

## تعیین زاویه بهینه برای گردآورهای خورشیدی صفحه تخت و صفحات فتوولتایی در استان خوزستان

روح اله فرهادی\*

استادیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران، farhadi@asnruk.ac.ir

مرتضی تکی

دانشیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران، mtaki@asnruk.ac.ir

مجید رهنما

دانشیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران، rahnamam2002@asnruk.ac.ir

### چکیده

گردآورهای خورشیدی و صفحات فتوولتایی به طور معمول با زاویه‌ای ثابت نسبت به افق، مقابل خورشید قرار داده می‌شوند. زاویه بهینه، تأثیر بسزایی در دریافت بیشینه انرژی دارد. از آنجایی که بررسی جامعی برای تعیین زاویه بهینه در استان خوزستان صورت نگرفته است، در این پژوهش مراکز شهرستان‌های استان خوزستان شامل بیست و شش شهر مد نظر قرار گرفتند. میزان انرژی دریافتی روی سطح شیب‌دار بر اساس متوسط ۱۶ ساله داده‌های تابش خورشیدی و مدل ایزوتروپیک و غیر ایزوتروپیک (مدل HDKR) محاسبه شد. زوایای مختلف از ۲۰ تا ۹۰ درجه با گام ۰/۱ با استفاده از کدهای فرترن امتحان و زاویه متناظر با بیشینه انرژی دریافتی به عنوان زاویه بهینه تعیین گردید. مقایسه نتایج به دست آمده با پژوهش‌های پیشین نشان داد مدل HDKR عملکرد بهتری دارد و میانگین زاویه بهینه شهرستان‌های استان خوزستان به صورت تقریبی ۲۶ درجه با انحراف معیار ۰/۸ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: انرژی، افت، پنل خورشیدی، فرترن، مدل ایزوتروپیک، مدل HDKR.

## Determination of Optimum Tilt Angle for Flat-Plate Solar Collectors and Photovoltaic Panels in Khuzestan Province

R. Farhadi

Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

M. Taki

Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

M. Rahnama

Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

### Abstract

Solar collectors and photovoltaic panels are usually exposed to the sun at a fixed angle relative to the horizon. The optimal angle has a significant effect on receiving maximum energy. Since there is not a comprehensive study to determine the optimal angle in Khuzestan province, in this research, the centers of counties in Khuzestan province, including twenty-six cities, were considered. The energy received on an inclined surface was calculated based on the average of 16 years of solar radiation data and the isotropic and non-isotropic models (HDKR model). Different angles from -20 to 90 degrees with a step of 0.1 were examined using Fortran codes, and the angle corresponding to the maximum received energy was determined as an optimal angle. Comparing the obtained results with previous studies showed that the HDKR model has better performance, and the average optimal angle of the cities of Khuzestan province was approximately 26 degrees with a standard deviation of 0.8 degrees.

**Keywords:** Energy, Fortran, HDKR model, Isotropic model, Loss, Solar panel.

### ۱- مقدمه

برداشتن در راستای توسعه انرژی خورشیدی در ایران به خصوص مناطق جنوبی با توجه به پتانسیل موجود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گردآورهای خورشیدی و صفحات فتوولتایی دو ابزار متداول برای تبدیل انرژی خورشیدی به ترتیب به گرما و الکتریسیته هستند. گردآورهای خورشیدی صفحه تخت به واسطه ساختار ساده‌تر و قیمت ارزانتر مرسوم‌اند و به طور وسیع استفاده می‌شوند. از آنجایی که این گردآورها معمولاً با زاویه‌ای ثابت نسبت به افق، مقابل خورشید قرار می‌گیرند، به منظور کسب بیشینه انرژی دریافتی لازم است زاویه تمایل بهینه برای آنها تعیین گردد. صفحات فتوولتایی نیز چنانچه از ریباب خورشیدی استفاده نکنند، با زاویه‌ای ثابت نسبت به افق نصب می‌شوند که ضروری است برای دستیابی به بیشینه عملکرد، بهترین زاویه ممکن

انرژی بدون شک یکی از مهم‌ترین و کلیدی‌ترین عوامل در توسعه و پیشرفت است. از آنجایی که منابع انرژی فسیلی محدود هستند، ضروری است برای آینده به فکر منابع پایدار و مطمئن بود. خورشید منبعی رایگان، فراوان، پاک، در دسترس و پایدار است که تا ۵ میلیارد سال آینده می‌تواند تأمین‌کننده انرژی زمین باشد [۱]. مطالعه نقشه پهنه‌بندی ایران نشان می‌دهد که ۷۰/۹ درصد از مناطق ایران قابلیت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی را دارند و حدود ۲۳/۳ درصد گستره کشور که بیشتر شامل بخش‌های جنوبی است از استعداد بالاتری برای استفاده از انرژی تجدیدپذیر خورشیدی برخوردار هستند [۲]. لذا گام

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: farhadi@asnruk.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۲/۰۴/۲۱

تاریخ پذیرش: ۰۲/۰۷/۲۰

برای آن انتخاب گردد. بنابراین مسئله مورد بررسی در این پژوهش، تعیین بهترین زاویه نصب برای گردآورهای صفحه تخت و صفحات فتوتولتایی در نقاط مختلف استان خوزستان به منظور دریافت بیشترین میزان تابش و افزایش راندمان انرژی است. لذا هدف این پژوهش تعیین زاویه بهینه گردآورهای صفحه تخت و صفحات فتوتولتایی در مراکز شهرستان‌های استان خوزستان از دو روش ایزوتروپیک و غیر ایزوتروپیک می‌باشد.

به عنوان یک قاعده تقریبی و سرانگشتی، برای دستیابی به حداکثر تابش دریافتی در سال، زاویه سطح شیبدار نسبت به افق باید به گونه‌ای تنظیم شود که برابر با عرض جغرافیایی باشد. در تابستان، تقریباً ۱۰ تا ۱۵ درجه کمتر از عرض جغرافیایی و در زمستان، تقریباً ۱۰ تا ۱۵ بیشتر از عرض جغرافیایی توصیه شده است [۳]. اما این توصیه فقط یک تقریب است و زمانی استفاده می‌شود که اطلاعات دیگری در دست نباشد. لذا پژوهش‌های بسیاری برای نقاط مختلف دنیا جهت یافتن زاویه بهینه انجام شده است که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود. البته در بین پژوهش‌های پیشین، آنهایی که در محدوده جغرافیایی ایران قرار دارند مد نظر قرار می‌گیرد. در تحقیقی زاویه بهینه صفحات خورشیدی در شهر کرمان محاسبه شد و با استفاده از روش ایزوتروپیک بهینه مقدار سالانه ۲۷/۳۵ درجه گزارش گردید. در ادامه بررسی‌ها مشخص شد چنانچه زاویه بهینه بر حسب ماه، فصل و سال تنظیم گردد به ترتیب ۱۷، ۱۵/۹، و ۹/۳۶ درصد افزایش انرژی دریافتی نسبت به سطح افقی به دست می‌آید [۴]. نتایج پژوهش دیگری، زاویه بهینه سالانه را ۲۷/۳ درجه برای گردآور خورشیدی صفحه تخت در شهر کرمان گزارش کرد. نتایج این تحقیق نشان داد، تغییر زاویه شیب ماهانه، فصلی و سالانه به ترتیب به افزایش ۲۳/۹، ۲۲/۶ و ۱۴/۵ درصد انرژی دریافتی سالانه منجر می‌شود [۵]. در پژوهش‌های دیگری برای شهر کرمان زاویه بهینه سالانه ۳۰ [۶]، ۳۱/۴۸ [۷]، ۲۸/۸۳ [۸] درجه گزارش شده است. زاویه شیب مطلوب ماهانه، فصلی و سالانه برای بدست آوردن حداکثر تابش کلی خورشید با استفاده از مدل ایزوتروپیک و مد نظر قرار گرفتن ۱۲ مدل ترکیبی تابش پخشی برای شهر کرمان پیشنهاد شد. زاویه بهینه شیب ماهانه از صفر درجه (می، ژوئن و جولای) تا ۶۰ درجه (دسامبر) متغیر است. زاویه شیب بهینه فصلی بین ۴ درجه (بهار) تا ۵۳ درجه (پاییز) و بهترین زاویه شیب سالانه ۲۹ درجه گزارش شد [۹]. همچنین بررسی زاویه بهینه برای گردآورهای تخت در شهر کرمان نشان داد، زاویه شیب بهینه ۳۲ درجه در طول سال مناسب است. این زاویه برای شش ماهه اول سال ۷ درجه و برای شش ماهه دوم سال ۵۳ گزارش شد. همچنین گردآورهای قائم نیز کمترین تابش دریافتی را در طول سال به خود اختصاص دادند [۱۰]. حداقل و حداکثر زاویه بهینه گردآور در اصفهان به ترتیب ۰/۱۵ و ۵۷/۷۴ درجه محاسبه و زاویه شیب بهینه سالانه ۲۸/۸۴ توصیه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که تابش کل خورشید در یک گردآور خورشیدی چنانچه بر اساس زاویه بهینه ماهانه، فصلی و سالانه تنظیم شود به ترتیب ۲۵، ۲۱ و ۱۴/۷۶ درصد نسبت به حالتی که گردآور خورشیدی دارای شیب ثابت صفر است، افزایش می‌یابد [۱۱]. در پژوهش‌های دیگری بهینه زاویه سالانه ۳۲ [۶] و ۲۹/۹۱ [۸] برآورد گردیده است. در پژوهشی برای شهر کاشان که فاقد اطلاعات تجربی خورشیدی بود به دلیل تشابه اقلیمی با اصفهان، از متوسط ماهیانه

