

## مدل‌سازی و پهنه‌بندی انرژی خورشیدی دریافتی در سطح زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی ایران

اعظم غلام نیا<sup>۱\*</sup> - محمدحسین مبین<sup>۲</sup> - عاطفه جبالی<sup>۳</sup> - حمید علیپور<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۰۷

### چکیده

در دهه‌های اخیر برآورد انرژی خورشیدی دریافتی در سطح زمین ( $R_s$ ) برپایه‌ی متغیرهای هواشناختی اهمیت زیادی یافته است. یکی از روش‌های متداول برای تخمین انرژی خورشیدی رسیده به زمین، استفاده از متغیرهای دمایی در هر مکان است. هدف اصلی در این پژوهش تخمین و پهنه‌بندی میزان انرژی خورشیدی دریافتی در چهار استان یزد، اصفهان، کرمان و خراسان جنوبی است. بدین منظور با استفاده از دماهای پنج‌گانه در مقیاس زمانی روزانه، ابتدا از یک مدل ریاضی معتبر برای مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران ۵۰ ایستگاه هواشناسی که میزان تابش خورشیدی ثبت نمی‌گردید میزان  $R_s$  برآورد شد، سپس روش مناسب درون‌یابی با استفاده از نرم‌افزار GIS با  $R_s$  با نرم‌افزار GIS ترسیم گردید. نتایج نشان می‌دهد به طور کلی در منطقه مورد مطالعه به تبعیت از تأثیر عرض جغرافیایی در تغییرات مکانی  $R_s$ ، میانگین انرژی تابشی دریافتی در سطح زمین در همه فصول از شمال به جنوب افزایش یافته و در فصول گرم، مقادیر  $R_s$  بیشتر از فصول سرد است. منحنی‌های هم‌ارزش تابشی در زمستان نسبت به فصول دیگر منطبق با عرض‌های جغرافیایی از نظم و توازی بیشتری برخوردارند. این وضعیت در قسمت‌های جنوبی چشمگیر، اما در بخش‌های شمالی بعثت تأثیر عوامل دیگر جغرافیایی و اقلیمی تغییر می‌کند. در فصل گرم مقادیر بالای  $R_s$  علاوه بر بخش‌های جنوبی در قسمت‌هایی از مرکز منطقه هم مشاهده می‌شود. استان کرمان به طور میانگین با دریافت  $27/25$  ( $Mj m^{-2} \cdot d^{-1}$ )، بیشترین و استان اصفهان با  $21/54$  ( $Mj m^{-2} \cdot d^{-1}$ )، کمترین میزان انرژی تابشی را در طی فصل تابستان دریافت نموده است.

### واژه‌های کلیدی: تابش خورشیدی، زمین آمار، سلول‌های خورشیدی، مدل‌سازی، مناطق مرکزی ایران

### مقدمه

از سویی دیگر افزایش مداوم انتشار گازهای گلخانه‌ای، صعود قیمت حامل‌های سوختی فسیلی، و بویژه ضرورت کاهش وابستگی به درآمدهای ارزی حاصل از صادرات نفتی در جهت کسب استقلال نسبی اقتصادی و سیاسی موجب گشته حتی در کشورهای توسعه یافته جهان، تلاش‌های موثرتری برای استفاده و بهره‌برداری بهینه از منابع دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی‌های خورشیدی، بادی، دریایی، زمین گرمایی، نیروگاه‌های آبی و غیره صورت پذیرد (۱۷). در این بین انرژی خورشیدی یکی از قابل دسترس‌ترین، پایدارترین و پاک‌ترین انواع انرژی‌های تجدیدپذیر در دنیاست (۷). در کشور ما نیز استفاده بهینه از این منابع پاک انرژی چون خورشیدی و تبدیل آن به انرژی‌های دیگر مانند انرژی الکتریکی با استفاده از تجهیزات چون سلول‌های خورشیدی<sup>۴</sup> رو به رشد می‌باشد. کشور ایران با عرض جغرافیایی ۲۵ الی ۴۵ درجه شمالی از جمله مناطق مناسب از نظر تابش خورشید می‌باشد. این نوع مطالعات در کشورهای واقع در

مسئله جهانی بحران انرژی، مشکلات ناشی از پایان‌پذیری سوخت‌های فسیلی و اثرات زیانبار زیست محیطی استفاده از آنها، کشورها و مجامع علمی جهان را به فکر استفاده از منابع انرژی جایگزین واداشته است. شواهد موجود بیانگر آنست که در چند دهه اخیر احتیاجات انرژی جهان به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و به همین دلیل در سال‌های اخیر استفاده از منابع انرژی نو به ویژه انرژی باد و خورشید بسیار مورد توجه اکثر کشورهای جهان قرار گرفته است. از مزیت‌های اصلی استفاده از انرژی‌های نو تجدیدپذیر بودن، پایان‌ناپذیری، صرفه اقتصادی و سازگاری آنها با محیط زیست است.

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب دانشجوی دکتری بیابانزادایی، استادیار و دانشجویان دکتری گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کوبرشناسی، دانشگاه یزد،

\*- نویسنده مسئول:

(Email: az.gh1990@gmail.com)

خورشیدی دریافتی در سطح زمین و پهنه‌بندی آن بر اساس مدل پیشنهادی در بخشی از مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور (استان‌های یزد، اصفهان، کرمان و خراسان جنوبی)، با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و تکنیک‌های زمین‌آمار جهت برآورد پتانسیل انرژی خورشیدی دریافتی ( $R_s$ ) در سطح منطقه مورد مطالعه است.

## مواد و روش‌ها

### داده‌ها

برای انجام این تحقیق قبل از هر چیز داده‌های درازمدت تابش خورشیدی دریافتی در سطح زمین که در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری و ثبت شده‌اند نیاز بود. اما با توجه به اینکه در سطح ۴ استان مورد مطالعه فقط در ۴ ایستگاه هواشناسی هم‌دید این پارامتر ثبت شده، و پراکنش مکانی این داده‌ها جهت پهنه‌بندی کافی نبوده و دقت لازم را نداشتند، بنابراین برآورد آن بر اساس دیگر پارامترهای اقلیمی امری اجتناب‌ناپذیر بود. بدین جهت پس از بررسی و مرور پیشینه‌ی علمی موضوع و آگاهی از تجارب پیشین برای برآورد  $R_s$  در سطح منطقه، ابتدا داده‌های ضروری مانند تابش خورشیدی رسیده به زمین بر حسب  $Mj/m^2.day$  و پارامترهای اقلیمی مانند دماهای میانگین، بیشینه و کمینه هوا، بارش، ساعت آفتابی و رطوبت نسبی در مقیاس زمانی ماهانه در ایستگاه‌های موجود در منطقه در دوره آماری ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۰ از سازمان هواشناسی کشور (IRIMO) اخذ گردید. در جدول ۱ ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌های دارای داده‌های تابش خورشیدی در سطح ۴ استان آورده شده است.

### تصحیح خطای داده‌ها

چون در ایستگاه‌های مورد مطالعه در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۷۹ ایستگاه‌های تابش نگار از مدل KIPZONNEN-CCI به مدل SOLRAD تغییر یافته و در این میان در موارد معدودی داده‌ها دارای خطا بودند، و با توجه به اینکه نسبت بین تابش دریافتی در سطح زمین به تابش بالای جو ( $R_o/R_s$ ) باید کم‌تر از یک باشد، در مواردی که این نسبت بیشتر از یک بود داده‌های پرت و دارای خطا حذف شدند.

### فرمول‌های برآورد تابش خورشیدی

الف- تابش خورشیدی بالای جو ( $R_o$ ) با استفاده از فرمول‌ها و روابط زیر (A) بدست آمده است:

ب- در ایستگاه‌های هواشناسی به طور معمول گزارش روزانه بارش، تبخیر، درجه حرارت حداقل و حداکثر ثبت می‌شود اما با توجه به مشکلات اقتصادی و فنی، اندازه‌گیری تابش خورشیدی در همه آنها ممکن نیست و فقط در برخی از ایستگاه‌ها تابش خورشیدی

کمربند دریافت حداکثری تابش خورشید مانند پاکستان (۱۱)، قبرس (۶)، ترکیه (۲۱)، استرالیا (۳) و همچنین در ایالات متحده آمریکا (۱۸) مانند ویسکانسین و مکزیک صورت گرفته است. ریواس و همکاران (۱۹)، در تحقیقی در تائولوپاس مکزیک با استفاده از میانگین ماهانه‌ی انرژی خورشیدی ثبت شده در ۷ ایستگاه و تخمین انرژی با استفاده از یک مدل تجربی در ۱۶۵ ایستگاه موجود در آن منطقه که تابش خورشیدی ثبت نمی‌گردید، میزان انرژی خورشیدی رسیده به زمین در فصل زمستان و تابستان به ترتیب ۴ و ۶/۷ کیلووات در ساعت در متر مربع برآورد نمودند.

