



تأثیر شیب پنل‌های فتوولتاییک بر میزان تابش دریافتی از خورشید

(مطالعه موردی: شهر مشهد)

زهرا طاهری^{۱*}، محمدحسین عباسپورفرد^۲، محمد طیبی زاده^۳ و حسین ابوترابی زارچی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، Zahra.taheri@ymail.com

۲ و ۳- به ترتیب دانشیار و استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- استادیار گروه برق و عضو هیأت علمی پژوهشکده هواخورد، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در این مقاله، شیب بهینه نصب پنل‌های فتوولتاییک برای شهر مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶/۱۶ درجه شمالی، براساس مدل ریاضی Liu & Jordan و به کمک داده‌های تابش اداره هواشناسی مشهد به دست آمد. نتایج نشان داد در شهر مشهد، نصب پنل خورشیدی با زاویه‌ی ثابت ۳۰ درجه رو به جنوب باعث می‌شود میزان تابش دریافتی سالیانه از خورشید، ۸ درصد نسبت به تابش افقی افزایش یابد. با تغییر فصلی شیب پنل (۴ بار در سال)، این افزایش به ۱۱ درصد خواهد رسید که در این حالت تقریباً بیشترین میزان تابش ممکن جذب خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: انرژی خورشیدی، پنل فتوولتاییک، شدت تابش، شیب

مقدمه

انرژی، مهمترین رکن توسعه و پیشرفت بشری در همه زمینه‌ها از صنعت گرفته تا کشاورزی و حمل و نقل می‌باشد. در میان انواع مختلف انرژی، انرژی خورشید، یکی از منابع تأمین انرژی رایگان، پاک و عاری از اثرات مخرب زیست محیطی است که از مهمترین کاربردهای آن می‌توان به تولید الکتریسیته به کمک سیستم‌های فتوولتاییک اشاره نمود. سیستم‌های فتوولتاییک به سبب داشتن مزایای بیشمار، به سرعت رو به گسترش هستند و روز به روز نقش مهمتری در تکنولوژی منابع تولید توان الکتریکی بازی می‌کنند. البته این سیستم‌ها علاوه بر مزایای فراوان دارای دو محدودیت اساسی می‌باشند: یکی بالا بودن هزینه و قیمت تجهیزات مورد استفاده و دیگری پایین بودن راندمان آن‌ها. شدت تابش خورشید، یکی از مهمترین عوامل تعیین کننده بازده سیستم‌های فتوولتاییک می‌باشد.

کره‌ی زمین انرژی خورشید را به صورت تابش خورشیدی دریافت می‌کند. به طور کلی میزان انرژی تابشی خورشید به دو عامل اصلی وابسته است: الف- زمان: ساعت، روز، روزسال (فصل) ب- مکان: عرض جغرافیایی. علاوه بر این نوع پوشش زمین و شرایط ابرناکی آسمان نیز بر میزان انرژی تابشی دریافتی از خورشید تأثیر دارند. بیشترین انرژی تابشی از خورشید زمانی حاصل می‌شود که پرتوهای خورشید به طور عمودی به سطح مورد نظر بتابند. از آنجایی که خورشید همیشه در آسمان در حال



حرکت است و هر روز مسیر متفاوتی را می‌پیماید و به علت تفاوت در زاویه تابش در هر منطقه طی روز و در روزهای مختلف سال، برای دریافت بیشترین انرژی تابشی مجبور به تغییر شیب و جهت دریافت کننده‌های خورشیدی از جمله پنل‌های فتوولتائیک هستیم. البته در برخی موارد از سیستم‌های ردیاب خورشیدی برای تعقیب کردن لحظه‌ای مسیر خورشید استفاده می‌شود که این روش به دلیل معایب و محدودیت‌هایی، همواره عملی نیست. راهکار جایگزین، استفاده از شیب و جهت بهینه برای نصب پنل‌هاست که مقدار آن در مناطق مختلف و در بازه‌های گوناگون سال متغیر می‌باشد. البته برای پنل‌های ثابت در مقایسه با پنل‌های ردیاب که بیشینه تشعشع خورشید را ردگیری می‌نمایند، جهت عمومی جنوبی در نیم‌کره شمالی، منطقی‌ترین جهت به منظور جمع‌آوری تشعشعات خورشیدی است.