تابش روزانه اندازه‌گیری شده دراز مدت در ایستگاه اصفهان، برای محاسبه زاویای شیب بهینه استفاده شد. نتایج نشان داد برای بهترین بهره‌برداری، تنظیم شیب حداقل هر ماه یکبار لازم است و زاویه بهینه حداکثر و حداقل به ترتیب ۶۰ درجه برای ماه آذر و صفر درجه برای دو ماه خرداد و تیر می‌باشد. این زاویه برای تنظیم ثابت فصلی در بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۳، ۱۴، ۵۳ و ۴۸ درجه و برای تنظیم ثابت در شش ماه اول و دوم سال به ترتیب ۹ و ۵۱ و برای تنظیم ثابت سالانه ۲۹ درجه گزارش شد [۱۲]. پژوهشی برای شهر یزد صورت گرفت و میانگین زاویه شیب بهینه ماهانه برای یک گردآور خورشیدی در طول یک سال با حداکثر مقدار ۶۰/۴ درجه در دسامبر و کمترین مقدار ۷/۰۸ درجه در ژوئن گزارش شد. بعلاوه، نتایج نشان داد که میانگین زاویه مطلوب شیب در یزد برای ماه‌های زمستان ۲۱/۵۷ درجه و برای ماه‌های تابستان به صورت تقریبی برابر با سطح افقی است. همچنین زاویه شیب بهینه سالانه ۲۹/۳۸ درجه برای سطحی رو به سوی جنوب تعیین شد. تغییر زاویه شیب ۱۲ بار در سال (یعنی استفاده از شیب مطلوب ماهانه) منجر به افزایش دریافت سالانه تابش خورشید به میزان ۳۳/۲۱ درصد نسبت به صفحه افقی شد. نتایج کلی این تحقیق نشان داد که چنانچه تغییر زاویه شیب چهار بار در سال (یعنی استفاده از زاویه شیب بهینه فصلی) اعمال شود، افزایش ۳۱/۶۸ درصد دریافت تابش خورشیدی حاصل خواهد شد [۱۳]. در پژوهش‌های دیگری زاویه بهینه سالانه ۳۱ درجه [۶]، ۳۳/۷ درجه [۷] و ۳۰/۴۶ درجه [۸] پیشنهاد شده است. در پژوهشی بهینه زاویه سالانه گردآور صفحه تخت برای تعدادی از شهرهای مختلف به شرح زیر گزارش شد [۶]. تبریز و ارومیه: ۳۵ درجه، رشت: ۳۲، زنجان: ۳۴، قائمشهر: ۲۹، مشهد و تهران: ۳۳، کرمانشاه: ۳۲، شیراز و زاهدان: ۲۹، بوشهر و بندرعباس: ۲۷. پژوهشی دیگری برای شهر مشهد، زاویه بهینه گردآور صفحه تخت به کار رفته در یک آب شیرین‌کن خورشیدی را ۳۲/۵ درجه پیشنهاد نمود [۱۴]. برای مناطق گرم و خشک ایران بر اساس داده‌های تجربی، زاویه شیب بهینه گردآورهای خورشیدی محاسبه شد. نتایج زاویه بهینه سالانه برای شهرهای زاهدان، بیرجند و طبس به ترتیب عبارت بودند از: ۳۰/۴۸، ۳۴/۴۵ و ۳۴/۰۲ درجه [۷]. با توجه به تحقیقات صورت گرفته بر اساس داده‌های هواشناسی دراز مدت، زاویه بهینه و عدم قطعیت آن برای تعدادی از شهرها مشخص شده است. نتایج نشان داد که عدم قطعیت زاویه‌های بهینه در برخی از شهرها خیلی زیاد است. لذا در تنظیم زاویه بهینه باید توجه بیشتری شود. عدم قطعیت زاویه شیب مطلوب در مناطق سردسیر، تغییرات بیشتری نسبت به مناطق گرم و خشک داشت؛ زیرا آب و هوا در شهرهای سردسیر به طور معمول از پایداری کمتری نسبت به مناطقی با آب و هوای گرم و خشک برخوردار است [۸]. فرهادی و تاکی [۱۵] با در نظر گرفتن مدل ایزوتروپیک، شاخص صافی هوا: ۰/۷۵ و نسبت تابش پخشی به تابش کل: ۰/۲ و بررسی اثر سایه در گردآورهای صفحه تخت، زاویه بهینه را به صورت تقریبی ۵ تا ۱۰ درجه کمتر از عرض جغرافیایی گزارش کردند. تحقیقات محدودی برای تعیین زاویه بهینه گردآورهای صفحه تخت در استان خوزستان صورت گرفته است. در پژوهشی زاویه بهینه برای اهواز در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۴/۸، ۱۲/۵، ۵۲/۳ و ۴۳/۹ درجه پیشنهاد و میزان زاویه بهینه سالانه ۲۸/۴ درجه گزارش شد [۱۶]. شهر دیگر استان خوزستان که

## ۲-۲- مدل ایزوتروپیک

تابش دریافت شده در سطح زاویه‌دار از رابطه (۱) محاسبه شد [۲۴]:

$$H_t = (H - H_d) \bar{R}_b + H_d \left[ \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + H \rho_g \left[ \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (1)$$

که در آن  $H_t$ : تابش کل روزانه دریافتی در سطح شیب‌دار،  $H$ : تابش کل روزانه دریافتی در سطح افقی،  $H_d$ : تابش پخشی دریافت شده در سطح افقی،  $\beta$ : زاویه شیب،  $\rho_g$ : انعکاس تابش خورشید از زمین (۰/۲) و  $\bar{R}_b$ : متوسط فاکتور شیب تابش مستقیم است و برای صفحه شیب‌داری که به صورت مستقیم به سمت استوا باشد از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲۵]. نظر به اینکه گردآور به سوی جنوب قرار می‌گیرد در این شرط صدق می‌کند.

