرت می‌کنند. در نتیجه‌ی عدم توازن بار بین سلول‌های جلویی و سطوح عقبی یک پتانسیل ولتاژ شبیه قطب‌های مثبت و منفی یک باطری ایجاد می‌شود. وقتی که دو سطح از میان یک راه داخلی مرتبط می‌شوند، الکتریسیته جریان می‌یابد.

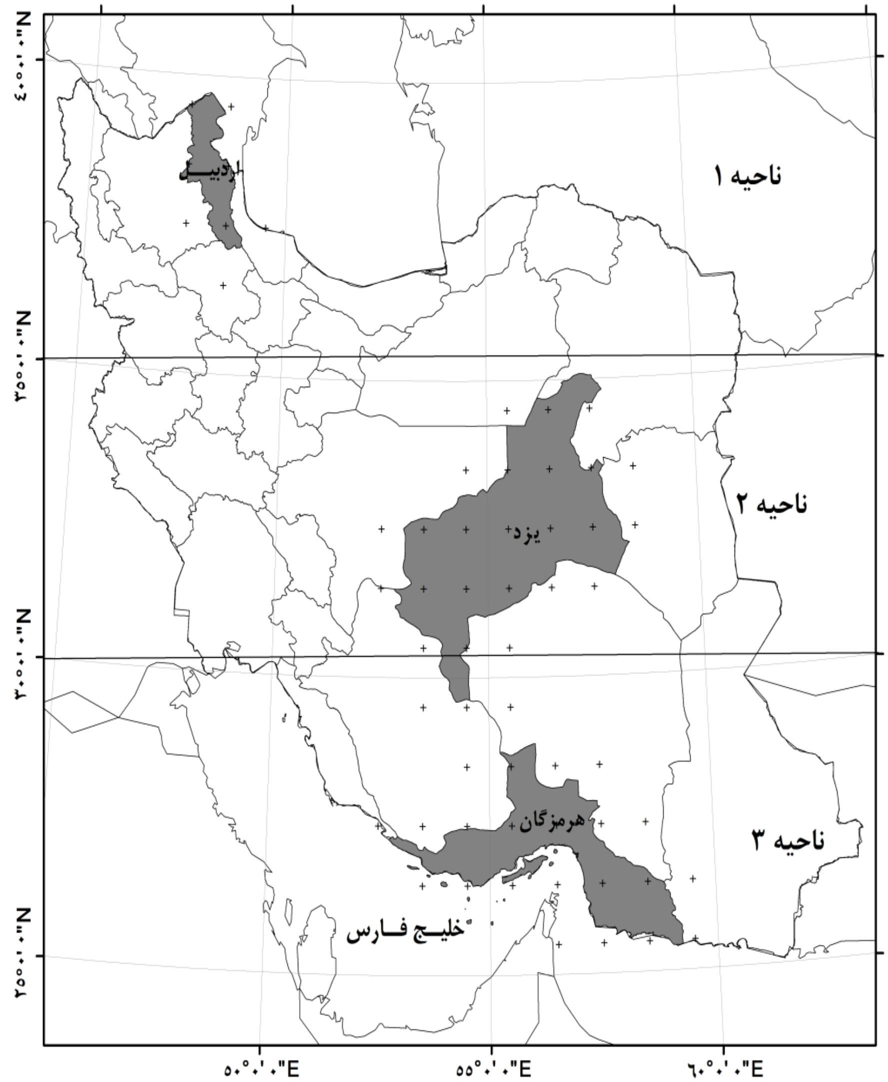
۴ـ محدوده مورد مطالعه

به منظور مشاهده‌ی رفتار تغییرات زاویه‌ی تیلت بهینه، همراه با تغییر عرض جغرافیایی، کل ایران با فاصله‌های برابر ۵ درجه به سه منطقه شمالی، مرکزی و جنوبی تقسیم و سه استان اردبیل، یزد و هرمزگان به ترتیب به عنوان نماینده‌ی منطقه شمالی، مرکزی و جنوبی انتخاب شدند. استان اردبیل با مختصاتی بین ۴۷/۲۸ و ۴۸/۹۲ درجه‌ی شرقی و ۳۷/۱۰ و ۳۹/۷۱ درجه‌ی شمالی در شمال غرب ایران واقع شده‌است. مساحت این استان حدود ۱۷،۹۵۳ کیلومترمربع می‌باشد، مرکز این استان شهر اردبیل و بر طبق آخرین تقسیمات کشوری، شامل ۹ شهرستان می‌باشد.