در ایران مطالعاتی درباره ارائه‌ی مدل برای تخمین انرژی خورشیدی در برخی از نقاط صورت گرفته است. سبزی‌پرور و علیایی (۲۰) در تحقیق خود با استفاده از داده‌های ایستگاه همدیدی تبریز در دوره آماری ۱۳۹۲-۱۳۸۴، یک مدل شبکه عصبی برای برآورد تابش کل خورشیدی دریافتی در سطح زمین ایجاد و یافته‌های آن را با نتایج مدل آنگستروم مقایسه کردند. سنجش دستاوردهای شبکه عصبی با دستاوردهای مدل آنگستروم و داده‌های دیده‌بانی شده، نشانگر برتری معنی‌دار مدل شبکه عصبی نسبت به روش آنگستروم بود. با این وجود می‌توان گفت که در ایران در زمینه ارائه مدل‌های کلی<sup>۱</sup> برای تخمین انرژی خورشیدی دریافتی در سطح یک منطقه تحقیقات کافی صورت نگرفته و بیشتر مدل‌های پیشنهادی وابسته به مکان<sup>۲</sup> خاص هستند. خسروی و همکاران (۱۲)، در پژوهشی تابش خورشیدی دریافتی در سطح افقی زمین را با استفاده از پارامترهای اقلیمی در محیط GIS در استان آذربایجان شرقی برآورد نمودند. بدین منظور از داده‌های تابش ماهانه ایستگاه تبریز سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۶ و داده‌های اقلیمی ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۷ استفاده کردند و میزان تابش در این استان را در چهار مقطع زمانی فصول زمستان، تابستان، پاییز و بهار بدست آوردند. در ایران میزان انرژی خورشیدی دریافتی به طور متوسط حدود  $18 Mj/m^2.day$  یا  $1028 Mj/year$  می‌باشد که تبدیل آن به انرژی الکتریکی می‌تواند ۳۳٪ انرژی جهان و ۴۰۰۰ برابر کل انرژی مصرفی کشور را تامین نماید. با توجه به مساحت ایران، میزان کل انرژی دریافتی سالانه حدود  $10^{16} Mj$  می‌باشد که از این نظر جزو کشورهای بسیار غنی جهان محسوب می‌شود (۱۳). بر اساس سیستم طبقه‌بندی آب و هوایی کوپن، ایران به قسمت‌های بیابانی، سواحل دریای خزر، مدیترانه‌ای، کوهستانی و نیمه بیابانی تقسیم شده که استان‌های یزد، کرمان، اصفهان و خراسان جنوبی، در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی ایران با بهره‌مندی از شرایط اقلیمی و جغرافیایی مناسب از انرژی خورشیدی دریافتی نسبتاً بالایی برخوردار هستند. هدف از پژوهش حاضر، ارائه یک مدل کلی جهت برآورد میزان انرژی

1- General model  
2- Site-dependent

جدول ۱- اطلاعات و مختصات ایستگاه‌های هواشناسی

Table 1- Information and Coordinates of the meteorological stations

ایستگاه Station	طول جغرافیایی Longitude (° E)	عرض جغرافیایی Latitude (N)	ارتفاع از سطح دريا Altitude (M)	میانگین دمای حداکثر Maximum temperature (°C)	میانگین تابش خورشیدی Solar irradiation (Mj/m <sup>2</sup> .day) mean
یزد Yazd	54° 17'	31° 54'	1237.2	26.8	21.1
اصفهان Isfahan	51°40'	32° 37'	1550.4	23.87	17.65
کرمان Kerman	56° 58'	30°15'	1753.8	25.19	20.88
بیرجند Birjand	59° 13'	32°52'	1491	24.76	18.81

$$R_o = 37.6d_r (\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \phi \sin \delta) \quad (1)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (2)$$

$$\delta = 0.4093 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (3)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (4)$$

$d_r$  فاصله نسبی زمین و خورشید

$\phi$  عرض جغرافیایی (بر حسب رادیان)

$\delta$  زاویه میل خورشیدی (بر حسب رادیان)

$\omega_s$  زاویه ساعتی خورشید در هنگام غروب (بر حسب رادیان)

$J$  شماره ژولیبوسی روزهای سال (از ۱ تا ۳۶۵ یا ۳۶۶)

مطالعه و دیگر پارامترهای اقلیمی که بدان‌ها اشاره شد در مقیاس زمانی ماهانه با استفاده از نرم‌افزار SPSS رگرسیون چندگانه انجام شد و در نهایت با استفاده از دمای بیشینه دمای هوا ( $T_{max}$ ) یک مدل تجربی، در ایستگاه‌های اصفهان، کرمان، مشهد، طبس و خوربیا بانک ارائه گردید (معادله ۵). تعداد ایستگاه‌های موجود در منطقه ۵۰ ایستگاه هواشناسی است که میزان تابش خورشیدی دریافتی در سطح زمین براساس مدل، با استفاده از پارامترهایی که مدل تخمینی نیاز داشت مانند داده‌های دمای حداکثر روزانه ( $T_{max}$ ) برآورد گردید.

$$R_s = a \times T_{max} + b \times R_o + c \quad (5)$$

تابش خورشیدی به خصوص در دوره‌های درازمدت در مقایسه با پراسنج‌های دمایی کمتر اندازه‌گیری می‌شود به طوری که در چین از ۲۰۰۰ ایستگاه هواشناسی فقط ۹۸ مورد (۱۴) و در ایران حدود ۱۲٪ ایستگاه‌های هواشناسی هم‌دیدی این پراسنج را اندازه‌گیری و ثبت می‌کنند (۵)، که در بسیاری از موارد این‌گونه داده‌ها دارای نواقص و کمبودهای آماری هستند و باید بر اساس مدل‌های ریاضی به گونه‌ای آن را تخمین زد. بنابراین تخمین غیرمستقیم  $R_s$  براساس دیگر متغیرهای هواشناسی رایج از جمله دما و ساعات آفتابی هم اکنون مورد توجه خاص محققین است. در این پژوهش اولین گام نیازمند به برآورد انرژی خورشیدی در منطقه مورد مطالعه بود. بنابراین بین داده‌های واقعی تابش خورشیدی در ۴ ایستگاه واقع در منطقه‌ی مورد

جدول ۲- ضرایب معادله ۵  
Table 2- Coefficients for Eq. (5)

ایستگاه Station	A	B	C
اصفهان Isfahan	0.111	0.51	-0.66
کرمان Kerman	0.276	0.477	-0.125
مشهد Mashhad	0.296	0.352	-0.14
طبس Tabas	0.21	0.45	-0.68
خورویبایانک Khur and Biabanak	0.07	0.532	-1.25
یزد Yazd	0.457	0.263	-0.86
بیرجند Birjand	0.517	5.97	0.157

پایین  $R_s$  و ارزش منفی  $R_s$  را بیش از حد تخمین می‌زند. ارزش‌های پایین RMSE و MBE نشان می‌دهد که کارایی مدل برآورد کننده خوب است. بر طبق جدول ۳، براساس شاخص کارایی مدل، مدل ارائه شده در پژوهش حاضر به میزان ۰/۹۸، عملکرد خوبی را نشان می‌دهد. علاوه بر این بر اساس میانگین خطای معیار و میانگین جذر مربعات خطا مدل ارائه شده کم‌ترین مقدار میانگین را دارا می‌باشند که این خود بیانگر کارایی بالای آن می‌باشد. بنابراین با توجه به شاخص‌های کارایی مذکور، مدل ارائه شده که برای اولین بار در کشور پیشنهاد می‌شود، با میانگین ME ۰/۹۸، میانگین MBE ۰/۰۵۷-، میانگین RMSE ۵/۱۱ و میانگین CRM ۰/۰۴۲ بهترین برآورد  $R_s$  را در این ایستگاه‌ها نشان داده که گویای حداکثر کارایی این مدل است و می‌توان از آن برای برآورد انرژی خورشیدی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی ایران استفاده نمود و سپس برای برآورد مقدار تابش خورشیدی دریافتی در سطح زمین در ایستگاه‌های فاقد داده‌های تابش خورشیدی ثبت شده، از این مدل برای برآورد تابش خورشیدی در سطح منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده گردید.

#### تحلیل زمین آمار و انتخاب روش پهنه‌بندی

زمین آمار بر اساس ساده‌ترین تعریف، در واقع یک روش درون‌یابی است که معیار مورد استفاده در آن برای درون‌یابی یا تخمین، کمینه شدن مقدار واریانس تخمین است (۹). درون‌یابی در واقع برآورد میزان متغیر پیوسته مجهول بر اساس نمونه‌های معلوم در منطقه است (۱۵). تخمین زمین آماری یکی از دقیق‌ترین روش‌های تخمین است، چرا که عوامل زیادی نظیر فاصله نقاط، ناهمسانگردی، تغییرپذیری فضایی را مورد بررسی قرار می‌دهد. اما این روش حجم محاسبات بسیار بالایی دارد که سبب می‌شود در عملیات‌های بزرگ، زمان محاسبات افزایش یابد (۸).