پیش از این تحقیقات گسترده‌ای برای تعیین شیب بهینه دریافت کننده‌های خورشیدی، در نقاط گوناگون دنیا انجام شده که در تمام این تحقیقات مقدار شیب بهینه به صورت تابعی از عرض جغرافیایی مکان مورد مطالعه گزارش شده است (از قبیل طالبی زاده و همکاران، ۱۳۹۱؛ راشنگ و تانگ، ۲۰۰۴؛ حسین و همکاران، ۲۰۰۴؛ اولگن، ۲۰۰۶؛ مقدم و همکاران، ۲۰۱۱). در تحقیقی که در سال ۲۰۱۱ صورت گرفته است، لوبیتز نشان داد که در شرایط آب و هوایی مناسب، برای عرض‌های جغرافیایی کمتر از ۶۵ درجه، زاویه شیب بهینه سالیانه تقریباً $0/9$ عرض جغرافیایی محل می‌باشد. در برخی مناطق بهتر است زاویه شیب تعیین شده در تمام طول سال ثابت باشد اما گاهی اوقات برای دستیابی به راندمان بیشتر، می‌توان زاویه شیب را چندین بار در سال تغییر داد. طی تحقیقی در بررسی ماه‌های مختلف سال، روابطی برای تعیین شیب بهینه برحسب عرض جغرافیایی پیشنهاد شد (Nijegorodov, 1997). در سال ۱۳۹۱ طالبی زاده و همکاران، روابط ارائه شده توسط این محقق را برای شهرهای واقع در عرض جغرافیایی بین ۲۰ تا ۴۰ درجه شمالی بررسی نموده و روابط مناسب‌تری را پیشنهاد نمودند که در جدول ۱ این مقادیر با هم مقایسه شده‌اند.



جدول ۱. مقایسه بین روابط پیشنهادی مختلف برای تعیین شیب بهینه ماهیانه (طالبی زاده و همکاران، ۱۳۹۱، Nijegorovo)

1997;

ماه سال	Talebizadeh et al.,	Nijegorodov
January	$0.99\varphi + 24.63$	$0.89\varphi + 29$
February	$0.66\varphi + 26.28$	$0.97\varphi + 17$
March	$1.27\varphi - 8.64$	$\varphi + 4$
April	$0.89\varphi - 11.88$	$\varphi - 10$
May	$0.38\varphi - 9.37$	$0.93\varphi - 24$
June	$0.02\varphi - 2.92$	$0.87\varphi - 34$
July	$0.14\varphi - 4.22$	$0.89\varphi - 30$
August	$0.39\varphi - 0.41$	$0.97\varphi - 17$
September	$0.18\varphi + 23.08$	$\varphi - 2$
October	$0.66\varphi + 23.08$	$\varphi + 12$
November	$0.99\varphi + 23.19$	$0.93\varphi + 25$
December	$0.92\varphi + 29.18$	$0.87\varphi + 34$

φ عرض جغرافیایی محل برحسب درجه

بررسی های عبدل زاده و همکاران (۱۳۸۷) در شهر کرمان، نشان داد که مقادیر انرژی دریافتی از خورشید در یک سال به ترتیب با استفاده از زوایای بهینه مربوط به ماه، فصل و سال، در مقایسه با مقادیر انرژی دریافتی از خورشید در یک سال روی سطح افق، ۱۷٪، ۱۵/۹٪ و ۹/۳۶٪ افزایش یافته است. همچنین آزمایشاتی که توسط مقدم و همکاران (۲۰۱۱) در شهرهای زاهدان و بندرعباس صورت گرفت حاکی از آن است که اگر زاویه شیب بهینه تنها دو بار در سال تنظیم شود، نسبت به حالتی که سیستم در طول سال ثابت است، ۸٪ انرژی بیشتری دریافت می شود. شیب ثابت سالیانه برای کشور سوریه با عرض جغرافیایی ۳۲ تا ۳۷ درجه شمالی، ۳۰/۵۶ درجه پیشنهاد شده است، نتایج بررسی ها روی عملکرد کلکتورهای خورشیدی در این کشور نشان داد در مقایسه با کلکتورهایی که در یک سطح کاملاً افقی به طور ثابت نصب می شوند، استفاده از شیب بهینه کلکتور به صورت ماهیانه، فصلی و سالیانه به ترتیب ۲۸٪، ۲۶٪ و ۱۶٪ افزایش در میزان انرژی دریافتی از خورشید را به همراه دارد (Sheiker, 2009). آزمایشات صورت گرفته در شهر مدینه نیز نشان داد در صورت تنظیم شیب پنل‌های خورشیدی به صورت ماهیانه، در مقایسه با حالتی که در طول سال از یک شیب ثابت استفاده شود، ۸٪ انرژی بیشتری از خورشید به دست می آید (Benghanem, 2011). با توجه به اینکه میزان تابش خورشیدی به مقدار زیادی تابع موقعیت جغرافیایی و شرایط آب و هوایی محل می باشد، لازم است چنین مطالعاتی در هر منطقه به طور مجزا صورت گیرد. لذا در این مقاله شیب بهینه نصب پنل های خورشیدی برای شهر مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶/۱۶ درجه شمالی، براساس یک مدل ریاضی محاسبه شده است.