استان یزد با مختصاتی بین ۵۲/۷۸ و ۵۸/۳۵ درجه‌ی شرقی و ۲۹/۵۸ و ۳۵/۱۱ درجه‌ی شمالی تقریبا در مرکز ایران قرار گرفته است، مساحت این استان حدود ۲۸۵، ۱۲۹ کیلومتر مربع می‌باشد. مرکز این استان شهر یزد است و بر طبق آخرین تقسیمات کشوری، شامل ۱۱ شهرستان می‌باشد . استان هرمزگان با مختصاتی بین ۲۵/۴۰ و ۲۸/۹۵ درجه‌ی عرض شمالی و ۵۳/۶۸ و ۵۹/۲۵ درجه‌ی طول شرقی در جنوب ایران و در شمال تنگه‌ی هرمز واقع شده است. مساحت این استان حدود ۷۰،۶۹۷

1- Quantum
2- Silicon & Gallium Arsenide

کیلومترمربع می‌باشد، مرکز این استان شهر بندر عباس است و بر طبق آخرین تقسیمات کشوری، شامل ۱۱ شهرستان می‌باشد (شکل ۱).



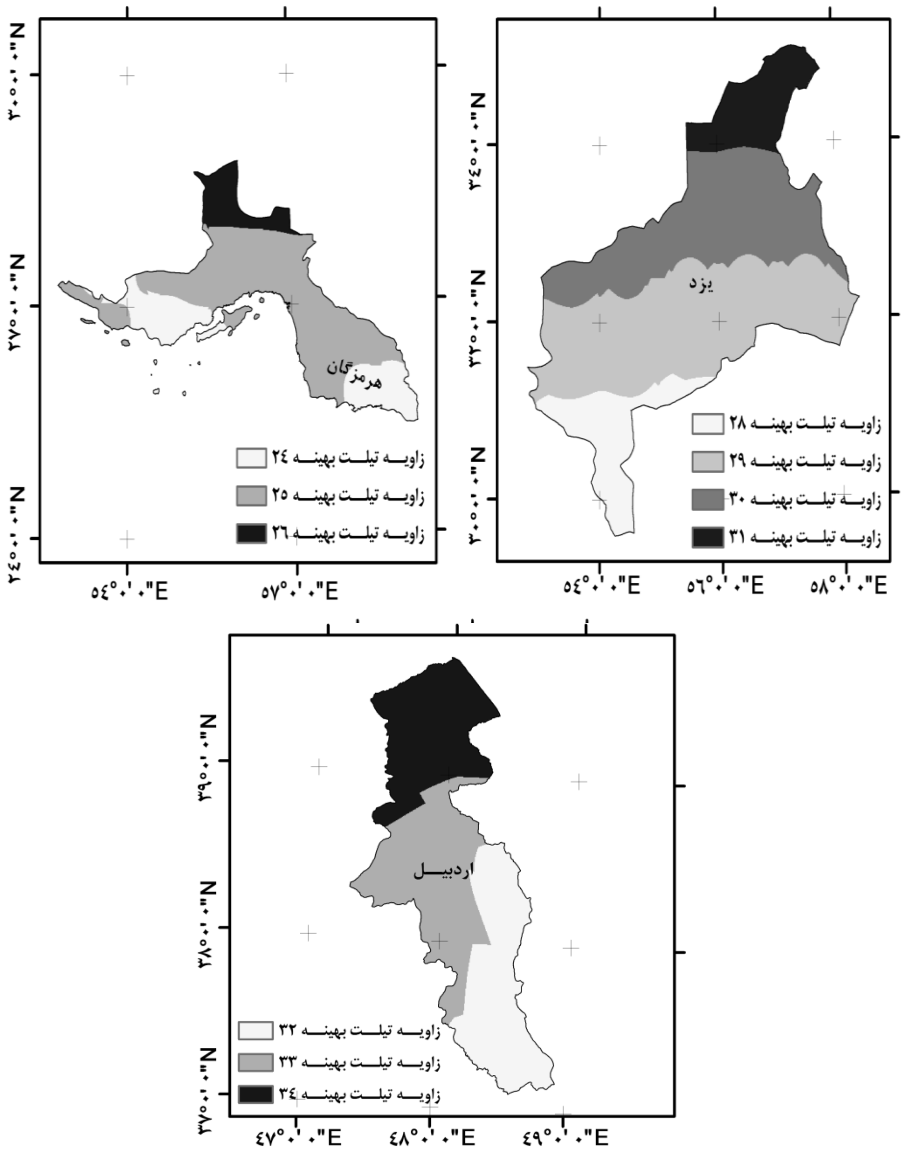
شکل ۱ – موقعیت جغرافیایی سه استان مورد مطالعه و موقعیت مکانی داده‌ها(+)