#### معیارهای ارزیابی مدل

برای ارزیابی دقت و اعتبارسنجی مدل‌ها و مقایسه نسبی نتایج مدل‌های تخمینی با مقادیر اندازه‌گیری شده تابش رسیده به سطح زمین، از چهار شاخص کارایی شامل RMSE، ME، CRM و MBE که از فرمول‌های زیر محاسبه می‌شوند، استفاده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۶)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (۷)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (۸)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۹)$$

در این معادلات  $P_i$  مقدار برآورد شده تابش خورشیدی،  $O_i$  مقدار اندازه‌گیری شده تابش خورشیدی و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشد. کم‌ترین ارزش RMSE، نزدیک به صفر به معنی دقت بیشتر مدل برآوردکننده است. ارزش بالاتر کارایی مدل<sup>۱</sup> (نزدیک به یک) بیانگر کارایی بهتر مدل است و مقدار CRM نشانه‌ی برآورد بیشتر یا پایین‌تر  $R_s$  می‌باشد، به طوری که ارزش مثبت بیانگر تمایل مدل به برآورد

جدول ۳- ارزیابی آماری مدل پیشنهادی برای برآورد تابش خورشیدی

Table 3- Statistical evaluation of the proposed model to estimate solar radiation

شاخص Index	ایستگاه Station	مدل Model
MRC	اصفهان Isfahan	0.0037
	کرمان Kerman	0.0007
	مشهد Mashhad	0.1
	طیس Tabas	0.0009
	خوروبیابانک Khur and Biabanak	0.0008
	میانگین Mean	0.0042
EM	اصفهان Isfahan	0.97
	کرمان Kerman	0.98
	مشهد Mashhad	0.97
	طیس Tabas	0.98
	خوروبیابانک Khur and Biabanak	0.98
	میانگین Mean	0.98
MBE ( $\text{jM. d}^{-1} . \text{m}^{-2}$ )	اصفهان Isfahan	-0.066
	کرمان Kerman	0.0008
	مشهد Mashhad	-0.18
	طیس Tabas	-0.0157
	خوروبیابانک Khur and Biabanak	-0.0137
	میانگین Mean	-0.057
RMSE ( $\text{jM. d}^{-1} . \text{m}^{-2}$ )	اصفهان Isfahan	5.9
	کرمان Kerman	4
	مشهد Mashhad	5.9
	طیس Tabas	4.97
	خوروبیابانک Khur and Biabanak	4.8
	میانگین Mean	5.11

### واریوگرام

واریوگرام یکی از مهم‌ترین مفاهیم زمین‌آمار است که اغلب تعاریف و مفاهیم دیگر زمین‌آمار بر اساس آن تبیین می‌گردند. برای تعیین میزان همبستگی مکانی یک متغیر در فواصل نمونه‌برداری شده و استخراج پارامترهای لازم در مراحل درون‌یابی از واریوگرام استفاده می‌شود. واریوگرام اولین قدم برای مدل‌سازی ساختار مکانی به منظور استفاده در کریجینگ است. هدف اصلی از برقراری تابع نیم تغییرنا آن است که بتوان ساختار تغییرپذیری متغیر را نسبت به فاصله مکانی شناسایی نمود. واریوگرام از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود (۲۲).

تحلیل زمین‌آمار به بررسی پدیده‌های متغیر در زمان و مکان و آنالیز نقاط نمونه‌برداری شده با موقعیت‌های متفاوت به منظور تولید یک سطح پیوسته می‌پردازد (۱۰). آنالیزهای زمین‌آمار به دنبال راهی برای توصیف پیوستگی مکانی و همچنین جمع‌آوری ابزارهای آماری و قطعی و مدل نمودن این دسته از تغییرات هستند. فرض اساسی این روش تحلیل مکانی-آمار این است که مشاهدات نزدیک به هم نسبت به مشاهدات دور از هم از همبستگی آماری بیشتری برخوردارند. لازم به ذکر است، امکان دستیابی به نتایج صحیح و کارا از طریق این نوع آنالیزها، زمانی حاصل می‌گردد که داده‌ها دارای توزیع نرمال بوده و حتی المقدور ثابت بوده و میانگین و واریانس آنها در فضا متغیر نباشد (۴).

جدول ۴- آنالیز آماری واریوگرام فصلی ایستگاه‌ها  
Table 4- Analysis of seasonal Variogram of stations

مدل واریوگرام	فصل Season	Nugget C <sub>0</sub>	Sill C <sub>0</sub> +C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion on C/(C <sub>0</sub> +C)	R <sup>2</sup>	RSS
Spherical	زمستان Winter	0.58	7.169	1357000	57000	0.919	0.895	2.28
	بهار Spring	0.42	5.73	681000	81000	0.927	0.86	3.89
	تابستان Summer	0.01	6.75	42000	2000	0.999	0.847	6.11
	پاییز Fall	0.58	6.2	717000	17000	0.9	0.877	3.84
Exponential	زمستان Winter	0.43	6.86	598000	94000	0.937	0.873	2.93
	بهار Spring	0.2	7.214	426000	78000	0.972	0.83	4.64
	تابستان Summer	0.01	7.3	201000	3000	0.999	0.819	7.41
	پاییز Fall	0.02	7.49	381000	35409	0.997	0.885	3.61
Linear	زمستان Winter	0.6927	5.53	735439	35409.9	0.875	0.892	81
	بهار Spring	1.29	6.41	735409	35409.91	0.798	0.775	94.1
	تابستان Summer	2.64	7.94	735409.9	35409.9	0.668	0.582	111
	پاییز Fall	1.343	6.97	73549	35409	0.807	0.831	112
Linear to sill	زمستان Winter	0.71	7.25	998000	98000	0.902	0.892	2.24
	بهار Spring	1.31	8.61	1056000	56000	0.848	0.775	6.23
	تابستان Summer	2.67	11.24	1212000	13000	0.766	0.582	16.6
	پاییز Fall	1.36	8.72	966000	66000	0.842	0.83	5.3
Gaussian	زمستان Winter	1.09	7.808	485000	40044.64	0.812	0.913	1.87
	بهار Spring	1.31	5.77	335000	80237.02	0.804	0.86	3.87
	تابستان Summer	0.9	6.81	202000	49874	0.868	0.851	5.9
	پاییز Fall	1.15	6.08	313000	42131	0.811	0.863	4.29

با کمترین خطای باقیمانده<sup>۲</sup> و بیشترین ضریب همبستگی<sup>۳</sup> ۱/۸۷ و ۰/۹۱۳، بهار با RSS و R<sup>2</sup> ۳/۸۷ و ۰/۸۶ و تابستان با RSS و R<sup>2</sup> ۵/۹ و ۰/۸۵۱ و در فصل پاییز مدل‌نمایی با RSS و R<sup>2</sup> ۳/۶۱ و ۰/۸۸ و روش کربجینگ بهترین برازش را داشت.

#### پهنه‌بندی R<sub>s</sub> تخمینی براساس مدل پیشنهادی

برای پهنه‌بندی تابش خورشیدی در سطح استان‌های یزد، اصفهان، کرمان و خراسان جنوبی ابتدا برانده‌ترین واریوگرام، جهت درون‌یابی مقادیر انرژی خورشیدی در نرم‌افزار GS+ انتخاب و سپس نقشه‌های فصلی تابش خورشیدی با استفاده از نرم‌افزار ArcMap 9.3 ترسیم و میزان تابش فصلی دریافتی در پهنه‌ی ۴ استان یزد، اصفهان، کرمان و خراسان جنوبی برآورد گردید.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i) - z(x_{i+h})]^2 \quad (10)$$

که در آن:

$\gamma(h)$ : مقدار نیم‌تغییرنما<sup>۱</sup> برای جفت نقاطی که به فاصله h از

هم قرار دارند.

n: تعداد زوج نقاطی است که به فاصله h از یکدیگر قرار دارند.

$z(x_i)$ : مقدار مشاهده شده متغیر در نقطه x.

$z(x_{i+h})$ : مقدار مشاهده شده متغیری که به فاصله h از x

قرار دارد (۲۲).

در منحنی واریوگرام با افزایش فاصله (h) مقدار  $\gamma(h)$  افزایش می‌یابد و این وضعیت تا فاصله معینی ادامه دارد که از آن پس مقدار آن ثابت می‌شود. در این پژوهش برای انتخاب روش مناسب پهنه-بندی ابتدا واریوگرام‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار GS+ محاسبه و رسم شده‌اند، با توجه به جدول زیر در فصل زمستان مدل گوسین