مواد و روش‌ها

تابش کل روی سطح شیبدار از مجموع سه مؤلفه به دست می‌آید که عبارتند از: تابش مستقیم، تابش پراکنده و تابش انعکاسی.

$$H_T = H_B + H_D + H_R = R \cdot H \quad (1)$$

در این رابطه H تابش کل روی سطح افق ($W \cdot m^{-2}$)، R ضریب تابش، H_T تابش کل روی سطح شیبدار ($W \cdot m^{-2}$)، H_B ، H_D و H_R نیز به ترتیب بیانگر تابش مستقیم، تابش پراکنده و تابش انعکاسی در سطح شیبدار می‌باشند.

مقدار تابش کل در سطح افق توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری در ایستگاه‌های هواشناسی در هر منطقه ثبت می‌شود. برای محاسبه تابش کل خورشید در سطوح شیبدار، مدل‌های ریاضی زیادی گسترش یافته‌اند. این مدل‌ها تنها تفاوتشان در نحوه‌ی محاسبه تابش پراکنده است (Liu and Jordan, 1960; Koronakis, 1986; Rindle *et al.*, 1990; Tian *et al.*, 2001; Badescu, 2002). رایج‌ترین مدل که در اکثر تحقیقات از آن استفاده شده است مدل Liu & Jordan می‌باشد که مقدار ضریب تابش در آن، از رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید:

$$R = \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) R_b + \frac{H_d}{H} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \rho \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (2)$$

R_b ضریب تابش مستقیم بوده که برای مناطق واقع در نیمکره شمالی از رابطه‌ی (۳) بدست می‌آید:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos\delta \sin\omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \sin(\varphi - \beta) \sin\delta}{\cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \sin\varphi \sin\delta} \quad (3)$$

در این رابطه δ بیانگر زاویه انحراف محور کروی زمین در روز مورد نظر می‌باشد:

$$\delta = 23.5 \sin \left[360 \times \frac{n}{365} \right] \quad (4)$$

n جمع روزهای سال از اول فروردین تا روز مورد نظر

زاویه طلوع خورشید در سطح افق (ω_s) و زاویه طلوع در سطح شیبدار (ω'_s) به ترتیب از روابط (۵) و (۶) قابل محاسبه است.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \quad (5)$$

$$\omega'_s = \min \left[\cos^{-1}(-\tan\varphi \cdot \tan\delta), \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \cdot \tan\delta) \right] \quad (6)$$

ضریب صافی هوا (K_{th})، بیانگر نسبت تابش کل در سطح افق به تابش روی همان سطح اگر در خارج از جو زمین قرار گرفته باشد، می‌باشد.

$$K_{th} = \frac{H}{H_0} \quad (7)$$

تابش فراجو (H_0) از رابطه‌ی (۸) قابل استحصال است:

$$H_0 = \frac{I_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (8)$$

I_{sc} ثابت خورشیدی است که مقدار آن در اکثر منابع ۱۳۶۷ وات بر متر مربع ذکر شده است.