۵- روش شناسی تحقیق

داده‌های مورد استفاده برای تحقیق دارای ماهیت نقطه‌ای هستند. این نوع از ساختار داده‌ها برای انجام تحلیلات مورد نظر به هیچ عنوان کارآمد نیستند و لذا باید درون‌یابی شده و تبدیل به لایه‌ی رستری شوند، تا بتوان تجزیه و تحلیل‌های لازم را بر روی آن‌ها انجام داد. برای انجام درونیابی روش‌های مختلفی وجود دارد که در این مطالعه از روش درون‌یابی وزنی معکوس فاصله[۱] استفاده شده است. روش درون‌یابی وزنی معکوس فاصله، از ارزش‌های نقاط معلوم، برای مشخص کردن ارزش‌های مناطق فاقد اطلاعات استفاده می‌کند و ارزش‌های نزدیک‌تر به مناطق نامعلوم اثر بیش‌تری در برآورد نقاط بدون داده را داشته و در نتیجه منجر به ایجاد سطوح پیوسته می‌شود. پس از انجام درون‌یابی، سطوح پیوسته برای انجام تجزیه و تحلیل به ساختار رستر تبدیل گردید. پس از ایجاد لایه رستر از داده‌های نقطه‌ای زاویه‌ی تیلت بهینه، لایه رستری طبقه‌بندی و هر کدام از سه لایه با فاصله‌ی یک درجه‌ی عرض جغرافیایی طبقه‌بندی شده که نتایج در شکل ۲ آمده است.

همان‌گونه که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، مناطق تفکیک شده تقریبا به طور موازی با عرض جغرافیایی می‌باشد و در مواردی که ناحیه دارای ماهیت کوهستانی است، مانند استان اردبیل، مناطق تفکیک شده دارای مقداری انحراف نسبت به عرض جغرافیایی می‌باشد که دلیل اصلی آن تأثیر ارتفاعات در تابش است. لازم به ذکر است علت اصلی تضرس ایجاد شده در مرز تفکیکی برای مناطق با زاویه‌ی تیلت بهینه مختلف به ویژه در استان یزد، ماهیت روش درون‌یابی و هم‌چنین روش طبقه بندی مورد استفاده می‌باشد. با دقت در شکل ۲ می‌توان به سادگی دریافت که در سه استان مورد مطالعه برخلاف ایده رایج در ایران که اندازه‌ی زاویه‌ی تیلت را مساوی عرض جغرافیایی ناحیه در نظر می‌گیرند، اندازه زاویه‌ی تیلت بهینه پایین‌تر از عرض جغرافیایی ناحیه است.