2- RSS  
3- R2

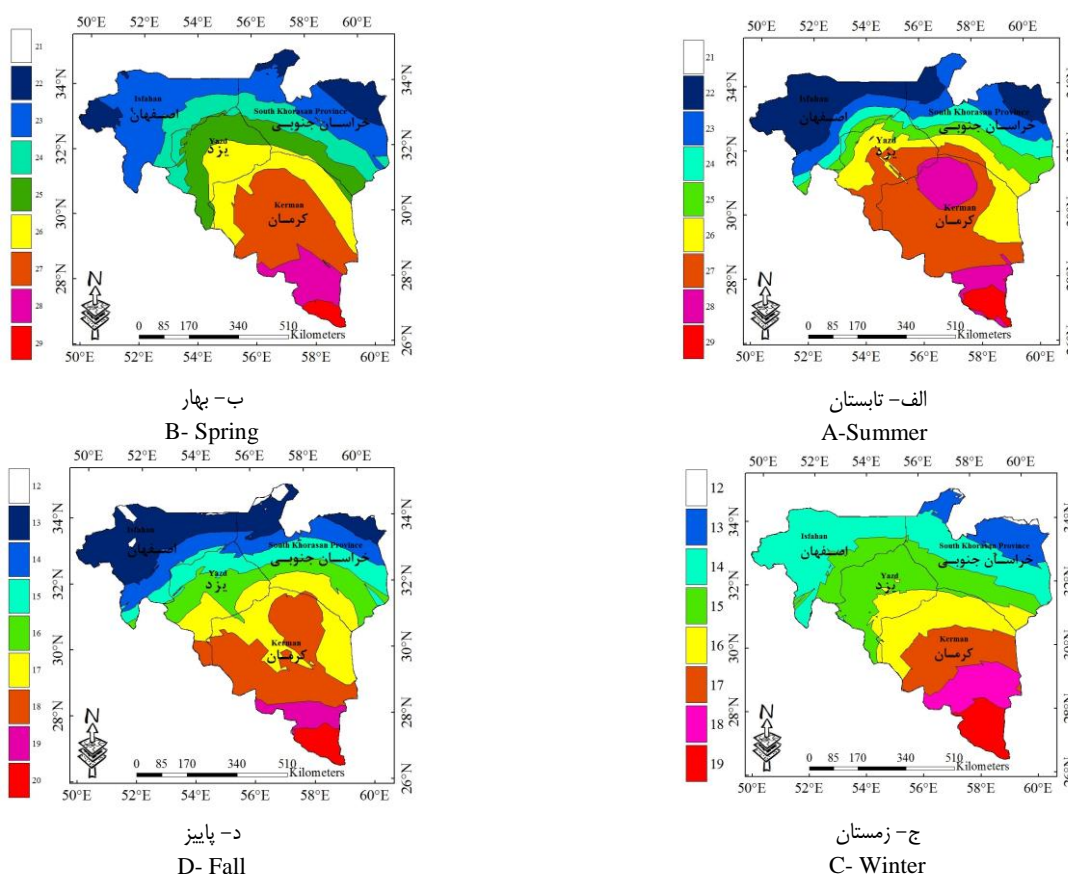
1- Semi Variogram

## نتایج و بحث

### تغییرات فصلی انرژی تابشی

بطور کلی در منطقه مورد مطالعه میانگین انرژی تابشی دریافتی در سطح زمین در همه فصول از شمال به جنوب افزایش یافته و در فصل گرم (تابستان) و نسبتاً گرم (بهار) سال، مقادیر  $R_s$  بیشتر از فصل سرد (زمستان) و نسبتاً سرد (پاییز) است. در فصل گرم (تابستان) بر خلاف دیگر فصول مقادیر بالای  $R_s$  علاوه بر بخش‌های جنوبی منطقه در قسمت‌هایی از مرکز آن هم مشاهده می‌شود (شکل ۱- الف). همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود منحنی‌های هم‌ارزش تابشی در فصل زمستان نسبت به فصول دیگر منطبق با عرض‌های جغرافیایی از نظم و توازی بیشتری برخوردارند. این وضعیت با

فرارسیدن پاییز و بویژه در بهار تغییر یافته و در تابستان کاملاً بی‌نظم می‌شوند. گرادیان (شیب) مکانی مقادیر تابش در زمستان نسبت به فصل‌های دیگر کمتر است. این شیب در همه فصول بویژه در تابستان در بخش‌های شمالی منطقه بیشتر از قسمت‌های جنوبی است و زون‌های تابشی هم‌ارزش در همه فصول به تبعیت از تغییر مکان عمودیت اشعه خورشید از شمال به جنوب و بالعکس جابجا می‌شوند. شکل خاص استان کرمان یعنی گسترش مداری و نیز موقعیت جغرافیایی آن، موجب شده تا در این استان زون‌های کمی تابش دریافتی در طول سال نسبت به استان‌های دیگر منطقه مورد مطالعه از تنوع بیشتری برخوردار باشد (بین ۱۵ تا  $29 \text{ Mj/m}^2.\text{day}$ ).

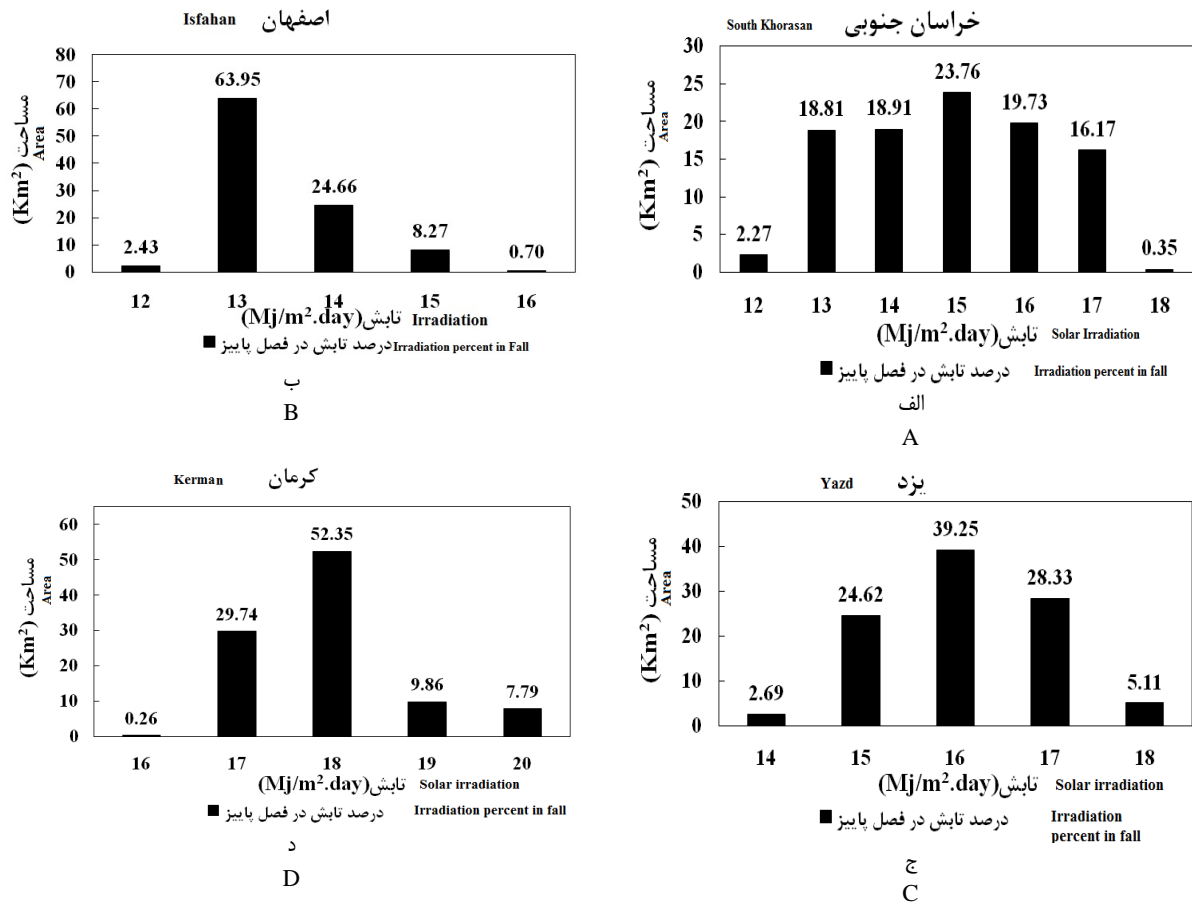


شکل ۱- پراکنش مکانی- فصلی میانگین  $R_s$  بر اساس مدل پیشنهادی

Figure 1- The spatial\_ seasonal distribution of the average of  $R_s$  based on the proposed model

انتقالی سال (بهار و پاییز) نیز همین وضعیت اما با شدت کمتری حاکم است. تغییرات فصلی گستره‌های برخوردار از بیشترین مقادیر تابش در استان یزد از آهنگی منظم و قانونمند پیروی می‌کند (شکل ۲- ج و ۵- ج).

پراکنش مکانی مقادیر تابش در استان یزد بین تابستان و زمستان کاملاً متفاوت و از تباین خاص و بارزی برخوردار است. زیرا در حالی که بیش از ۵۳٪ از مساحت این استان در تابستان از تابشی معادل  $26 \text{ Mj/m}^2.\text{day}$  بهره می‌برد، در زمستان بیش از ۸۰٪ آن ۱۵  $\text{Mj/m}^2.\text{day}$  تابش دریافت می‌کند (شکل ۳- ج و ۴- ج). در فصول