برای پیش بینی نسبت تابش پراکنده به تابش کل (K_{dh})، مدل‌های ریاضی مختلفی وجود دارد، در تحقیقی، ابراهیم پور و همکاران (۱۳۸۸) به مقایسه‌ی برخی از این مدل‌ها پرداختند و نهایتاً مدل "Orgill and Hollands (1997)" را برای اقلیم‌های ایران مناسب تر اعلام کردند. در این مدل، نسبت تابش پراکنده به تابش کل با توجه به محدوده‌ی ضریب صافی هوا از رابطه‌ی (۹) به دست می‌آید:

$$\begin{cases} K_{dh} = 1.557 - 1.84K_{th} & 0.35 < K_{th} < 0.75 \\ K_{dh} = 1 - 0.249K_{th} & K_{th} < 0.35 \\ K_{dh} = 0.177 & K_{th} > 0.75 \end{cases} \quad (9)$$

ρ ضریب انعکاس زمین بوده که مقدار آن بسته به نوع پوشش محیط از ۰/۲ تا ۰/۸ متغیر است. در این مطالعه، مقدار این ضریب با توجه به پوشش سنگی زمین در محل انجام آزمایشات میدانی، ۰/۳ در نظر گرفته شد.

براساس معادلات ذکر شده، مقادیر ضریب صافی هوا و نسبت تابش پراکنده برای ماه‌های مختلف در شهر مشهد محاسبه گردید. مقادیر تابش کل روی سطح افق، برای سه سال متوالی (۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱) از اداره‌ی هواشناسی مشهد به دست آمد و میانگین گیری شد. نهایتاً با جایگذاری همه‌ی مقادیر در رابطه‌ی (۱) برای شیب‌های از ۰ تا ۹۰ درجه، زاویه در حالتی که تابش در آن از همه بیشتر شد به عنوان شیب بهینه در هر ماه در نظر گرفته شد. به کمک شیب به دست آمده برای هر ماه، شیب فصلی و سالیانه نیز محاسبه شد. برای بررسی صحت محاسبات صورت گرفته، آزمایشات میدانی در محل آزمایشگاه فتوولتائیک پژوهشکده هواخورشید مشهد صورت گرفت. بدین منظور از سه پنل خورشیدی مونو کریستال ساخت شرکت آریا سولار استفاده شد و متناسب با ابعاد این پنل‌ها ۳ سازه قابل تنظیم ساخته شد. مشخصات فنی این پنل‌ها در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲. مشخصات فنی پنل‌های مورد آزمایش

پارامتر	واحد	مقدار
ابعاد	میلی متر مکعب	۵۰ × ۸۱۰ × ۱۵۵۵
وزن	کیلوگرم	۱۶
تعداد سلول‌ها	عدد	۷۲
جریان بیشینه	آمپر	۴/۹۹
ولتاژ بیشینه	ولت	۴۰/۰۸
توان بیشینه	وات	۲۰۰



شکل ۱. تصویری از یکی از پنل‌های نصب شده برای انجام تست‌های میدانی و سلول مرجع (در سمت راست پنل) برای

اندازه‌گیری تابش خورشید

در هر ماه هر کدام از پنل‌ها روی شیب‌های محاسباتی سالیانه، فصلی و ماهیانه قرار گرفت و تابش رسیده به پنل‌ها به کمک سلول مرجع^۱، نصب شده در کنار پنل ثبت گردید. هر سه پنل رو به جنوب نصب شدند. داده برداری‌ها از ساعت ۹ الی ۱۴ با فاصله زمانی یک ساعت انجام می‌شد و در پایان با میانگین‌گیری داده‌ها، تابش به دست آمده توسط هر سه پنل در طول ساعات داده برداری با هم مقایسه شد که برخی از این داده‌ها در قسمت نتایج ذکر شده‌اند.

نتایج و بحث

باتوجه به اینکه شهر مشهد در نیمکره شمالی زمین واقع شده است، بنابراین مناسب‌ترین جهت برای قرارگیری پنل‌های خورشیدی، رو به جنوب می‌باشد. اما برای تعیین بهترین شیب براساس مدل ریاضی پیشنهادی و با کمک روابط ذکر شده در بخش مواد و روش‌ها، محاسبات لازم صورت گرفت که نتایج آن، در جداول ۳ و ۴ قابل مشاهده است.