5- Inverse Distance Weighted(IDW)



شکل ۲- نقشه‌ی طبقه‌بندی شده‌ی زاویه‌ی تیلت بهینه برای سه استان مورد مطالعه

در این مطالعه به منظور مشخص کردن تفاوت میزان پتانسیل تولید الکتریسیته در حالتی که اندازه زاویه‌ی تیلت برابر با عرض جغرافیایی در نظر گرفته شده با حالتی که

زاویه‌ی تیلت در حالت بهینه قرار داده شده است، (چرابی[1] و همکاران، ۲۰۱۱) بدین منظور از فرمول ۱ استفاده شده است.

$$GP = SR \times CA \times AF \times \eta \quad (1)$$

که در آن GP توان تولید الکتریسته در سال(GWh/year)، SR تابش خورشیدی دریافتی در سطح (GWh/km2/year)، CA مجموع مساحت زمین مناسب برای تجهیزات فتوولتائیک (km^2)، AF فاکتور سطح و ŋ راندمان سیستم خورشیدی در تبدیل نور خورشید به الکتریسیته است.

در این مطالعه فاکتور سطح[2] (AF) ۷۰٪، مساحت در نظر گرفته شده برای نصب پنل‌های PV (CA)، پنج کیلومتر مربع و راندمان سیستم (ŋ) با فرض این‌که از سلول‌های C-Si استفاده شود، ۱۳/۱٪ در نظر گرفته شده است. نتایج در جدول (۱) برای هر سه استان مورد مطالعه نشان داده شده است.

جدول ۱ – محاسبه‌ی اختلافِ استعداد تولید الکتریسیته در پنل‌های PV با زاویه‌ی تیلت بهینه و زاویه‌ی تیلت برابر عرض جغرافیایی

محدوده‌ی مورد مطالعه	اندازه‌ی زاویه‌ی تیلت	میانگین تابش سالانه دریافت شده، SR (GWh/km2/year)	پتانسیل تولید، GP (GWh/year)	اختلاف استعداد تولید در حالت بهینه و غیر بهینه (GWh/year)	درصد اختلاف استعداد تولید در حالت بهینه و غیر بهینه
اردبیل	زاویه‌ی تیلت بهینه	۱۷۸۱	۸۱۷	۴۵	۵/۵
	زاویه‌ی تیلت برابر با عرض جغرافیایی	۱۶۸۳	۷۷۲		
یزد	زاویه‌ی تیلت بهینه	۲۲۳۸	۱۰۲۶	۶۰	۵/۸
	زاویه‌ی تیلت برابر با عرض جغرافیایی	۲۱۰۶	۹۶۶		
هرمزگان	زاویه‌ی تیلت بهینه	۲۲۵۹	۱۰۳۶	۵۸	۵/۶
	زاویه‌ی تیلت برابر با عرض جغرافیایی	۲۱۳۲	۹۷۸		

1- Charabi & et al.
2- Area Factor

۶- نتایج و یافته‌های تحقیق

به دلیل این‌که تابش خورشیدی نوساناتی را به صورت روزانه، فصلی، سالیانه و بین-سالی دارد، معمولا به داده‌های تابش خورشیدی بلند مدت برای طراحی سیستم‌های تولید الکتریسیته خورشیدی نیاز است. به طور ایده آل باید از داده‌های تابش خورشیدی در محلی که قصد راه اندازی سیستم خورشیدی را دارند، استفاده شود. اما در واقعیت، این‌گونه داده‌ها معمولا در دسترس نیستند و داده‌های تابش به‌دست آمده از نزدیک‌ترین ایستگاه محاسبه تابش خورشیدی به کار گرفته می‌شود. از آن‌جایی که پیاده سازی و نگهداری ایستگاه‌های سنجش تابش خورشیدی هزینه بر است، تراکم این گونه ایستگاه‌ها در کشورهای در حال توسعه نظیر ایران معمولا خیلی کم‌تر از آن است که به اندازه‌ی کافی داده‌های مربوط به تابش خورشیدی را فراهم آورد و حتی اگر اطلاعاتی هم موجود باشد، معمولا تعداد سال‌های آماری این ایستگاه‌ها کم‌تر از حد استاندارد برای محاسبات تابش و انرژی دریافتی خورشیدی است (جان جای و همکاران[1]، ۲۰۱۱)، لذا داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند برای به‌دست آوردن داده‌های تابش با دقتی قابل قبول مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۲- نمونه‌ای از داده‌های مورد استفاده در تحقیق (ناسا)