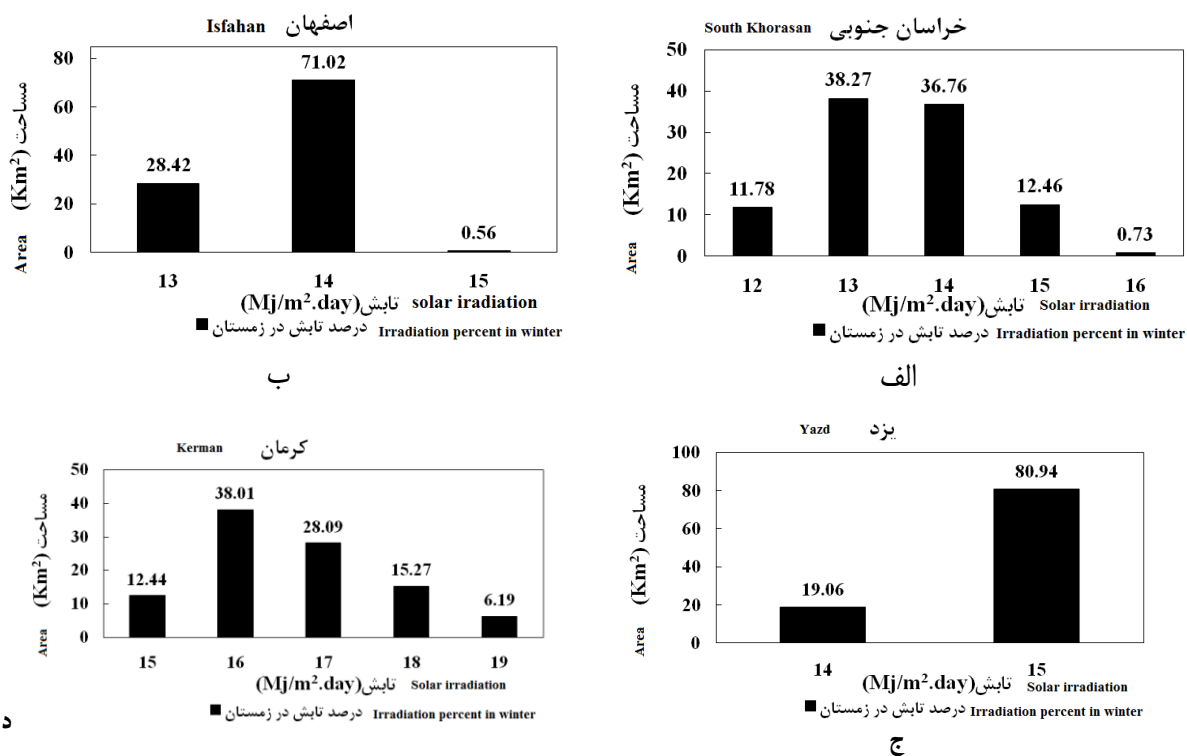


شکل ۲- درصد مقادیر  $R_s$  بر اساس مدل پیشنهادی در پاییز  
Figure 2- The percentage of  $R_s$  values based on the model proposed in autumn

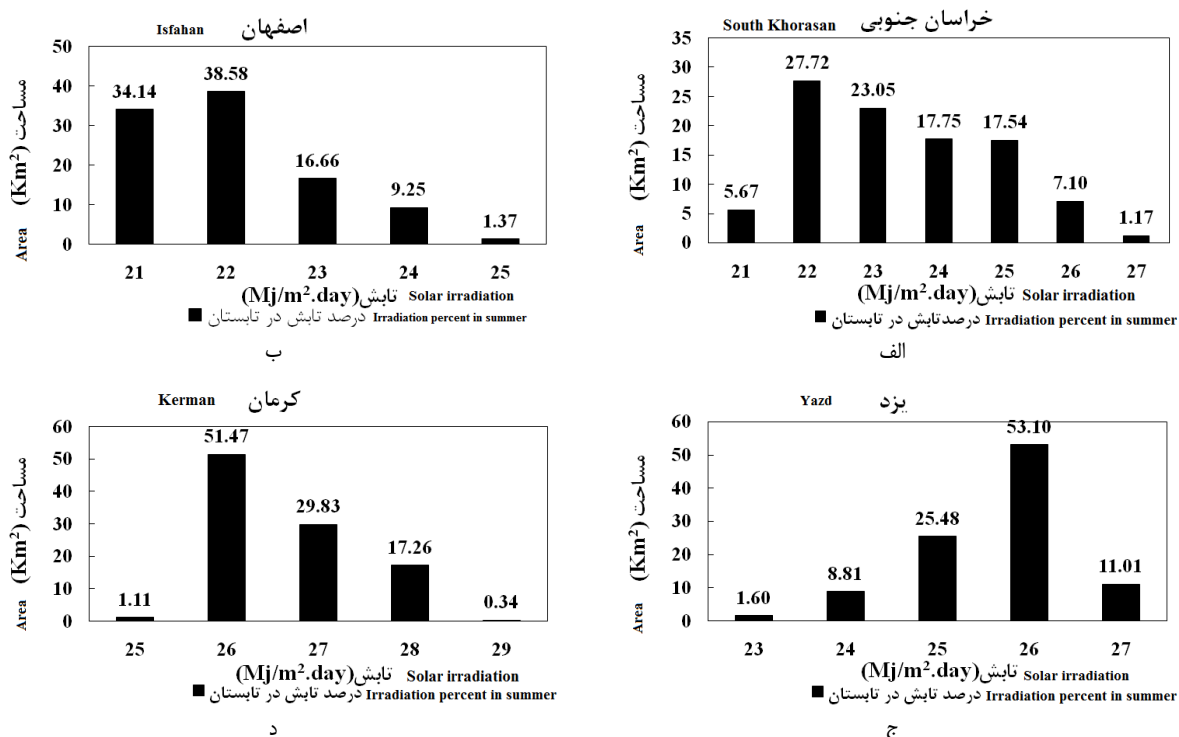
استان از تابش ۱۶  $Mj/m^2.day$  برخوردار می‌شود. چون استان اصفهان برخلاف کرمان از گسترش مداری چندانی برخوردار نیست، این استان در مقایسه با دیگر استان‌های مورد مطالعه ویژگی‌های تابشی خاص خود را می‌یابد. تنوع زون‌های تابشی بویژه در فصول بهار، پاییز و زمستان کاهش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد (شکل ۲-ب، شکل ۳-ب و شکل ۵-ب). در بهار ۹۲٪ از وسعت استان تابشی برابر با ۲۳-۲۲  $Mj/m^2.day$  دریافت می‌کند، در حالی که این مقدار تابش در تابستان ۵۵٪ استان را بهره‌مند می‌سازد. ضمناً در این فصل تنوع و تعداد این زون‌ها بیشتر است (از ۲۱ تا ۲۵  $Mj/m^2.day$ ). استقرار خراسان جنوبی در شمالی‌ترین بخش‌های منطقه موجب شده که مقدار تابش دریافتی سالانه آن از بخش‌های دیگر منطقه کمتر باشد. این کاهش بویژه در زمستان بیشتر است بطوری که تنها استانی است که ۱۲٪ از مساحت آن در این فصل تابشی برابر با ۱۲  $Mj/m^2.day$  دریافت می‌کند (شکل ۳-الف). بعلاوه تعداد و تنوع زون‌های تابشی در این فصل نسبت به فصول دیگر نسبتاً کمتر است (شکل ۲-الف و شکل ۴-الف).

استان کرمان بعلاوه این که در جنوبی‌ترین قسمت منطقه واقع شده، نسبت به استان‌های دیگر از تابش خورشیدی بیشتری بهره‌مند است. این ویژگی در زمستان بارزتر است زیرا در این فصل مقادیر تابش کرمان در مقایسه با یزد نه تنها دامنه تغییرات بیشتری بین ۱۵ تا ۱۹  $Mj/m^2.day$  دارد، بلکه در حدود ۴۰٪ از مساحت این استان از ۱۶  $Mj/m^2.day$  تابش برخوردار است، در صورتی که در یزد این مقدار تابش در این فصل اصلاً دریافت نمی‌شود. ویژگی‌های فوق باعث شده که تفاوت زیادی از جهت بهره‌گیری از مقادیر کمی مختلف تابشی در فصول بهار و تابستان در این استان بوجود نیاید. زیرا در این فصول در حدود ۵۰٪ استان از تابشی برابر با ۲۶  $Mj/m^2.day$  بهره‌مند می‌شود (شکل ۴-د و شکل ۵-د). گرچه پراکنش مکانی آن در این دو فصل کاملاً با یکدیگر متفاوت است. بعلاوه زون تابشی ۱۸  $Mj/m^2.day$  در فصل پاییز تا بخش‌های شمالی استان کرمان امتداد یافته و ۵۲٪ از وسعت آن را در بر می‌گیرد. اما در زمستان این زون تابشی منحصر به سمت جنوب جابجا شده ولی ۲۸٪ از مساحت

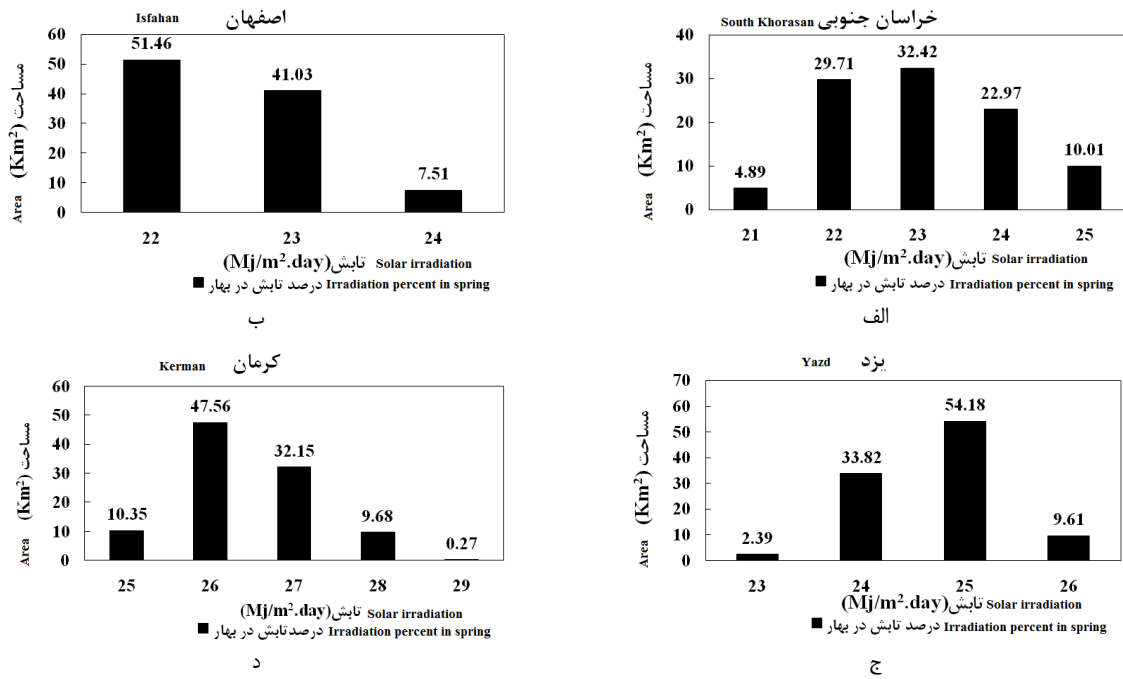




شکل ۳- درصد مقادیر  $R_s$  بر اساس مدل پیشنهادی در زمستان  
Figure 3- The percentage of  $R_s$  values based on the model proposed in winter