^۱ مدل HT304N ساخت کشور ایتالیا

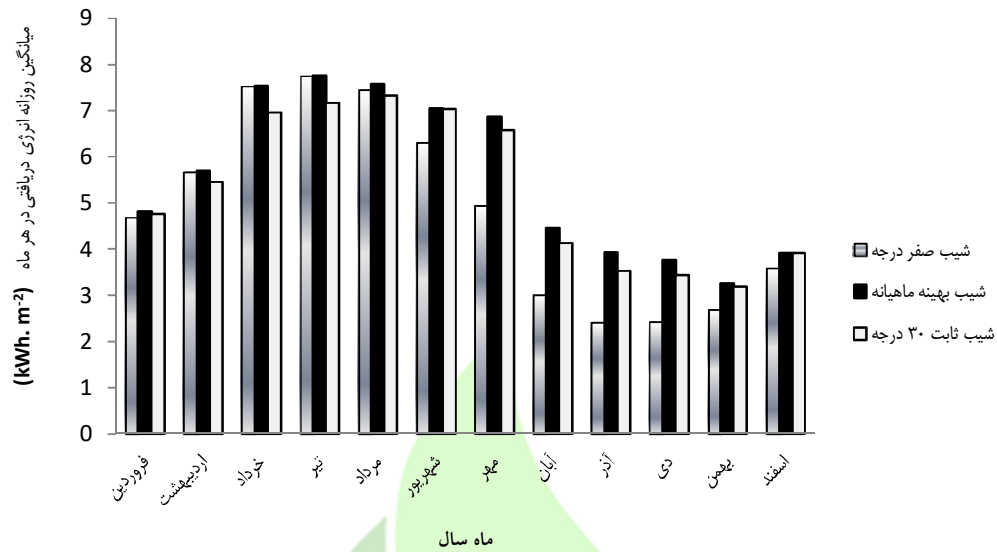


جدول ۳. ضرایب صافی هوا و نسبت تابش پراکنده محاسبه شده برای ماه های مختلف در مشهد

ماه	K_{th}	K_{dh}
فروردین	۰/۴۸	۰/۶۷
اردیبهشت	۰/۵۰	۰/۶۴
خرداد	۰/۶۳	۰/۴۰
تیر	۰/۶۶	۰/۳۴
مرداد	۰/۷۰	۰/۲۷
شهریور	۰/۷۱	۰/۲۵
مهر	۰/۷۲	۰/۲۳
آبان	۰/۵۸	۰/۴۹
آذر	۰/۵۶	۰/۵۳
دی	۰/۵۴	۰/۵۶
بهمن	۰/۴۷	۰/۶۹
اسفند	۰/۴۷	۰/۶۹

جدول ۴. مقادیر زاویه شیب و متوسط انرژی روزانه در هر ماه براساس زوایای بهینه ماهیانه، فصلی و سالیانه

ماه	شیب بهینه ماهیانه (درجه)	میانگین روزانه انرژی استحصالی ($kWh \cdot m^{-2}$)	شیب بهینه فصلی (درجه)	میانگین روزانه انرژی استحصالی ($kWh \cdot m^{-2}$)	شیب بهینه سالیانه (درجه)	میانگین روزانه انرژی استحصالی ($kWh \cdot m^{-2}$)
فروردین	۱۸	۴/۸۱		۴/۷۶		۴/۷۵
اردیبهشت	۵	۵/۶۹	۷	۵/۶۹		۵/۴۶
خرداد	۰	۷/۵۲		۷/۴۷		۶/۹۶
تیر	۰	۷/۷۵		۷/۶		۷/۱۷
مرداد	۱۲	۷/۵۶	۱۴	۷/۵۵		۷/۳۲
شهریور	۳۰	۷/۰۴		۶/۸۴	۳۰	۷/۰۴
مهر	۴۸	۶/۸۶		۶/۸۴		۶/۵۸
آبان	۵۵	۴/۴۵	۵۴	۴/۴۵		۴/۱۴
آذر	۶۰	۳/۹۳		۳/۹۲		۳/۵۳
دی	۵۹	۳/۷۷		۳/۷		۳/۴۴
بهمن	۴۴	۳/۲۵	۴۵	۳/۲۵		۳/۱۹
اسفند	۳۱	۳/۹۱		۳/۵۸		۳/۹۱



شکل ۲. مقایسه بین انرژی استحصالی در ماه‌های مختلف برای شیب صفر، شیب ماهیانه و شیب ۳۰ درجه در مشهد.