Lat 27 Lon 52	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	میانگین سالانه
SSE HRZ	۳/۷۳	۴/۵۷	۵/۱۴	۶/۱۵	۷/۰۷	۷/۴۵	۶/۸۲	۶/۶۳	۶/۰۷	۵/۱۳	۳/۹۸	۳/۳۶	۵/۵۱
K	۰/۵۸	۰/۶۰	۰/۵۶	۰/۵۹	۰/۶۳	۰/۶۵	۰/۶۱	۰/۶۲	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۶۰
Diffuse	۱/۰۵	۱/۲۷	۱/۷۱	۱/۹۵	۱/۹۹	۱/۹۸	۲/۱۳	۱/۸۹	۱/۵۷	۱/۲۶	۱/۰۹	۱/۰۲	۱/۵۸
Direct	۵/۵۵	۶/۰۱	۵/۵۵	۶/۲۷	۷/۳۶	۷/۹۰	۶/۷۸	۶/۹۷	۷/۰۲	۶/۷۶	۵/۷۸	۵/۰۵	۶/۴
Tilt 0	۳/۶۳	۴/۵۳	۵/۰۸	۶/۰۲	۷/۰۴	۷/۴۲	۶/۷۹	۶/۵۹	۵/۹۸	۵/۰۹	۳/۸۶	۳/۲۹	۵/۴۵
Tilt 12	۴/۲۷	۵/۱۲	۵/۴۱	۶/۱۴	۶/۹۱	۷/۱۶	۶/۶۱	۶/۶۰	۶/۲۹	۵/۶۷	۴/۴۹	۳/۹۰	۵/۷۵
Tilt 27	۴/۸۶	۵/۶۰	۵/۵۷	۶/۰۱	۶/۴۳	۶/۵۱	۶/۱۰	۶/۳۱	۶/۳۷	۶/۱۱	۵/۰۵	۴/۴۸	۵/۷۸
Tilt 42	۵/۱۸	۵/۷۸	۵/۴۴	۵/۵۷	۵/۶۳	۵/۵۵	۵/۲۹	۵/۶۹	۶/۱۲	۶/۲۲	۵/۳۴	۴/۸۱	۵/۵۵
Tilt 90	۴/۲۴	۴/۲۷	۳/۳۳	۲/۶۲	۲/۱۰	۱/۸۷	۱/۹۷	۲/۴۰	۳/۳۴	۴/۳۴	۴/۲۵	۴/۰۵	۳/۲۲
OPT	۵/۲۳	۵/۷۸	۵/۵۷	۶/۱۴	۷/۰۴	۷/۴۲	۶/۷۹	۶/۶۳	۶/۳۹	۶/۲۲	۵/۳۶	۴/۸۸	۶/۱۲
زاویه بهینه	۵۱/۰	۴۳/۰	۰/۲۸	۱۳/۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۷/۰۰	۲۳/۰	۳۹/۰	۴۸/۰	۵۳/۰	۲۵/۳

منبع: سازمان فضایی آمریکا (NASA)

1- Janjai et al.

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از ناسا[1] به‌دست آمده است[2]. این داده‌ها میانگین ۲۲ سال آماری از سال ۱۹۸۳ تا سال ۲۰۰۵ میلادی می‌باشد که از طریق سنجش از دور به‌دست آمده است و مربوط به پروژه‌ی (SSE)[3] ناسا می‌باشد. قدرت تفکیک مکانی داده‌های مورد استفاده یک درجه طول و عرض جغرافیایی است (شکل ۱).