شکل ۴- درصد مقادیر  $R_s$  بر اساس مدل پیشنهادی در تابستان  
Figure 4- The percentage of  $R_s$  values based on the model proposed in summer



شکل ۵- درصد مقادیر  $R_s$  بر اساس مدل پیشنهادی در بهار  
Figure 5- The percentage of  $R_s$  values based on the model proposed in spring

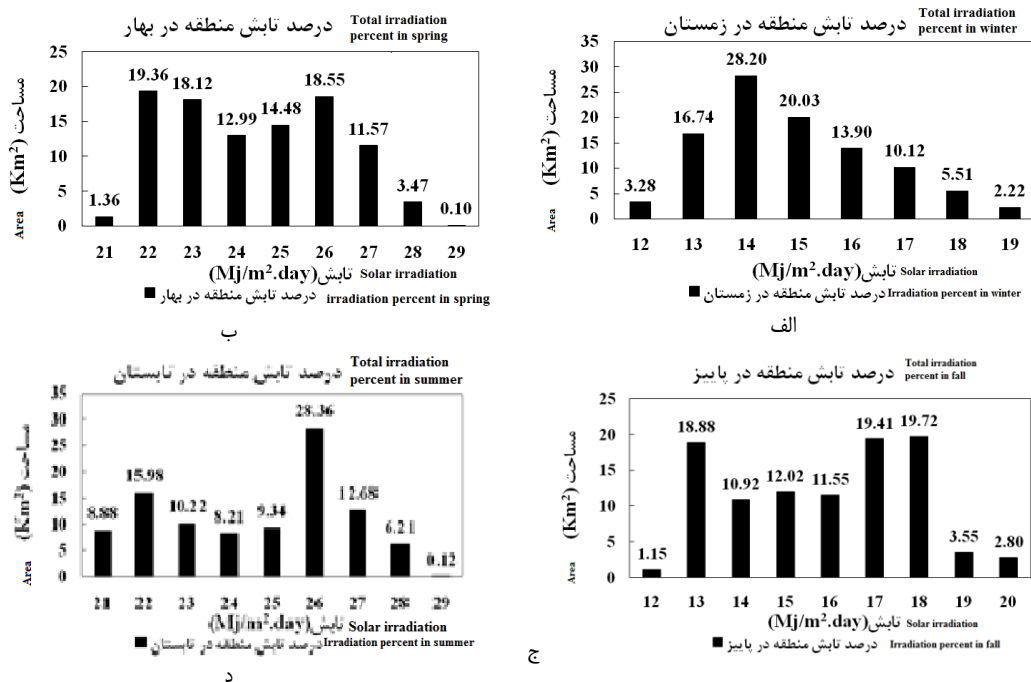
زمین با یکدیگر قطعا تا حد زیادی تعیین کننده شرایط تابشی منطقه است بطوری که استقرار منحنی بسته ۲۸  $Mj/m^2.day$  در بخش‌های مرکزی منطقه در تابستان، یا گسترش زبانه‌ای از زون تابشی ۱۸  $Mj/m^2.day$  در پاییز به این بخش همه حاصل غلبه سیستم‌های پرفشار جنب حاره‌ای<sup>۱</sup> بر این اراضی صاف و همگن بوده و در نهایت باعث ایجاد وضعیتی پایدار، رخداد همرفت‌های حرارتی، صافی آسمانی عاری از پوشش ابری و غبار و دریافت مقادیر متنابهی از تابش خورشیدی در سطح زمین می‌شوند. نمودارهای شکل ۶ توزیع مکانی مقادیر مختلف  $R_s$  را در کل منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. بررسی این نمودارها خود بیانگر صحت و دقت نتایج و مطالبی است که در بالا بدان اشاره شده است. در نگاه اول به این نمودارها می‌توان به تفاوت چشمگیر فصلی مقادیر  $R_s$  پی برد: در فصول سرد و نسبتا سرد سال (زمستان و پاییز)، طبقات تابشی در دامنه تغییرات ۲۰-۱۲  $Mj/m^2.day$  ولی در فصول گرم و نسبتا گرم سال (تابستان و بهار) این مقادیر در فاصله کمی ۲۹-۲۱  $Mj/m^2.day$  قرار می‌گیرند. یعنی در فصول اخیر میزان تابش خورشیدی دریافتی در سطح زمین بیشتر است. نکته مهم دیگر اینکه نمودارهای توزیع مقادیر تابشی در فصول انتقالی (بهار و پاییز) تقریبا دونمایی<sup>۲</sup> بوده اما در فصول گرم و سرد سال از یک حالت یک نمایی برخوردارند با این تفاوت که

اگرچه بیان و توجیه دقیق شرایط و عواملی که موجب ایجاد چنین الگوهای پراکنش مکانی  $R_s$  در منطقه می‌شوند از اهداف این مقاله نبوده، اما نقشه‌های مذکور بیانگر آنند که بی شک در منطقه مورد مطالعه عرض جغرافیایی که خود تعیین کننده میزان تابش دریافتی در واحد سطح زمین است، عامل مهمی در تغییرات مکانی  $R_s$  است. برخی از محققین پیشین هم به نتایج مشابهی رسیده‌اند (۱۷ و ۱۸). نکته قابل توجه دیگر در این نقشه‌های مذکور اینکه در همه فصول سال منحنی‌های هم ارزش تابشی در قسمت‌های جنوبی تر منطقه تا حد زیادی به تبعیت از مدارات داشته اما با جایجایی به بخش‌های شمالی تر این نظم و توازن با مدارات بعلت تاثیر عوامل دیگر جغرافیایی و اقلیمی بهم می‌ریزد. در این میان نقش وضعیت توپوگرافیک و عبارت دقیق تر ارتفاع از سطح دریا در بعضی فصول و در برخی از بخش‌ها چشمگیرتر است. بدین ترتیب که اگرچه در بخش‌های جنوبی فاصله از استوا نقش ارتفاعات (هزار و لاله‌زار کرمان) را کم ارزش تر نشان می‌دهد، ولی انحنای شدید زون‌های تابشی ۱۵ و ۱۴  $Mj/m^2.day$  به سمت جنوب در فصل زمستان و بویژه زون‌های تابشی ۲۳ تا ۲۵  $Mj/m^2.day$  در بهار به همین جهت، گویای تاثیر نسبی ارتفاعات (شیرکوه یزد و ارتفاعات غربی اصفهان) هستند. نکته دیگر اینکه سامانه‌های همیدی ورودی و غلبه آنها بر منطقه در طول سال و جمع جبری تعامل و اثرات پیچیده و متقابل بین آنها و عوارض و پدیده‌های سطحی

1- Sub-Tropical High Pressure  
2- Bimodal

زمین که بصورت درصد مساحت تجمعی محاسبه شده نشان می‌دهد. اولین نکته قابل توجه در این شکل تفاوت فصلی چشمگیر مقادیر  $R_s$  است بطوری که در بالا بدان اشاره شد، منحنی‌های تابستان و بهار در سمت راست و منحنی‌های پاییز و زمستان در سمت چپ محور افقی شکل و در وضعیتی کاملاً متمایز از هم واقع شده‌اند. منحنی زمستانی یک رابطه لگاریتمی ( $R^2=97\%$ ) را نشان می‌دهد.