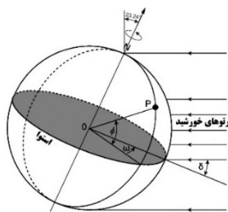
$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin(\omega_s) + \omega_s \sin(\varphi - \beta) \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta)} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $\varphi$ : عرض جغرافیایی،  $\delta$ : زاویه میل خورشید و  $\omega_s$ :

زاویه ساعت روی سطح شیب‌دار و کمینه دو مقدار رابطه (۳) است:

$$\omega_s = \min\{\omega_s, \cos^{-1}[-\tan(\varphi - \beta) \tan(\delta)]\} \quad (3)$$

شکل ۱ سه زاویه عرض جغرافیایی ( $\varphi$ )، زاویه میل خورشید ( $\delta$ ) و زاویه ساعت ( $\omega$ ) را برای نقطه P نشان می‌دهد. زاویه میل خورشید عبارت است از موقعیت زاویه‌ای خورشید در ظهر خورشیدی (یعنی زمانی که خورشید در نصف النهار محلی قرار دارد) نسبت به صفحه استوا که مقادیر آن در نیم کره شمالی مثبت است. زاویه ساعت نیز به این صورت تعریف می‌شود: جابجایی زاویه ای خورشید در شرق یا غرب نصف النهار محلی به دلیل چرخش زمین حول محور خود با سرعت ۱۵ درجه در ساعت که مقادیر صبح منفی و بعد از ظهر مثبت هستند [۲۴].



شکل ۱- زوایای خورشید برای نقطه P روی سطح زمین [۲۶].

زاویه میل خورشید بر حسب رادیان از رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos(\Gamma) + 0.070257 \sin(\Gamma) - 0.006758 \cos(2\Gamma) + 0.000907 \sin(2\Gamma) - 0.002697 \cos(3\Gamma) + 0.00148 \sin(3\Gamma) \quad (4)$$

که در آن  $\Gamma$  زاویه روز بر حسب رادیان است و از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\Gamma = \frac{2\pi(N - 1)}{365} \quad (5)$$

و  $N$  شماره روز سال بر حسب تقویم میلادی است.

تنها متغیر باقیمانده در رابطه (۲)،  $\omega_s$  (زاویه ساعت در غروب آفتاب) است که از رابطه (۶) به دست می‌آید [۲۵]:

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (6)$$

برای زاویه بهینه در آن پژوهشی انجام شده، آبادان است که مقدار سالانه زاویه بهینه ۳۴ درجه برای آن پیشنهاد شده است [۶].

اکنون به پژوهش‌های انجام شده در رابطه با زاویه بهینه برای صفحات خورشیدی پرداخته می‌شود. بررسی زاویه بهینه پنل‌های خورشیدی برای جزیره کیش نشان داد متوسط ماهانه شیب مناسب پنل‌های خورشیدی برای ژوئن حداقل ۴ درجه و برای ژانویه و دسامبر حداکثر ۵۰ درجه نسبت به امتداد افق است و با اعمال زاویه مناسب برای پنل‌ها، مقدار تابش در ماه ژانویه و دسامبر به ترتیب ۴۸ و ۵۵ درصد افزایش نشان می‌دهد. میزان افزایش متوسط سالانه در سطح پنل ۱۵/۲ درصد بیشتر نسبت به سطح افقی گزارش شد [۱۷]. در تحقیقی مشابه، زاویه بهینه پنل‌های خورشیدی در شهر مشهد برای تنظیم فصلی در بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۱۵، ۵، ۴۱ و ۴۹ درجه و زاویه مناسب برای تنظیم سالانه ۲۸ درجه گزارش شد. همچنین در حالت کلی در یک سیستم تک محوره در کل سال مجموع انرژی بدست آمده نسبت به انرژی دریافتی روی سطح افق ۱۸ درصد افزایش نشان داد [۱۸]. پژوهش دیگری در رابطه با تحلیل شیب و آریزوت بهینه برای نصب پنل فتوولتایی بر اساس تابش دریافتی خورشید در شهرستان کاشان انجام گرفت. با مقایسه نتایج، مشخص شد که راستای نصب پنل فتوولتایی هر چه از جنوب به سمت شرق یا غرب تغییر کند، شدت تابش در روزهای سال کاهش بیشتری خواهد داشت. بیشترین بازده تولید انرژی فتوولتایی در شهرستان کاشان در راستای رو به جنوب و با زاویه نصب پنل فتوولتایی ۳۰ درجه نسبت به خط افق حاصل شد. همچنین مناسب‌ترین شیب برای نصب پنل‌ها بین ۳۰ تا ۴۰ درجه، نسبت به سایر شیب‌ها به دست آمد [۱۹]. در تحقیق دیگری، زاویه مناسب برای پنل‌های خورشیدی در ۳۱ مرکز استان مطالعه و متوسط سالانه زاویه مناسب برای شهر اهواز در محدوده ۳۰-۲۷ درجه توصیه شد [۲۰]. بررسی چند مدل غیر ایزوتروپیک برای گردآورهای صفحه تخت و سلول‌های خورشیدی در تعدادی از شهرهای ایران انجام و زاویه بهینه برای شهر اهواز ۲۵ تا ۲۹ درجه پیشنهاد شد [۲۱]. برخی پژوهش‌ها نیز رابطه‌ای کلی برای زاویه بهینه بر حسب عرض جغرافیایی ارائه کرده اند که می‌توان در کل کشورها یا نیم‌کره شمالی و جنوبی از آن استفاده نمود [۲۲، ۲۳].

نتایج بررسی منابع نشان داد که آبادان و اهواز تنها شهرهایی از استان خوزستان هستند که زاویه بهینه برای آن پیشنهاد شده است. لذا بررسی جامع و کلی استان خوزستان به عنوان منطقه‌ای با قابلیت دریافت تابش خورشید مناسب موضوعی است که در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود.

## ۲- مواد و روش پژوهش

### ۲-۱- تابش روی سطح شیب‌دار

دو مدل ایزوتروپیک و غیر ایزوتروپیک برای محاسبه تابش روی سطوح شیب‌دار وجود دارد. مدل ایزوتروپیک ساده‌ترین مدل است و در آن فرض می‌شود مجموع تابش پراکنده از آسمان و تابش منعکس شده از زمین بر روی سطح شیب‌دار بدون توجه به جهت، یکسان است. مدل ایزوتروپیک در مواردی تابش را کمتر برآورد می‌کند. از این رو مدل‌های غیر ایزوتروپیک نیز بررسی شده‌اند [۲۴].

اکنون تمامی متغیرها معرفی شدند و میزان تابش روی سطح شیبدار قابل محاسبه است.

از آنجایی که روابط ذکر شده برای محاسبه میزان تابش خورشیدی رسیده به یک سطح شیبدار به کار رفته است و در صفحات خورشیدی نیز ملاک محاسبه زاویه بهینه دریافت بیشینه تابش خورشیدی رسیده به صفحه است، همین معادلات برای صفحات خورشیدی نیز استفاده شد [۲۷].

تنها ورودی‌های لازم برای محاسبه تابش طبق فرمول‌های مذکور، تابش پخشی و تابش کل روی سطح افقی است. از آنجایی که این اطلاعات در شهرستان‌های استان خوزستان وجود ندارند، داده‌های ماهواره‌ای استفاده و متوسط شانزده ساله (۲۰۲۰-۲۰۰۵) آن استخراج شد. میانگین‌گیری داده‌ها با استفاده از کدهای Fortran در نرم افزار CodeBlocks ورژن 20.03 و کامپایلر GNU انجام گرفت.