نرم‌افزارهای مورد استفاده در تحقیق تنها شامل نرم‌افزار ArcGIS 9.3 است که برای درون‌یابی و تحلیلات و محاسبات رستری[4] مورد استفاده قرار گرفته است.

با مقایسه‌ی زاویه‌ی تیلت بهینه با عرض جغرافیایی در سه استان مورد مطالعه، می‌توان دریافت که در هر سه استان، زاویه‌ی تیلت بهینه دارای مقادیری کم‌تر از عرض جغرافیایی محل هستند. مقدار کسری زاویه‌ی تیلت بهینه نسبت به عرض جغرافیایی دارای ارتباط معنی‌داری با عرض جغرافیایی است، به طوری که با افزایش عرض جغرافیایی دامنه‌ی تفاوت زاویه‌ی تیلت بهینه با عرض جغرافیایی نیز بیش‌تر می‌شود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که به ترتیب برای استان‌های اردبیل، یزد و هرمزگان، به طور متوسط مقدار زاویه‌ی تیلت بهینه ۵، ۲/۵ و ۱/۵ درجه‌ی زیر مقادیر عرض جغرافیایی است. بنابر نتایج حاصل شده می‌توان به این حقیقت پی برد که در عرض‌های جغرافیایی پایین نزدیک به صفر (استوا)، زاویه‌ی تیلت بهینه با زاویه‌ی عرض جغرافیایی تفاوت چندانی با یکدیگر ندارد و تقریبا زاویه‌ی تیلت بهینه برابر با عرض جغرافیایی محل است، که با افزایش عرض جغرافیایی این تفاوت بیش‌تر می‌شود، به‌طوری که در منطقه‌ای از اردبیل با عرض جغرافیایی ۳۹ درجه مقدار زاویه‌ی تیلت بهینه تا ۵ درجه کم‌تر از عرض جغرافیایی نیز می‌رسد. با توجه به مطالب عنوان شده می‌توان به این نتیجه رسید که در صورت عدم تنظیم بهینه‌ی زاویه‌ی تیلت پنل‌های خورشیدی در سه استان مورد مطالعه، به صورت مطلق بیش‌ترین زیان ناشی از عدم تنظیم بهینه‌ی زاویه‌ی تیلت پنل‌های خورشیدی متوجه استان اردبیل می‌شود، که دلیل آن تفاوت بیش‌تر زاویه‌ی تیلت بهینه با عرض جغرافیایی در این استان یا به عبارتی دوری بیش‌تر این استان از استواست. با این حال به طور نسبی، دو استان یزد و هرمزگان در صورت عدم تنظیم بهینه‌ی زاویه‌ی تیلت زیان بیش‌تری را نسبت به استان

1- NASA
2- http://eosweb.larc.nasa.gov
3- Surface Meteorology and Solar Energy
4- Raster Calculation

اردبیل متحمل می‌شوند، که دلیل آن دریافت تابش سالانه‌ی بیش‌تر نسبت به استان اردبیل در این دو استان است. همان‌گونه که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود اختلافِ پتانسیل تولید در زاویه‌ی تیلت بهینه و زاویه‌ی تیلت برابر با عرض جغرافیایی در دو استان یزد و هرمزگان تقریبا برابر و حدود ۶۰ گیگاوات ساعت در سال است، که همین مقدار در استان اردبیل برابر ۴۵ گیگاوات ساعت در سال می‌باشد .