چولگی منحنی زمستان به سمت مقادیر کمتر (با نمای  $14 \text{ Mj/m}^2.\text{day}$  تابش دریافتی در  $28\%$  وسعت)، اما منحنی تابستانی دارای حالت چولگی به راست با نمای  $26 \text{ Mj/m}^2.\text{day}$  تابش دریافتی در  $28\%$  وسعت می‌باشد. نمودارهای تجمعی مقادیر  $R_s$  به تفکیک فصلی در شکل ۷ نشان داده شده که بیانگر حقایق دیگری است: هر یک از منحنی‌های شکل ۷ مقادیر طبقات مختلف  $R_s$  را در سطح



شکل ۶- درصد مقادیر  $R_s$  بر اساس مدل پیشنهادی به تفکیک فصول در منطقه مورد مطالعه  
Figure 6- The percentage  $R_s$  values based on the proposed model separate seasons in the study area

۱۰٪ وسعت تجمعی ( $21 \text{ Mj/m}^2.\text{day}$ ) آغاز و شیب فزاینده آن در دامنه تابشی  $28-25 \text{ Mj/m}^2.\text{day}$  بیانگر این است که چنانکه قبلاً گفته شد، در این فصل بخش‌های عمده‌ای از مساحت منطقه مورد مطالعه از مقادیر بالای  $R_s$  برخوردار بوده و حتی زون‌های تابشی  $25-24 \text{ Mj/m}^2.\text{day}$  تا شمالی‌ترین بخش‌های منطقه پیش رفته‌اند.

### نتیجه‌گیری

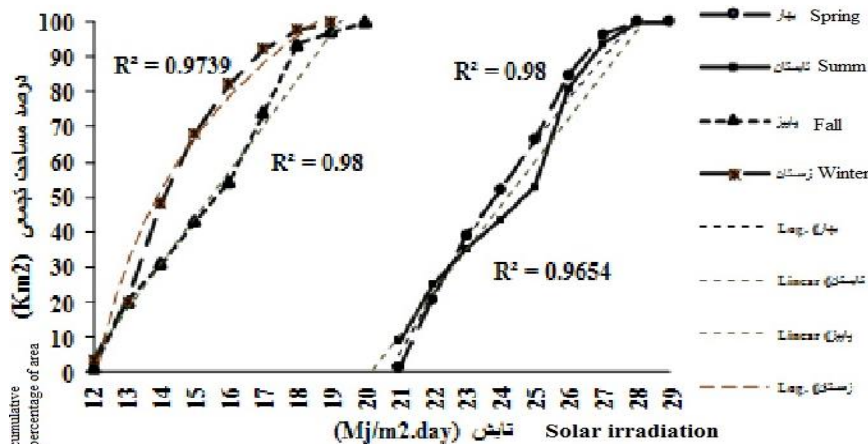
پژوهش حاضر به منظور تخمین و پهنه‌بندی میزان انرژی خورشیدی دریافتی در چهار استان یزد، اصفهان، کرمان و خراسان جنوبی انجام شده است. یکی از روش‌های متداول برای تخمین انرژی خورشیدی رسیده به زمین، استفاده از متغیرهای دمایی در هر مکان است. بدین منظور با استفاده از دماهای پنج‌گانه در مقیاس زمانی روزانه، ابتدا با استفاده از یک مدل ریاضی معتبر برای مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران ۵۰ ایستگاه هواشناسی که میزان تابش خورشیدی

منحنی پاییز که دارای رابطه رگرسیونی خطی ( $R^2=98\%$ ) است، وضعیتی متفاوت داشته و اولاً نقطه آغاز آن در روی محور عمودی نمودار بیشتر (۵٪) بوده و ثانیاً در طبقات تابشی  $14-18 \text{ Mj/m}^2.\text{day}$  شیب منحنی بر حسب درصد مساحت، ناگهان افزایش می‌یابد که بیانگر دریافت  $R_s$  بیشتری در پاییز نسبت به زمستان است. با این تفاوت که این منحنی اولاً دارای رابطه رگرسیونی لگاریتمی ( $R^2=96\%$ ) بوده و ثانیاً همانگونه که در نقشه ب و د در شکل ۱ دیده می‌شود، دامنه تغییرات  $R_s$  در بهار بین  $22-29 \text{ Mj/m}^2.\text{day}$  اما در پاییز بین  $10-12$  می‌باشد. افزایش نسبی شیب هر دو منحنی پاییزی و بهاری با باریک شدن پهنای زون‌های تابشی با مقادیر نسبتاً کمتر در بخش‌های شمالی منطقه (نقشه‌های ب و د شکل ۱) تطابق دارند.

منحنی مربوط به فصل تابستان (شکل ۷) با رابطه رگرسیونی خطی ( $R^2=96\%$ ) ویژگی‌های منحصر بفردی دارد زیرا ابتدای آن از

مناسبی برای استفاده از سیستم فتوولتائیک برخوردار است. همچنین ۵۳٪ از مساحت استان یزد در تابستان تابشی معادل  $26 \text{ Mj/m}^2 \cdot \text{day}$  و در زمستان بیش از ۸۰٪ آن  $15 \text{ Mj/m}^2 \cdot \text{day}$  تابش دریافت می‌کند (شکل ۳- ج و ۴- ج).

ثبت نمی‌گردید میزان  $R_s$  برآورد شد، سپس روش مناسب درون‌یابی با استفاده از نرم‌افزار GS+ انتخاب و نقشه‌های فصلی دریافت انرژی خورشیدی در سطح زمین با نرم‌افزار GIS ترسیم گردید. نتایج نشان داد که پهنه‌ی استان کرمان با دریافت بیشترین انرژی خورشیدی معادل  $48905265896.3$  مگا ژول در فصل تابستان از موقعیت



شکل ۷- نمودارهای تجمعی مقادیر  $R_s$  بر اساس مدل پیشنهادی به تفکیک فصول در منطقه مورد مطالعه

Figure 7- Plots the cumulative amount of  $R_s$  based on the proposed model according to the seasons in the study area

پایداری هوا، رخداد همرفت‌های حرارتی، صافی آسمانی عاری از پوشش ابری و غبار به طور کلی استان کرمان به طور میانگین با دریافت  $27/25 \text{ (Mj m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$ ، بیشترین و استان اصفهان با  $21/54 \text{ (Mj m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$ ، کمترین میزان انرژی تابشی را در طی فصل تابستان دریافت نموده است. خسروی و همکاران (۱۲)، برای برآورد و پهنه‌بندی میزان تابش کل رسیده به سطح افقی در استان آذربایجان شرقی، طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۶ از عناصر اقلیمی (کمینه، بیشینه و میانگین دما، کمینه رطوبت، ابرناکی آسمان و ساعات آفتابی) استفاده نمودند. با توجه به نقشه‌های توزیع تابش ماهانه، الگوی تابش در این استان به چهار مقطع زمانی، فصل زمستان، بهار، تابستان و پاییز تقسیم گردید. نتایج نشان داد که کمترین میزان تابش مربوط به ماه ژانویه و بیشترین میزان آن مربوط به ماه ژوئن است و توزیع تابش سالانه استان از جنوب غربی به شمال و شمال شرقی روند کاهشی نشان می‌دهد. میانگین تابش سالانه در این استان،  $4244$  وات بر متر مربع در روز برآورد گردید. همچنین در تحقیقی که در تامائولپاس شمال شرقی مکزیک، علت تفاوت میزان انرژی خورشیدی دریافتی در  $165$  ایستگاه موجود در آن منطقه تفاوت در اقلیم آنها عنوان شد که نتایج پژوهش‌های (۱۲) و (۱۹) با پژوهش حاضر تطابق دارد. گام بعدی استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به جهت برآورد دقیق انرژی خورشیدی و همچنین مکان‌یابی سلول‌های فتوولتائیک جهت به دست آوردن بیشترین بازده در پهنه‌ی مناطق

استان کرمان بعلاوه این‌که در جنوبی‌ترین قسمت منطقه واقع شده، نسبت به استان‌های دیگر از تابش خورشیدی بیشتری بهره‌مند است زیرا در فصول تابستان و بهار در حدود ۵۰٪ استان از تابشی برابر با  $26 \text{ Mj/m}^2 \cdot \text{day}$  بهره‌مند می‌شود (شکل ۴- د و شکل ۵- د). استان کرمان با میانگین  $17/27 \text{ (Mj/m}^2 \cdot \text{day})$  و استان اصفهان با  $13/54 \text{ (Mj/m}^2 \cdot \text{day})$  به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین انرژی دریافتی فصل زمستان را بخود اختصاص داده‌اند. به طور کلی در منطقه مورد مطالعه به تبعیت از تاثیر عرض جغرافیایی در تغییرات مکانی  $R_s$  میانگین انرژی تابشی دریافتی در سطح زمین در همه فصول از شمال به جنوب افزایش یافته و در فصول گرم، مقادیر  $R_s$  بیشتر از فصول سرد است، بعلاوه منحنی‌های هم‌ارزش تابشی در فصل زمستان نسبت به فصول دیگر منطبق با عرض‌های جغرافیایی از نظم و توازی بیشتری برخوردارند. این تبعیت در قسمت‌های جنوبی منطقه تا حد زیادی چشمگیر اما با جابجایی به بخش‌های شمالی این نظم و توازن با مدارات بعلاوه تاثیر عوامل دیگر جغرافیایی و اقلیمی چون وضعیت توپوگرافی، ارتفاع از سطح دریا، تاثیر سامانه‌های همدیدی ورودی و برآیند تعامل و اثرات پیچیده و متقابل بین آنها و عوارض و پدیده‌های سطحی زمین، ثابت باقی نمی‌ماند. ضمناً در فصل گرم بر خلاف دیگر فصول مقادیر بالای  $R_s$  علاوه بر بخش‌های جنوبی منطقه در قسمت‌هایی از مرکز آن هم مشاهده می‌شود که علت آن غلبه سیستم‌های پرفشار جنب حاره‌ای بر این اراضی صاف و همگن

مرکزی ایران است. این‌گونه مطالعات در به دست آوردن برآورد دقیق‌تر از پتانسیل انرژی خورشیدی در مناطق مرکزی ایران کمک خواهد کرد.