### ۲-۳- مدل غیر ایزوتروپیک

مدل‌های مختلفی برای حالت غیر ایزوتروپیک وجود دارد. برای صفحات شیبداری که به سمت خط استوا قرار می‌گیرند، مدل HDKR توصیه شده است [۲۴]. از آنجایی که جهت گردآور و صفحات خورشیدی در این پژوهش به سمت جنوب قرار می‌گیرد لذا مدل HDKR برای محاسبه تابش در سطح شیبدار انتخاب شد. مقدار تابش متوسط روزانه در سطح شیبدار از رابطه (۷) طبق این مدل به دست می‌آید. این رابطه برای داده‌های ساعتی ارائه شده است اما در اینجا به علت ماهیت روزانه بودن داده‌ها، رابطه به حالت روزانه تعمیم داده شده است و  $R_b$  از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲۴، ۲۸].

$$H_t = (H_b + H_d A_i) \bar{R}_b + H_d (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \times \left[ 1 + f \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] + H \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (7)$$

$f$  در معادله (۷) برابر جذر نسبت تابش مستقیم به تابش کل روی سطح افقی  $\left( \sqrt{\frac{H_b}{H}} \right)$  می‌باشد.  $A_i$  نیز از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$A_i = \frac{H_b}{H_o} \quad (8)$$

$H_o$  در معادله (۸)، تابش روزانه فرا زمینی در سطح افقی است و از رابطه (۹) به دست می‌آید [۲۴، ۲۵].

$$H_o = \frac{24 \times 3600 \times 1366.1}{\pi} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{2\pi N}{365} \right) \right] \times \left[ \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) \right] \quad (9)$$

### ۲-۴- تعیین زاویه بهینه

همان‌گونه که در محاسبه تابش روی سطح شیبدار ملاحظه شد، زاویه گردآور و پنل خورشیدی نسبت به افق به عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در روابط تابش ظاهر می‌شود و نظر به این که موقعیت خورشید در طول سال در آسمان تغییر می‌کند، زاویه مناسب باید تعیین شود. زاویه بهینه برای یک گردآور تخت یا پنل فتوولتایی، زاویه‌ای است که در آن بیشینه مقدار انرژی تابشی جذب شود. برای این منظور با استفاده از کدهای Fortran، زوایای مختلف (از ۲۰ تا ۹۰ درجه با گام ۰/۱ درجه) برای کل سال با رایانه امتحان و زاویه متناظر با

بیشینه انرژی دریافتی به عنوان زاویه بهینه تعیین گردید. محاسبات در قالب کدهای Fortran با استفاده از نرم‌افزار CodeBlocks ورژن 20.03 و کامپایلر GNU انجام شد.

برای تعیین زاویه بهینه فصلی و سالانه، به ترتیب زاویه‌ای که بیشترین میزان انرژی دریافتی در فصل و سال را ارائه می‌کند، انتخاب شد. این مطلب با استفاده از کدهای Fortran محاسبه و نتایج به دست آمد.

شهرهای مورد مطالعه، مراکز تمامی شهرستان‌های استان خوزستان مطابق شکل ۲ بودند. همان طور که در بخش مقدمه نیز اشاره شد، برای شهر اهواز و آبادان گزارش‌هایی از زاویه بهینه وجود دارد اما در این پژوهش، شهرهای مذکور نیز دوباره بررسی شدند تا مقایسه‌ای با نتایج تحقیقات قبلی صورت پذیرد.



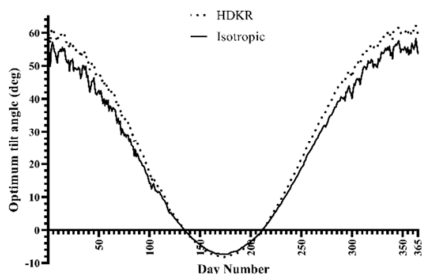
شکل ۲- شهرهای مورد مطالعه شامل: مرکز استان و مراکز شهرستان‌های استان خوزستان.

### ۳- نتایج و بحث

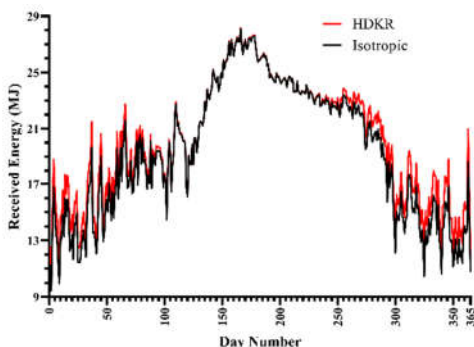
#### ۳-۱- زاویه بهینه برای روزهای سال

در این بخش، زاویه بهینه در شهر اهواز برای هر یک از روزهای سال محاسبه گردید و نتایج در شکل ۳-الف) مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است شماره روز بر حسب تقویم میلادی می‌باشد. زوایای بزرگتر مربوط به پاییز و زمستان هستند زیرا خورشید در این فصول، زاویه کمتری با افق می‌سازد و برای دریافت تابش بیشتر خورشید، ضروری است زاویه تمایل افزایش یابد. نکته قابل توجه دیگر، مقادیر منفی زاویه شیب است. زاویه منفی به این معنی است که صفحه گردآور به سمت شمال زاویه‌دار شود به جای اینکه مطابق معمول به سمت جنوب قرار گرفته باشد. به عبارت بهتر، زاویه سمت صفحه ۱۸۰ درجه تغییر پیدا می‌کند و زاویه شیب صفحه در این حالت دیگر علامت منفی نخواهد

(الف)



(ب)



شکل ۳- الف): زاویه بهینه برای هر یک از روزهای سال در شهر اهواز به دو روش HDKR و ایزوتروپیک، ب): میزان انرژی دریافت شده در زاویه بهینه برای هر یک از روزهای سال در شهر اهواز به دو روش HDKR و ایزوتروپیک.

### ۳-۲- زاویه بهینه برای کل سال و فصول

مقادیر زاویه بهینه در کل سال و فصول با امتحان کردن زوایای مختلف از ۲۰- تا ۹۰ درجه با گام ۱/۱۰ درجه به منظور کسب بیشترین انرژی سالانه و فصلی به دست آمد که در جدول ۱ و ۲ به ترتیب بر اساس مدل ایزوتروپیک و HDKR مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد انتخاب عرض جغرافیایی به عنوان زاویه بهینه، گزینه مناسبی نیست زیرا در تمامی موارد، زاویه بهینه سالانه از عرض جغرافیایی کمتر است. مطلب دیگر تفاوت چشمگیر بین زاویه بهینه در نیمه اول و دوم سال می‌باشد. تمامی شهرها، زاویه بهینه‌ای کمتر از ۸ درجه در نیمه اول سال دارند در حالی که زاویه بهینه برای نیمه دوم سال در همه موارد از ۴۴ درجه بزرگتر است. این تفاوت چشمگیر به روشنی بیان می‌کند انتخاب یک زاویه ثابت برای کل سال مفید نیست و حداقل ۲ بار در سال یعنی در هر نیمسال یک بار لازم است تغییر یابد. بزرگتر بودن زاویه بهینه برای نیمه دوم سال نیز به خاطر کاهش زاویه ارتفاع خورشید در پاییز و زمستان نسبت به بهار و تابستان است. همان‌طور که در خصوص تفاوت نتایج به دست آمده برای دو مدل ایزوتروپیک و HDKR در شکل ۳ برای شهر اهواز بحث شد، اعداد مربوط به جداول ۱ و ۲ نیز در مدل HDKR با همان استدلال بزرگتر هستند.

داشت [۲۴]. نمونه‌ای از زاویه بهینه منفی در پژوهش‌های گذشته توسط عبدالزاده و همکاران [۴] برای شهر کرمان و جعفرکاظمی و همکاران [۶] برای شهر بندرعباس گزارش شده است.

مطلب دیگر، نوسانات مقادیر زاویه بهینه در فصول پاییز و زمستان است که در شکل ۳ مشاهده می‌شود. این نوسانات مربوط به ابرناکی بیشتر در این فصول است که میزان تابش و به تبع آن زاویه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نکته بعدی تفاوت بین مقادیر زاویه بهینه برای دو مدل ایزوتروپیک و HDKR است. زوایای بهینه با مدل HDKR در پاییز و زمستان عدد بزرگتری نسبت به مدل ایزوتروپیک دارند اما در تابستان نتایج آنها به هم نزدیک است. برای پی بردن به دلیل این مطلب لازم است میزان انرژی دریافت شده در دو مدل بررسی شود. قسمت (ب) شکل ۳ میزان انرژی دریافت شده روزانه در سطح شیبدار با زاویه بهینه هر روز سال را نشان می‌دهد. میزان انرژی کسب شده با مدل HDKR بیشتر است. این مطلب با گزارشی مبنی بر کم برآورد شدن انرژی به روش ایزوتروپیک [۲۴] هماهنگی دارد. البته مطابق شکل ۳-ب) نتایج به دست آمده از هر دو روش برای زاویه بهینه و میزان انرژی دریافت شده در تابستان به هم نزدیک هستند.