حداقل اختلافِ استعداد تولید در سه استان مورد مطالعه برای استان اردبیل با مقداری برابر با ۴۵ گیگاوات ساعت یا به عبارتی ۴۵۰۰۰ مگاوات ساعت در سال به‌دست آمده است. اگر قیمت پایه‌ی هر کیلووات ساعت الکتریسیته را در کم‌ترین حالت برابر ۷۵۰ ریال در نظر بگیریم، سالانه تنها با تنظیم بهینه‌ی اندازه‌ی زاویه‌ی تیلت پنل‌های خورشیدی، در یک نیروگاه خورشیدی با مساحت ۵ کیلومتر مربع و فاکتور سطح ۷۰٪، چیزی حدود ۳۳۷۵۰ میلیون ریال به صورت نظری صرفه‌جویی انجام می‌گیرد. در صورتی که مقدار صرفه‌جویی عملی برابر با یک سوم حالت نظری در نظر گرفته شود، سالانه حداقل حدود ۱۱۲۵۰ میلیون ریال صرفه‌جویی انجام می‌گیرد.

امروزه استفاده از سلول‌های فتوولتائیک به علت هزینه‌های بالای آن محدود شده است، اگرچه هزینه‌ی تولید الکتریسیته به وسیله‌ی سیستم‌های فتوولتائیک در دو دهه گذشته به طور مداوم کاهش یافته است، لذا کاهش هزینه‌های تولید الکتریسیته‌ی خورشیدی می‌تواند موجب استفاده‌ی فراگیر از این انرژی تجدیدپذیر شود. در چنین شرایطی است که تعیین زاویه‌ی تیلت درست نقشی بسیار حیاتی خواهد یافت.

در مورد هزینه‌های تنظیم روی زاویه‌ی بهینه باید گفت این هزینه نسبت به صرفه‌جویی که با تنظیم روی زاویه‌ی بهینه انجام می‌گیرد بسیار ناچیز است و تنظیم پنل‌های خورشیدی تنها با استفاده از چند نیروی کار طی چند روز امکان پذیر است که این هزینه برای نیروگاهی با مقیاس مطرح شده به طور حتم از ۲۰۰ میلیون ریال تجاوز نخواهد کرد و در صورت یک‌بار تنظیم پنل‌ها روی زاویه‌ی بهینه تا پایان عمر سلول‌های خورشیدی این زوایا حفظ شده و نیازی به تنظیم مجدد نیست، ولی متاسفانه مشکل اساسی در این بین مقاومت دست اندکاران و مجریان نیروگاه‌های خورشیدی در قبول روش‌های نوین شناسایی زاویه‌ی بهینه پنل‌های خورشیدی به جای روش‌ها و تکنیک‌های قبلی است. نکته‌ی دیگر این‌که زوایای بهینه‌ای که در این پژوهش اعلام شده است براساس جدیدترین روش‌های روز ارائه شده به وسیله‌ی ناسا می‌باشد و در حال حاضر به روزترین روش برای تنظیم بهینه زاویه‌ی تیلت پنل‌های خورشیدی است.

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در ایران در بیش‌تر موارد زاویه‌ی تیلت پنل‌های خورشیدی را برابر عرض جغرافیایی محل در نظر می‌گیرند. مطالعه جاری نشان می‌دهد که در تمام قلمرو ایران همواره زاویه‌ی تیلت بهینه کم‌تر از زاویه‌ی عرض جغرافیایی محل است. این اختلاف در جنوب ایران کمرنگ‌تر و به طرف شمال، با افزایش عرض جغرافیایی این تفاوت بارزتر می‌شود. نتایج مطالعه نشان داده است در سه زون شمالی، مرکزی و جنوبی ایران زاویه‌ی تیلت بهینه برای پنل‌های خورشیدی به ترتیب برابر با ((۴ الی ۶) - عرض جغرافیایی)، ((۱/۵ الی ۳) - عرض جغرافیایی) و ((۰/۵ الی ۲/۵) - عرض جغرافیایی) می‌باشد. به عبارت دیگر اگر کل ایران در سه زون درنظر گرفته شود، متوسط زاویه‌ی تیلت بهینه به ترتیب برای زون شمالی، زون مرکزی و زون جنوبی برابر ۳۲/۵، ۲۸ و ۲۵درجه است. نتایج بیانگر این موضوع است که با افزایش عرض جغرافیایی، اختلاف زاویه‌ی تیلت بهینه با زاویه‌ی عرض جغرافیایی بیش‌تر می‌شود. در صورت استفاده از زاویه‌ی تیلت بهینه به جای استفاده از زاویه‌ی تیلتی برابر با عرض جغرافیایی محل برای نصب پنل‌های خورشیدی در ایران، در یک نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک با مساحت ۵ کیلومتر مربع، می‌توان به سالانه حدود حداقل ۱۱۲۵۰ میلیون ریال صرفه‌جویی دست یافت. با توجه به مطالب ذکر شده، با تنظیم بهینه زاویه‌ی تیلت پنل‌های خورشیدی با استفاده از داده‌های سنجش از دور، با صرف هزینه‌ای بسیار اندک، می‌توان هزینه‌ی تولید الکتریسیته‌ی خورشیدی را به نحو قابل توجهی کاهش داد و گامی به سوی مقرون به صرفه کردن استفاده از انرژی خورشیدی در ایران برداشت.