## منابع

- 1- Ajayi O.O., Ohijeagbon O.D., Nwadialo C.E., and Olumide O. 2014. New model to estimate daily global solar radiation over Nigeria. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 5: 28–36.
- 2- Almorox J., Benito M., and Hontoria C. 2005. Estimation of monthly Angstrom–Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain. *Renewable Energy*. 30: 931–6.
- 3- Bahadori A., and Nwaoha C. 2013. A review on solar energy utilisation in Australia. *Renew Sustainable Energy. Rev*; 18: 1-5.
- 4- Bohling G. 2005. Introduction to GeoStatistics and Variogram Analysis, Assistant Scientist Kansas Geological Survey Ferro, V., Giordano, G. and Lovino, M. 1991. Isoerosivity and erosion risk map for Sicily. *Hydrology Science Journal*, 36(6): 549–564.
- 5- Gholamnia A., Mobin M., and Sodaeizade H. 2014. Provide a general model for estimating daily solar energy in Yazd. First National Conference on Environmental Health, safety and environmental sustainability, Hamadan. (In Persian with English abstract).
- 6- Haurant P., Muselli M., Pillot B., and Oberti P. 2012. Disaggregation of satellite derived irradiance maps: evaluation of the process and application to Corsica. *Sol Energy*; 86: 68-82.
- 7- Heydari M. 2004. Locating build solar power plants in Iran. *Oil and Energy*, 38-49. (In Persian with English abstract).
- 8- Hirsche K., Boerner S., Kalkomey C., and Gastaldi C. 1998. Avoiding pitfalls in geostatistical reservoir characterization: A survival guide: The leading Edge, 17: 493-504.
- 9- Hohn M.E. 1998. *Geostatistics and petroleum geology*, Kluwer Academic Publisher, Netherlands.
- 10- Johnston K., Ver Hoef J.M., Krivoruchko K., and Lucas N. 2001. *Using Geostatistical Analyst*, Environmental Systems Research Institute, Inc (ESRI).
- 11- Khalid A., and Junaidi H. 2013. Study of economic viability of photovoltaic electric power for Quetta-Pakistan. *Renewable Energy*. 50: 25-38.
- 12- Khosravi M., Jahanbakhsh Asl S., and Derakhshi J. 2012. Estimation and mapping of solar radiation received on a horizontal surface using climatic parameters in GIS: A Case Study of East Azerbaijan Province. *geographical space Journal*, 43: 43-63. (In Persian with English abstract).
- 13- Lahvanian H. 2007. Solar-Photovoltaic-in power supply of agricultural water wells. Eleventh Conference on Electricity Distribution Network. (in Persian with English abstract)
- 14- Li M.F., Li F., BinLiu H., Tao Guo P., and Wuc Wei. 2013. A general model for estimation of daily global solar radiation using air temperatures and site geographic. Parameters in Southwest China. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 92, 145–150.
- 15- Lu G.Y., and Wong D.W. 2008. An Adaptive Inverse-Distance Weighting spatial Interpolation Technique. *Comp. Geosci*. 34: 1044-1055.
- 16- Mogheri A., and Tavooosi T. 2013. Feasibility and zoning potential sites for the deployment of solar Panel relying based on Climate variables in Sistan-Baluchistan province. *Energy Planning and Policy Journal*, 1, Journal, 1: 99-114. (In Persian with English abstract).
- 17- Musavi Baigi M., and Ashraf B. 2012. Identify areas with the least amount of cloud to throw the mapping areas with high solar radiation. *Journal of Soil and Water (Agricultural Science and Technology)*, 25: 665-675. (in Persian with English abstract)
- 18- Myers KS., Klein SA., and Reindl DT. 2010. Assessment of high penetration of solar photovoltaics in Wisconsin. *Energy Policy*; 38: 73, 38-45.
- 19- Rivas D., Saleme-Vila S., Ortega-Izaguirre R., Chalé-Lara F., and Caballero-Briones F. 2013. A climatological estimate of incident solar energy in Tamaulipas, northeastern Mexico. *Renewable Energy*. 60, 293-301.
- 20- Sabziparvar A., and Aliaiee A. 2012. Performance evaluation of artificial neural network in prediction of total daily solar radiation and comparison with model results  $\hat{A}$  (Case study: Tabriz synoptic). *Journal of Geophysical*, 5: 42-30. (In Persian with English abstract).
- 21- Toklu E. 2013. Overview of potential and utilization of renewable energy sources in Turkey. *Renew Energy*. 50: 456-463.
- 22- Webster R., and Oliver M.A. 2000. *Geostatistics for environmental scientists*, Wiley press. 271 pp.

## Modeling and Zoning Solar Energy Received at the Earth's Surface in Arid and Semiarid Regions of Central Iran

A. Gholamnia<sup>1\*</sup>- M.H. Mobin<sup>2</sup>- A. Jebali<sup>3</sup>- H. Alipoor<sup>4</sup>

Received: 15-04-2015

Accepted: 28-12-2015

**Introduction:** Solar radiation ( $R_s$ ) energy received at the Earth's surface is measured using climatological variables in horizontal surface and is widely used in various fields. Domination of hot and dry climates especially in the central regions of Iran results from decreasing cloudiness and precipitation and increasing sunshine hours, which shows the high potential of solar energy in Iran. There is a reasonable climatic field and solar radiation in most of regions and seasons which have provided an essential and suitable field to use and extend new and pure energy.

**Materials and Methods:** One of the common methods to estimate the solar energy received by the earth is using temperature variables in any place. An empirical model is proposed to estimate the solar energy as a function of other climatic variables (maximum temperature) recorded in 50 climatological, conventional stations; this model is helpful in extending the climatological solar-energy estimation in the study area. The mean values of both measured and estimated solar energy were objectively mapped to fill the observation gaps and reduce the noise associated with inhomogeneous statistics and estimation errors. This analysis and the solar irradiation estimation method were applied to 50 different climatological stations in Iran for monthly data during 1980–2005. The main aim of this study was to map and estimate the solar energy received in four provinces of Yazd, Esfahan, Kerman and Khorasan-e-Jonoubi. The data used in this analysis and its processing, as well as the formulation of an empirical model to estimate the climatological incident of solar energy as a function of other climatic variables, which is complemented with an objective mapping to obtain continuous solar-energy maps. Therefore, firstly the  $R_s$  was estimated using a valid model for 50 meteorological stations in which the amounts of solar radiation weren't recorded for arid and semi-arid areas in Iran. Then, the appropriate method was selected to interpolate by GS+ software and after that, the seasonal maps of the received solar energy over the ground surface were produced by GIS software. The best fit of the Gaussian model was determined in winter with the lowest residual error and the highest correlation 1.87 and 0.913 respectively, in spring with the lowest RSS and highest  $R^2$  3.87 and 0.86 respectively and during summer with RSS and  $R^2$ , 5.9 and 0.851 and the exponential model in autumn with the RSS and  $R^2$ , 3.61 and 0.88..

**Results and Discussion:** Naturally, some of the differences in the mean solar energy among the stations may be related to inter annual variability rather than to differences in the climatic, radiative regimes. If different periods for the climatological estimations are used, the resulting mean values can be representative of the regional climatic regime of solar energy. The results showed that 53% of Yazd province Received 26 Mj / m<sup>2</sup>.day, in summer. In winter, more than 80% of Yazd province received 15 Mj / m<sup>2</sup>.day radiation. Kerman compared to other provinces received high solar radiation, especially this feature was more pronounced in winter because in this season compared to Yazd, Kerman radiation did not only showed greater range, but also about 40% of the province's total area received 16 Mj / m<sup>2</sup>.day radiation, whereas Yazd no radiation was received during this season. Because Kerman is located in the southeast of region and it received more solar radiation than other provinces. In this study, the amount of solar energy in surface of 4 provinces including Yazd, Esfahan, Kerman and South Khorasan in arid and semiarid regions of Iran was estimated by the geostatistic. Seasonal mean values of solar energy absorbed at the surface of 4 stations was calculated. The results showed that Kerman with receiving 27.25 (Mj m<sup>-2</sup>. D-1) averagely has the most received solar energy and Esfahan with 21.54 (Mj m<sup>-2</sup>. D-1) during the summer has received the least solar energy. The limited records of solar energy used in this analysis made the analysis of long-term variations impossible. This paper was the first stage of a more extensive study which involved monitoring the behavior of photocells under real environmental conditions, which allowed to obtain efficiency curves used in the mapping of actual photovoltaic potential in arid and

1, 2, 3 and 4- Ph.D. Student, Assistant Professor and Ph.D. Students of Combat to Desertification, Department of Management the Arid and Desert regions, Yazd University, Iran, Respectively  
(\*- Corresponding Author Email: az.gh1990@gmail.com)

semiarid regions of Central Iran. This analysis must be complemented by better, higher resolution estimates of the incident solar energy; a viable alternative for such a task is the use of satellite observations. However, a better photovoltaic prospection, with high quality data, is necessary.

**Keywords:** Modeling, Geostatistics, Photovoltaic cell, Solar radiation, The central regions of Iran