به کمک شیب‌های به دست آمده در بازه‌های زمانی مختلف (جدول ۴)، در هر ماه سه پیل در شیب‌های مختلف ماهیانه، فصلی و سالیانه قرار گرفت و میزان تابش میانگین روزانه در هر وضعیت با هم مقایسه گردید. باتوجه به فراوانی داده‌ها، به طور تصادفی داده‌های مربوط به یکی از روزهای ماه‌های خرداد، تیر، شهریور و مهر به‌عنوان نمونه در جداول ۵ تا ۸ ذکر شده‌اند.



جدول ۶. نتایج داده برداری ها در تاریخ ۹۲/۴/۸

شیب قرارگیری پنل	تابش میانگین روزانه (W.m ⁻²)
ماهیانه (صفر درجه)	۹۰۹/۲۷
فصلی (۱۴ درجه)	۸۶۳/۹۴
سالیانه (۳۰ درجه)	۷۳۴/۷۳

جدول ۵. نتایج داده برداری ها در تاریخ ۹۲/۳/۶

شیب قرارگیری پنل	تابش میانگین روزانه (W.m ⁻²)
ماهیانه (صفر درجه)	۹۴۹/۸۷
فصلی (۷ درجه)	۹۴۵/۸۰
سالیانه (۳۰ درجه)	۸۹۲/۹۳

جدول ۸. نتایج داده برداری ها در تاریخ ۹۲/۷/۲۳

شیب قرارگیری پنل	تابش میانگین روزانه (W.m ⁻²)
ماهیانه (۴۸ درجه)	۹۱۱/۶۷
فصلی (۵۴ درجه)	۸۷۶/۶۷
سالیانه (۳۰ درجه)	۸۵۳/۰۰

جدول ۷. نتایج داده برداری ها در تاریخ ۹۲/۶/۴

شیب قرارگیری پنل	تابش میانگین روزانه (W.m ⁻²)
ماهیانه و سالیانه (۳۰ درجه)	۹۴۸/۰۰
فصلی (۱۴ درجه)	۹۲۹/۲۰
افقی	۸۶۹/۲۰

همانطور که انتظار می رفت و نتایج جداول ۵ تا ۸ نیز نشان می دهد، میانگین تابش روزانه روی پنل با شیب ماهیانه و شیب فصلی از شیب ثابت سالیانه بیشتر می باشد. این موضوع بیانگر این است که با تغییر شیب پنل در ماه‌های مختلف سال می توان میزان تابش بیشتری از خورشید دریافت نمود.

نتیجه گیری

در جدول ۹ مقایسه ای بین دوره های زمانی مختلف تنظیم شیب و مجموع انرژی استحصالی سالیانه در هر حالت نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد در صورت استفاده از شیب فصلی، تنها ۴ بار در سال نیاز به تغییر زاویه شیب پنل هاست در حالیکه انرژی استحصالی در طول سال در مقایسه با تنظیم ماهیانه (۱۲ بار در سال) تنها یک درصد کاهش می یابد. لذا دوره‌ی تنظیم شیب به صورت فصلی برای دست یابی به بیشترین میزان تابش خورشیدی شهر مشهد پیشنهاد می شود.

جدول ۹. مقایسه بین شیب های مختلف و تأثیر آن در میزان تابش دریافتی سالیانه

شیب مورد استفاده	صفر	سالیانه	فصلی	ماهیانه
مجموع انرژی سالیانه (kWh. m ⁻²)	۱۷۸۹/۳	۱۹۳۹/۴۹	۲۰۰۵/۸۳	۲۰۳۲/۶۶
درصد افزایش تابش دریافتی نسبت به افق	۰	٪۸	٪۱۱	٪۱۲

سیاسگزاری

از همکاری و حمایت اعضای محترم بخش فتوولتائیک پژوهشکده هواخورشید دانشگاه فردوسی مشهد به ویژه پرسنل آزمایشگاه تست میدانی فتوولتایی، جناب آقایان مهندس حمیدرضا صادقی شقاقی، مهندس معین چوبینه و مهندس حامد شفاعتی و همچنین از زحمات پرسنل محترم کارگاه ماشین‌های کشاورزی به ویژه جناب آقای محمود متقیان در زمینه ساخت و نصب سازه‌ها تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