مقدار زاویه بهینه برای شمالی‌ترین و جنوبی‌ترین مراکز شهرستان در شکل ۴ بخش (الف) و (ج) نشان داده شده است. شهر هندیجان به خاطر قرارگیری در عرض جغرافیایی پایین‌تر، مقدار زاویه بهینه کوچکتری نسبت به شهر اندیمشک دارد. چنانچه به قسمت (ب) و (د) شکل ۴ توجه شود مقادیر زاویه بهینه دو شهر بهبهان و خرمشهر فاصله خیلی کمی به خصوص در فصل تابستان دارند این در حالی است که یکی در شرق و دیگری در غرب استان واقع شده است اما عرض جغرافیایی هر دو به هم نزدیک هستند. این مطلب برای هر دو مدل ایزوتروپیک و HDKR تقریباً یکسان است و نشان می‌دهد تأثیر عرض جغرافیایی نمود بیشتری در زاویه دارد و این مطلب با حضور  $\phi$  (عرض جغرافیایی) در فرمول‌های (۱) و (۷) تابش در سطوح شیبدار نیز تأیید می‌گردد. به عبارت دیگر طول جغرافیایی به خودی خود تأثیر مستقیمی در زاویه بهینه ندارد و چنانچه تغییر آن منجر به تغییرات در وضعیت آب و هوایی، پوشش ابر و تابش گردد در زاویه اثر خواهد گذاشت.

جدول ۱- مقادیر زاویه بهینه برای شهرهای استان خوزستان بر اساس

مدل ایزوتروپیک

ردیف	شهرها	عرض جغرافیایی (درجه)	زاویه بهینه سالانه (درجه)	زاویه بهینه فصلی (درجه)		
				بهار	تابستان	پاییز
۱	آبادان	۳۰/۳۵۱۷	۲۲/۲	۴/۷	۴۴/۲	۴۴/۵
۲	آغاچاری	۳۰/۶۹۸۳	۲۲/۳	۵/۱	۴۵/۰	۴۵/۱
۳	امیدیه	۳۰/۷۵۶۵	۲۲/۷	۳/۹	۴۴/۹	۴۴/۹
۴	اندیمشک	۳۲/۴۶۹۰	۲۲/۵	۵/۲	۴۶/۴	۴۷/۱
۵	اهواز	۳۱/۳۵۰۲	۲۲/۴	۴/۳	۴۴/۶	۴۴/۹
۶	ایذه	۳۱/۸۳۱۵	۲۴/۰	۴/۷	۴۶/۸	۴۷/۱
۷	باغملک	۳۱/۵۲۶۱	۲۴/۰	۴/۴	۴۶/۶	۴۶/۹
۸	بهبهان	۳۰/۵۹۱۶	۲۳/۵	۳/۷	۴۵/۷	۴۶/۰
۹	حمیدیه	۳۱/۴۷۹۵	۲۲/۹	۴/۵	۴۵/۵	۴۵/۹
۱۰	خرمشهر	۳۰/۴۳۹۴	۲۱/۵	۳/۷	۴۳/۸	۴۴/۲
۱۱	دزفول	۳۲/۳۷۹۹	۲۴/۰	۵/۴	۴۶/۳	۴۶/۸
۱۲	رامشیر	۳۰/۸۹۲۰	۲۲/۷	۴/۱	۴۴/۶	۴۵/۰
۱۳	رامهرمز	۳۱/۲۷۷۱	۲۲/۳	۴/۳	۴۵/۷	۴۵/۹
۱۴	سوسنگرد	۳۱/۵۵۵۵	۲۲/۲	۴/۵	۴۴/۵	۴۵/۳
۱۵	شادگان	۳۰/۶۵۳۱	۲۲/۵	۳/۹	۴۴/۴	۴۴/۸
۱۶	شوش	۳۲/۱۹۲۳	۲۳/۵	۵/۲	۴۵/۷	۴۶/۳
۱۷	شوشتر	۳۲/۰۴۶۲	۲۳/۳	۴/۹	۴۵/۷	۴۶/۱
۱۸	قلعه خواجه	۳۲/۲۰۴۷	۲۳/۴	۴/۷	۴۶/۷	۴۷/۱
۱۹	کوت عبد اله	۳۱/۲۳۱۶	۲۲/۲	۳/۸	۴۴/۶	۴۵/۰
۲۰	گتوند	۳۲/۲۴۴۸	۲۳/۷	۵/۱	۴۶/۲	۴۶/۷
۲۱	لالی	۳۲/۳۳۰۳	۲۳/۷	۵/۰	۴۶/۸	۴۷/۳
۲۲	ماهشهر	۳۰/۵۶۵۴	۲۱/۷	۳/۶	۴۳/۸	۴۴/۰
۲۳	مسجد سلیمان	۳۱/۹۴۸۸	۲۳/۷	۴/۷	۴۶/۴	۴۶/۷
۲۴	ملاتانی	۳۱/۵۸۵۸	۲۳/۷	۴/۶	۴۴/۹	۴۵/۳
۲۵	هندیجان	۳۰/۲۳۴۶	۲۱/۹	۳/۴	۴۴/۰	۴۴/۱
۲۶	هویزه	۳۱/۴۶۲۶	۲۲/۰	۴/۴	۴۴/۳	۴۵/۱

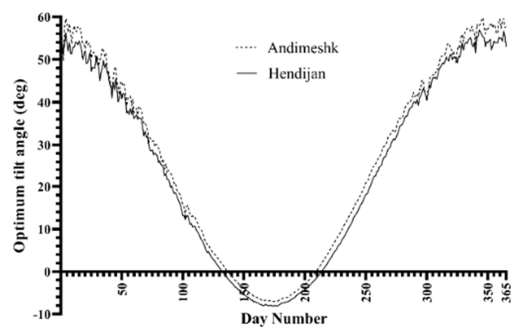
جدول ۳ میانگین زاویه بهینه محاسبه شده در جدول ۱ برای شهرهای مورد مطالعه در استان خوزستان را بر اساس مدل ایزوتروپیک نشان می‌دهد. زاویه ۲۲/۹ با انحراف معیار ۰/۸ درجه میانگین استان خوزستان است. این مقدار برای نیمه اول سال تقریباً ۵ درجه و برای نیمه دوم ۴۵/۵ درجه است. انحراف معیار زوایا در حد یک درجه است که نشان از یکنواختی نسبی وضعیت زاویه بهینه دارد.