فهرست منابع

ثقفی، محمود (۱۳۸۸)، انرژی‌های قابل تجدید، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.

Benghanem, M. (2011), “Optimization of Tilt Angle for Solar Panel: Case Study for Madinah, Saudi Arabia” Applied Energy 88, 1427–1433

Chapo, R. (2008), “Solar Energy Overview” Ezinearticles.com, December 2008, Available at: http://ezinearticles.com

Charabi, Y., Gastli, A. (2011), “PV Site Suitability Analysis Using GIS-based Spatial Fuzzy Multi-criteria Evaluation” Renewable Energy 36, 2554-61

Cheng, C.L. & Sanchez Jimenez, C.S. & Lee, M.C(2009), "Research of BIPV Optimal Tilted Angle, Use of Latitude Concept for South Orientated Plans", Renewable Energy 34, 1644–1650

Gunerhan, H. (2007), "Hepbasli A. Determination of the Optimum Tilt Angle of Solar Collectors for Building Applications", Build Environ 42, 779–783

Janjai, S. & Pankaew, P. & Laksanaboonsong, J. & Kitichantarops (2011), "Estimation of Solar Radiation Over Cambodia from Long-term Satellite Data", Renewable Energy 36, 1214-1220

Johnston, K. & Ver Hoef, J.M. & Krivoruchko, K. & Lucas, N. & Magri, A.(2001), "Using ArcGIS Geostatistical Analyst", United States of America, ESRI Press

Lewis, G. (1987), "Optimum Tilt of a Solar Collector", Solar & Wind Technology 4, 407–410

Parida, B. & Iniyan, S. & Goic, R. (2011), "A Review of Solar Photovoltaic Technologies", Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 1625–1636

Pau Chang, T. (2009) "The Sun's Apparent Position and the Optimal Tilt Angle of a Solar Collector in the Northern Hemisphere", Solar Energy 83, 1274-1284

Planning and Installing Photovoltaic Systems, a Guide for Installer, Architects and Engineers, (2005), Use, the German Solar Energy Society, James & James

Robert, M.C. (2005), "Concentrator Photovoltaic Technologies: Review and Market Prospects", Refocus 6/4, 35–39

Rowlands I.H., Kemery, B.P., Beausoleil-Morrison, I. (2011), "Optimal Solar-PV Tilt Angle and Azimuth: An Ontario (Canada) Case-study", Energy Policy 39, 1397-1409

Skeiker, K. (2009) "Optimum Tilt Angle and Orientation for Solar Collectors in Syria", Energy Convers Manage 50, 2439–48

SEFI/UNEP. Report, Global Trends in Sustainable Energy Investment [Online].Available, http://sefi.unep.org/english/globaltrends2009.html; 2009.

Sunvoltenergy Sp. z o.o. Sp. K. Ogrodowa 17, 61-821 Poznań, Poland, tel/fax: +48 61 222 59 88, email: office@sunvoltenergy.pl, 2013

http://www.fa.wikipedia.com