۱. ابراهیم پور، ع.، معرفت، م.، نیری، ه. ۱۳۸۸. مقایسه روش‌های مختلف پیش‌بینی تابش دیفیوز برای اقلیم‌های ایران. مجله علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی. ۲۱-۱: (۲۷).
۲. طالبی زاده، پ.، محرابیان، م. ا. و عبدل زاده، م. ۱۳۹۱. تأثیر زوایای خورشیدی بر روی انرژی دریافتی کلکتورهای خورشیدی. نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی. ۲۳-۱۲: (۴).
۳. عبدل زاده، م.، جعفری، س.، رهنما، م. و عامری، م. ۱۳۸۷. تعیین زاویه بهینه پانل‌های خورشیدی ثابت برای دریافت بیشترین انرژی تشعشی در شهر کرمان. نشریه بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران. ۹۸-۹۱: (۱۰).
4. Badescu, V. 2002. A new kind of cloudy sky model to compute instantaneous values of diffuse and global solar irradiance. *Theoretical and Applied Climatology*. 72:127-136.
5. Benghanem, M. 2011. Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia. *Applied Energy*. 88: 1427-1433.
6. Hussein, H. M. S., Ahmad, G. E. and El-Ghetany, H. H. 2004. Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations. *Energy Conversion and Management*. 45: 2441-2452.
7. Koronakis, S. 1986. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area. *Solar Energy*. 36 (3): 217-225.
8. Lubitz, W. D. 2011. Effect of manual tilt adjustments on incident irradiance on fixed and tracking solar panels. *Applied Energy*. 88: 1710-1719.
9. Liu, B. Y. H., Jordan, R. C. 1960. The interrelationship and characteristics and distribution of direct, diffuse and total solar radiation, *Solar Energy*. 4 (3): 1-19.
10. Moghadam, H., Farshchi Tabrizi, F. and Zolfaghari Sharak, A. 2011. Optimization of solar flat collector inclination. *Desalination*. 265: 107-111.
11. Nijegorodov, N., Adedoyin, J. A., Devan, K. R. S. 1997. A new analytical-empirical model for the instantaneous diffuse radiation and experimental investigation of its validity. *Renewable Energy*, 11 (3): 341-350.

12. Reindel, D. T., Beckman, W. A., and Duffie, J. A. 1990. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy*. 45 (1): 9-17.
13. Runsheng T. Tong, W. 2004. Optimum tilt angle for solar collectors used in China. *Applied Energy*. 79 (3): 239-248.
14. Skeiker, K. 2009. Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Syria. *Energy Conversion and Management*. 50: 2439-2448.
15. Tian, Y. Q., Davies-Colley, R. J., Gong, P., Thorrold, B. W. 2001. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. *Agriculture and Forest Meteorology*. 109 (1): 67-74.
16. Ulgen, K. 2006. Optimum tilt angle for solar collectors. *Energy sources, part A: recovery, utilization and environmental effects*. 28 (13): 1171-1180.

Effect of Photovoltaics Panel's Tilt Angle on Catchable Solar Radiation (Case Study: Mashhad Region)

Zahra Taheri^{1*}, Mohammad Hossein Abbaspour-Fard², Mohammad Tabasizadeh³,
Hossein Abootorabi Zarchi⁴

1- MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad
Zahra.taheri@ymail.com

2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

3- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

4- Assistant Prof., College of Engineering & Academic member of Sun-Air Research Institute,
Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Abstract

In this paper, the optimum tilt angle of photovoltaic panels installation in Mashhad city with latitude of 36.16° North is determined according to the mathematical model of Liu & Jordan and the meteorological data of the region. The calculations show that in Mashhad, installing of south-facing panel with fixed tilt angle of 30°, increases the annual catchable solar energy by 8% when compare with the horizontal facing of the panel. By seasonal changing of the tilt angle (four times per year), the annual catchable radiation can increase up to 11%. That is almost the maximum amount of radiation may be absorbed.

Keywords: Solar Energy, Photovoltaic Panel, Radiation Intensity, Tilt Angle.