جدول ۲- مقادیر زاویه بهینه برای شهرهای استان خوزستان بر اساس

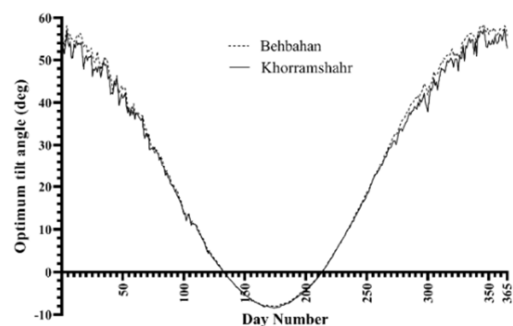
مدل HDKR

ردیف	شهرها	عرض جغرافیایی (درجه)	زاویه بهینه سالانه (درجه)	زاویه بهینه فصلی (درجه)		
				بهار	تابستان	پاییز
۱	آبادان	۳۰/۳۵۱۷	۲۵/۶	۴/۲	۵/۳	۴۹/۸
۲	آغاچاری	۳۰/۶۹۸۳	۲۵/۴	۴/۲	۵/۷	۴۹/۶
۳	امیدیه	۳۰/۷۵۶۵	۲۶/۰	۴/۵	۵/۹	۴۹/۶
۴	اندیمشک	۳۲/۴۶۹۰	۲۶/۸	۶/۱	۷/۵	۵۱/۱
۵	اهواز	۳۱/۳۵۰۲	۲۵/۸	۴/۹	۶/۴	۴۹/۶
۶	ایذه	۳۱/۸۳۱۵	۲۷/۲	۵/۴	۷/۱	۵۱/۸
۷	باغملک	۳۱/۵۲۶۱	۲۷/۲	۵/۰	۶/۸	۵۱/۷
۸	بهبهان	۳۰/۵۹۱۶	۲۶/۷	۴/۳	۵/۸	۵۰/۸
۹	حمیدیه	۳۱/۴۷۹۵	۲۶/۱	۵/۱	۶/۵	۵۰/۹

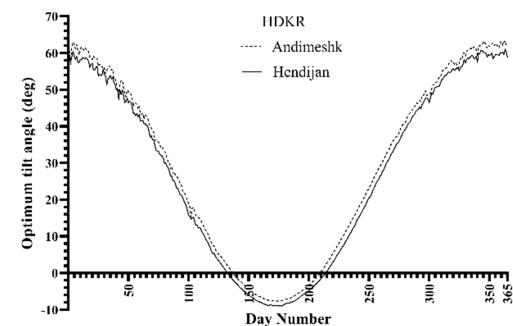
(الف)



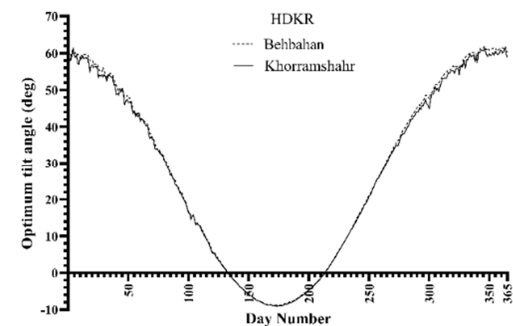
(ب)



(ج)

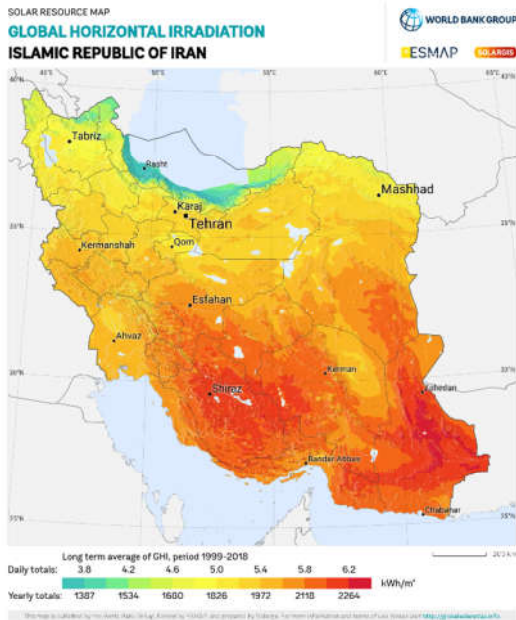


(د)



شکل ۴- زاویه بهینه هر یک از روزهای سال برای شهرهای اندیمشک، بهبهان، خرمشهر و هندیجان (الف) و (ب) به روش ایزوتروپیک، (ج) و (د) به روش HDKR.

سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۸ بر اساس داده‌های گروه World Bank نشان می‌دهد که متفاوت از داده‌های ماهواره‌ای است که در این پژوهش از آن استفاده شده است. چنانچه در شکل ۵ به مقادیر تابش در استان خوزستان دقت شود، یکنواختی نسبی وجود دارد که تأییدی بر ضریب تغییرات کم به دست آمده در جداول ۳ و ۴ برای زاویه بهینه است.



شکل ۵- متوسط بلند مدت تابش کل روی سطح افقی [۲۹].

### ۳-۳- افت انرژی

منظور از افت، مقدار انرژی از دست رفته است وقتی زاویه بهینه درست انتخاب نشده باشد. در این خصوص به صورت نمونه شهر اهواز مورد بررسی قرار گرفت. سه حالت برای زاویه اعمال شد: عرض جغرافیایی، زاویه بهینه سالانه و زاویه بهینه فصلی. جدول ۵ نتیجه محاسبات را برای مدل ایزوتروپیک و جدول ۶ برای مدل HDKR نشان می‌دهد. چنانچه زاویه صفحه، مقدار بهینه سالانه انتخاب شود، در مدل ایزوتروپیک ۰/۸۳ و در مدل HDKR ۰/۳۳ درصد انرژی بیشتری نسبت به حالتی که زاویه صفحه، عرض جغرافیایی باشد، کسب می‌شود. البته فصول پاییز و زمستان به علت کمتر بودن زاویه بهینه سالانه نسبت به عرض جغرافیایی، انرژی دریافتی با انتخاب زاویه بهینه سالانه کمتر است لذا درصد تغییرات آن منفی شده است. اما برای کل سال مقدار زاویه بهینه سالانه، درصد افزایش مثبتی دارد. با انتخاب زاویه بهینه فصلی، درصد افزایش انرژی دریافتی ۵/۰۴ درصد نسبت به حالت انتخاب عرض جغرافیایی و ۴/۱۷ نسبت به زاویه بهینه سالانه می‌باشد. این مقادیر طبق مدل HDKR به ترتیب ۵/۸ و ۵/۴۵ درصد است. چنانچه شرایط نسبت به صفحه افقی، سنجیده شود این افزایش به ۱۳/۲۶ درصد طبق مدل HDKR می‌رسد.

۴۹/۷	۴۹/۰	۵/۳	۴/۳	۳۴/۹	۳۰/۴۳۹۴	خرمشهر	۱۰
۵۱/۹	۵۱/۱	۷/۴	۶/۳	۲۷/۵	۳۲/۳۷۹۹	دزفول	۱۱
۵۰/۳	۴۹/۵	۶/۰	۴/۷	۲۶/۱	۳۰/۸۹۲۰	رامشیر	۱۲
۵۰/۹	۵۰/۲	۶/۵	۴/۹	۲۶/۶	۳۱/۲۷۷۱	رامهرمز	۱۳
۵۰/۷	۴۹/۷	۶/۵	۵/۳	۲۵/۶	۳۱/۵۵۵۵	سوسنگرد	۱۴
۵۰/۱	۴۹/۴	۵/۷	۴/۵	۲۵/۹	۳۰/۶۵۳۱	شادگان	۱۵
۵۱/۵	۵۰/۷	۷/۲	۶/۰	۲۷/۱	۳۲/۱۹۲۳	شوش	۱۶
۵۱/۳	۵۰/۴	۷/۱	۵/۷	۲۶/۶	۳۲/۰۴۶۲	شوشتر	۱۷
۵۲/۰	۵۱/۱	۷/۴	۵/۵	۲۶/۶	۳۲/۲۰۴۷	قلعه خواجه	۱۸
۵۰/۶	۴۹/۸	۶/۲	۴/۵	۲۵/۷	۳۱/۳۳۱۶	کوت عبد اله	۱۹
۵۱/۷	۵۰/۹	۷/۴	۵/۹	۲۷/۱	۳۲/۴۴۴۸	گتوند	۲۰
۵۲/۲	۵۱/۲	۷/۵	۵/۸	۲۶/۹	۳۲/۳۰۰۳	لالی	۲۱
۴۹/۵	۴۸/۹	۵/۶	۴/۳	۲۵/۰	۳۰/۵۶۵۴	ماهشهر	۲۲
۵۱/۶	۵۰/۹	۷/۱	۵/۳	۲۷/۰	۳۱/۹۴۸۸	مسجد سلیمان	۲۳
۵۰/۶	۴۹/۸	۶/۶	۵/۲	۲۶/۱	۳۱/۵۸۵۸	ملائانی	۲۴
۴۹/۵	۴۸/۸	۵/۴	۳/۹	۲۵/۲	۳۰/۲۳۴۶	هندیجان	۲۵
۵۰/۵	۴۹/۵	۶/۴	۵/۲	۲۵/۵	۳۱/۴۶۲۶	هویزه	۲۶

جدول (۳): میانگین مقادیر زاویه بهینه محاسبه شده برای شهرهای استان خوزستان بر اساس مدل ایزوتروپیک.

پارامترها	عرض جغرافیایی	زاویه بهینه فصلی			
		زمستان	پاییز	تابستان	بهار
میانگین (درجه)	۳۱/۴۰	۴۵/۷	۴۵/۳	۵/۷	۴/۴
انحراف معیار (درجه)	۰/۷۱	۱/۰	۱/۰	۰/۷	۰/۹
ضریب تغییرات (درصد)	۲/۲۵	۲/۳	۲/۲	۱۱/۴	۱۳/۴

جدول ۴ میانگین زاویه بهینه ۲۶/۲ درجه را طبق مدل HDKR نشان می‌دهد که با توجه به توضیحات قبل، نسبت به نتایج مدل ایزوتروپیک عدد بزرگتری است و این بیشتر بودن زوایا برای فصل مختلف نیز اتفاق افتاده است. برای نیمه اول سال به صورت میانگین حدود ۵/۸ و برای نیمه دوم حدود ۵۰/۵ درجه به دست آمده است. مقادیر ضریب تغییرات نیز حاکی از یکنواختی بین نتایج برای همه شهرها است هرچند این یکنواختی برای فصول پاییز و زمستان بیشتر از بهار و تابستان است.

جدول ۴- میانگین مقادیر زاویه بهینه محاسبه شده برای شهرهای استان خوزستان بر اساس مدل HDKR.

پارامترها	عرض جغرافیایی	زاویه بهینه فصلی			
		زمستان	پاییز	تابستان	بهار
میانگین (درجه)	۳۱/۴۰	۵۰/۹	۵۰/۱	۶/۵	۵/۰
انحراف معیار (درجه)	۰/۷۱	۰/۸	۰/۸	۰/۷	۰/۷
ضریب تغییرات (درصد)	۲/۲۵	۱/۷	۱/۵	۱۱/۳	۱۳/۵

شکل ۵ میزان تابش کل روی سطح افقی را برای ایران در بازه

جدول ۵- میزان افت انرژی با توجه به نوع انتخاب زاویه بهینه برای شهر اهواز بر اساس مدل ایزوتروپیک.

بازه مورد بررسی	کل انرژی دریافتی (ژول بر متر مربع)			بازه مورد بررسی	کل سال	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
	درصد تغییرات								
	عرض جغرافیایی	بهبوده سالانه	بهبوده هر فصل						
عرض جغرافیایی	۶۶۶۸۲۸۱۳۶۴	۶۷۰۰۶۵۰۹۶۵۰	۷۰۰۶۰۶۳۷۹۵۰	۱۸۵۷۰۰۹۳۳۰۶	۲۱۴۴۹۰۰۴۱۱۱	۳۲۰۶۸۸۸۳۸۶۰	۱۴۵۸۳۹۰۲۸۳۰	۱۳۷۶۰۳۳۱۹۲۱۷	۱۳۰۴۵۹۵۲۳۴۲
بهبوده سالانه	۰/۸۳	۵/۰۴	۴/۱۷	۲/۸۲	۶/۸۵	۳/۹۱	۵/۹۷	۲/۰۷	۳/۶۹
بهبوده هر فصل	۳/۱۹	۷/۳۶	۲/۱۹	۵/۹۷	۲/۰۷	۳/۶۹	۲/۱۳	۳/۶۸	۶/۰۴

جدول ۶- میزان افت انرژی با توجه به نوع انتخاب زاویه بهینه برای شهر اهواز بر اساس مدل HDKR.

بازه مورد بررسی	کل انرژی دریافتی (ژول بر متر مربع)			بازه مورد بررسی	کل سال	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
	درصد تغییرات								
	عرض جغرافیایی	بهبوده سالانه	بهبوده هر فصل						
عرض جغرافیایی	۶۸۳۳۵۸۲۹۹۱۶۱	۶۸۵۵۸۰۷۸۱۹۸۱	۷۲۲۹۶۶۵۱۱۸۳۲	۱۸۶۹۱۵۳۹۳۷۳۹	۲۰۷۰۶۰۱۸۳۳۱۸۷	۲۱۳۴۷۵۸۲۵۸	۱۴۶۵۹۷۳۵۴۸۳	۱۳۸۱۵۳۴۵۷۵۰	
بهبوده سالانه	۰/۳۳	۵/۸۰	۵/۴۵	۲/۶۸	۶/۷۱	۲/۶۲	۲/۸۲	۲/۸۵	
بهبوده هر فصل	۲/۶۸	۷/۲۵	۴/۴۵	۲/۸۲	۶/۷۱	۲/۶۲	۲/۸۲	۲/۸۵	

### ۴-۳- مقایسه نتایج

جدول ۷ پژوهش‌های انجام شده برای تعیین زاویه بهینه گردآورهای خورشیدی در دو شهر استان خوزستان را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده برای آبادان کمتر از اعداد گزارش شده توسط جعفرکاظمی و همکاران [۶] است. فقط زاویه بهینه مربوط به زمستان یعنی ۵۳ به عدد محاسبه شده در این پژوهش (۴۹/۸ از روش HDKR) نزدیک می‌باشد. اما نتایج به دست آمده برای شهر اهواز هماهنگی خوبی با گزارش کشاورز و همکاران [۱۶] دارند یعنی به ترتیب اعداد محاسبه شده در مقابل گزارش شده برای بهار، پاییز و سالانه به شرح: ۴/۹ در مقابل ۴/۸، ۴۹/۶ در مقابل ۵۲/۳ و ۲۵/۸ در مقابل ۲۸/۴ درجه است. همچنین زاویه بهینه محاسبه شده برای اهواز از روش HDKR (۲۵/۸ درجه) در محدوده گزارش داندنه و موسوی [۲۱] قرار دارد.

برخی پژوهشگران روابطی را بر حسب عرض جغرافیایی برای زاویه بهینه پیشنهاد کرده اند که نتایج آن برای مقایسه در جدول ۸ آمده است. همان گونه که مشاهده می‌شود نتایج با زاویه به دست آمده برای اهواز به روش HDKR یعنی ۲۵/۸ درجه نزدیک هستند.

جدول ۷- زوایای پیشنهاد شده در پژوهش‌های گذشته

شهر	زاویه بهینه (درجه)	مرجع
آبادان	بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۱۰، ۲۰، ۵۹ و ۵۳ زاویه بهینه سالانه ۳۴	[۶]
اهواز	بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۴/۸، ۴/۸، ۱۲/۵، ۵۲/۳ و ۴۳/۹ زاویه بهینه سالانه ۲۸/۴	[۱۶]
اهواز	۲۵ تا ۲۹	[۲۱]



جدول ۸- روابط پیشنهاد شده برای زاویه بهینه بر حسب عرض جغرافیایی و مقدار جایگذاری شده آن برای شهر اهواز.

مرجع	نتیجه برای شهر اهواز	رابطه پیشنهاد شده
[۲۲]	۲۷/۴	$1.3793 + \varphi(1.2011 + \varphi(-0.014404 + \varphi \times 0.000080509))$
[۲۳]	۲۶/۱	$0.764\varphi + 2.14$

#### ۴- نتیجه گیری

بررسی زاویه بهینه برای گردآورهای صفحه تخت و صفحات خورشیدی در ۲۶ شهر استان خوزستان نشان داد تغییر زاویه بهینه حداقل دو بار در سال ضروری است زیر متوسط زاویه بهینه برای نیمسال اول حدود ۵/۸ و برای نیمه دوم ۵۰/۵ درجه است که تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارند. در عرض جغرافیایی یکسان، تغییرات زاویه بهینه از شرق به غرب استان چشمگیر نبود. طبق مدل HDKR مقدار دریافت انرژی با انتخاب زاویه بهینه فصلی در شهر اهواز ۵/۸ درصد بیشتر از حالتی است که عرض جغرافیایی به عنوان زاویه ثابت در نظر گرفته و چنانچه نسبت به صفحه افقی سنجیده شود این افزایش به ۱۳/۲۶ درصد می‌رسد. همچنین مقایسه نتایج دو مدل ایزوتروپیک و HDKR نشان داد میزان انرژی دریافتی از روش ایزوتروپیک کمتر از مدل HDKR به دست می‌آید. پیشنهاد می‌شود چنانچه در آینده اطلاعات تابش مستقیم و بخشی خورشید برای ایستگاه‌های هواشناسی استان خوزستان در دسترس بود، نتایج با این پژوهش مقایسه گردد.

#### ۵- سپاسگزاری

این تحقیق مستخرج از طرح پژوهشی با شماره ثبت ۱۴۰۰/۰۵ مورخ ۱۴۰۰/۸/۸ در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان است و از حمایت‌های این دانشگاه قدردانی می‌شود. همچنین از مجموعه SoDa Service به خاطر در اختیار قرار دادن اطلاعات تابش خورشید سپاسگزاری می‌گردد.

#### ۶- مراجع

- [1] Spohn T, Breuer D, Johnson T. Encyclopedia of the Solar System. Elsevier; 2014.
- [۲] هوشنگی ن، آل شیخ ع، هلالی ح، بررسی منطقه ای پتانسیل تابش خورشیدی با ارزیابی و بهینه سازی روش های درون یابی در سطح کشور ایران. فصلنامه برنامه ریزی منطقه ای. ۱۳۹۳. د. ۴، ش. ۱۶، ص ۱-۱۶.
- [3] Duffie JA, Beckman WA. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons; 2013.
- [۴] عبدل زاده م، جعفری س، رهنما م، عامری م، تعیین زاویه بهینه پانل های خورشیدی ثابت برای دریافت بیشترین انرژی تشعشعی در شهر کرمان. نشریه بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران. ۱۳۸۷، د. ۱۰، ش. ۱۹، ص ۹۱-۹۸.
- [5] Abdolzadeh M, Mehrabian M. Heat Gain of a Solar Collector Under an Optimum Slope Angle in Kerman, Iran. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2011;33(14):1375-85.
- [6] Jafarkazemi F, Saadabadi SA, Pasdarshahri H. The optimum tilt angle for flat-plate solar collectors in Iran. Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2012;4(1):1-15.

- [7] Abdolzadeh M, Mehrabian MA. The Optimal Slope Angle for Solar Collectors in Hot and Dry Parts of Iran. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2012;34(6):519-30.
- [8] Abdolzadeh Z, Abdolzadeh M, Fadaeinedjad R. Optimum slope angles and the corresponding uncertainties for a solar collector. International Journal of Ambient Energy. 2014;37(1):46-54.
- [9] Jafari S, Javaran EJ. An Optimum Slope Angle for Solar Collector Systems in Kerman Using a New Model for Diffuse Solar Radiation. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2012;34(9):799-809.
- [۱۰] اجمعی ا، ذوالفقارزاده ح، اکبرزاده پ، محاسبه شیب بهینه گردآورهای خورشیدی تخت و مقایسه کاربرد آن ها با یکدیگر در فصول مختلف سال در کرمان. علوم و تکنولوژی محیط زیست. ۱۳۹۹، د. ۲۱، ش. ۱، ص ۱-۱۳.
- [11] Salvatipour HS, Abdolzadeh M, Beheshti HK, Rahnama M. Solar Energy Enhancement of a Solar Collector by an Optimum Slope Angle in Isfahan, Central Region of Iran. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2011;33:1625-35.
- [۱۲] اخراسانی زاده ح، مسچی، س، تعیین زاویه شیب بهینه ماهیانه، فصلی، شش ماهه و سالانه کلکتورهای خورشیدی تخت در کاشان. مهندسی و مدیریت انرژی. ۱۳۹۲، د. ۳، ش. ۴، ص ۳۸-۴۹.
- [13] Salari M, Jahanshahi Javaran E. Optimising the tilt angle for solar surfaces using different solar irradiation models in Yazd, Iran. International Journal of Ambient Energy. 2017;39(4):323-31
- [۱۴] گشایشی ح، ادیبی طوسی س، سینا س، رستمی م، جعفری ا، بررسی آزمایشگاهی اثر شیب پوشش شیشه ای با سطوح تخت و محدب صفحه جاذب در بازدهی آب شیرین کن خورشیدی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۰، د. ۵۱، ش. ۱، ص ۱۹۹-۲۰۷.
- [15] Farhadi R, Taki M. The energy gain reduction due to shadow inside a flat-plate solar collector. Renewable Energy. 2020;147:730-40.
- [16] Keshavarz SA, Talebizadeh P, Adalati S, Mehrabian MA, Abdolzadeh M. Optimal slope-angles to determine maximum solar energy gain for solar collectors used in Iran. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER). 2012;2(4):665-73.
- [۱۷] آروین ع، نجف پور ب، ترنجی ع، تعیین زاویه بهینه پنل های خورشیدی در جزیره کیش. مجله آمایش جغرافیایی فضا. ۱۳۹۶، د. ۷، ش. ۲۶، ص ۲۱۰-۱۹۹.
- [۱۸] ارواحانی ع، عبدالله پور م، گلزاریان م، ابوترابی زارچی ح، تعیین زوایای بهینه آرایه های خورشیدی برای دریافت بیشترین انرژی ( مطالعه مورد: خراسان رضوی، مشهد. نشریه انرژی ایران. ۱۳۹۶، د. ۲۰، ش. ۲، ص ۱۲۵-۱۰۳.
- [۱۹] ارحیمی ع، کربلائی درئی ع، کربلائی م، تحلیل شیب و آزیموت بهینه برای نصب پنل فتوولتائیک براساس تابش دریافت خورشید در شهرستان کاشان. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۱۳۹۷، د. ۱۸، ش. ۴۹، ص ۵۹-۷۴.
- [20] Kalbasi R, Jahangiri M, Nariman A, Yari M. Optimal Design and Parametric Assessment of Grid-Connected Solar Power Plants in Iran, a Review. Journal of Solar Energy Research. 2019;4(2):142-62.
- [21] Danandeh MA, Mousavi SM. Solar irradiance estimation models and optimum tilt angle approaches: A comparative study. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018;92:319-30.
- [22] Jacobson MZ, Jadhav V. World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels. Solar Energy. 2018;169:55-66.
- [23] Chang TP. The Sun's apparent position and the optimal tilt angle of a solar collector in the northern hemisphere. Solar Energy. 2009;83(8):1274-84.

- [24] Duffie JA, Beckman WA, Blair N. Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind. John Wiley & Sons; 2020.
- [25] Kalogirou SA. Solar Energy Engineering: processes and systems. Academic Press; 2014.
- [26] Bhattacharya S, Braun C, Leopold U. An Efficient 2.5D Shadow Detection Algorithm for Urban Planning and Design Using a Tensor Based Approach. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2021;10(9):583.
- [27] Kacira M, Simsek M, Babur Y, Demirkol S. Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. Renewable Energy. 2004;29(8):1265-75.
- [28] Shukla KN, Rangnekar S, Sudhakar K. Comparative study of isotropic and anisotropic sky models to estimate solar radiation incident on tilted surface: A case study for Bhopal, India. Energy Reports. 2015;1:96-103.
- [29] The World Bank Group. Global horizontal irradiation. 2023 Available from: <https://globalsolaratlas.info/map>.