Archive of SID

J. of Nuclear Sci. and Tech.
No. 33, pp. 27-34, 2005

مجله علوم و فنون هسته‌ای
شماره ۳۳، صفحات ۳۴-۲۷، ۱۳۸٤

برآورد پتانسیل تابش خورشیدی در ایران و تهیه اطلس تابشی آن

بتول صفائی *، مرتضی خلجی‌اسدی، حبیب‌تقی‌زاده، افسانه جیلاوی، گیتی طالقانی، ماندانا دانش
مرکز توسعه انرژیهای نو، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱٤۱۵۵، تهران - ایران

چکیده: یکی از ارکان اساسی توسعهٔ تحقیقات کاربردی انرژی خورشیدی در هر منطقه، مطالعهٔ پتانسیل انرژی تابشی خورشیدی و برآورد آن در منطقه است. در این کار تحقیقی از میان ۲۱ ایستگاه تشعشع‌سنجی کشور، ۹ ایستگاه همدید (سینوپتیک) که داده‌های تشعشع‌سنجی آنها در دوره‌های آماری پنج تا یازده ساله بدست آمده است، قابل استفاده بودند، بطوری که بعد از پالایش این داده‌ها که دارای خلاءهای آماری حتی بعضی دارای اطلاعات ناصحیح بوده‌اند، از آنها برای انتخاب مدل مناسب استفاده شده است. پس از مطالعه و بررسی مدلهای موجود، برای تخمین میانگین ماهیانهٔ تابش کلّی روزانه در سطح افقی، سه مدل ریاضی: آنگستروم - پریسکات، روش حداکثر احتمال و مدل هیبرید بکار برده شدند. با استفاده از روابط آماری هر یک از مدلها، برنامه کامپیوتری مناسب و بکارگیری داده‌های تشعشع‌سنجی پردازش شدهٔ ۹ ایستگاه پیش گفته، حل معادلات همبستگی آنها، ضریب‌های معادلهٔ مربوط به هریک از سه مدل برای ایران بدست آمد. این مدلهای ریاضی برای آزمون‌های آماری در ایران بررسی شدند و از میان آنها، مدل هیبرید که بهترین برازش را با این داده‌ها داشت، انتخاب گردید. حاصل این کار تحقیقی عبارت است از: ۱۲ نقشه مربوط به میانگین روزانه تابش کلی خورشیدی در هر ماه، ٤ نقشه مربوط به مجموع انرژی تابشی کلی رسیده به واحد سطح افقی در هر فصل، ۱ نقشه مربوط به مجموع انرژی تابشی دریافتی در سطح افقی در طول مدّت سال.

واژه‌های کلیدی: *انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی، پتانسیل انرژی تابشی، مدل‌های ریاضی، اطلس تابشی، ایران*

Estimating Solar Energy Potential in Iran and Related Radiation Atlas

B. Safaii*, M. Khalaji Asadi, H. Taghizadeh, A. Jilavi, G. Taleghani, M. Danesh
Renewable Energy Research Center, AEOI, P.O. Box: 14155 -1339, Tehran - Iran

Abstract: Estimation of the solar radiation potential in an area is one of the most basic foundations in the development of research for applying solar energy in any region. In this study, the necessary information was taken from 9 out of 21 solar radiation stations in the country within a period of 5 to 11 years. After refining the information for some incorrect lays, then it was used for intended model or mode. In order to estimate the daily average of monthly radiation on the horizon level, the existing models were closely studies and among them, 3 mathematical models, namely "angstrom pries cut", "the most probable model" , and "Hybrid model" were used. The related coefficients of each model for Iran were calculated through statistical relationship by using processed data from the above mentioned stations. These mathematical models were statistically tested for Iran and from these three, the hybrids model was chosen as the best alternative. The final result of this research is 12 drawings concerning the daily solar radiation in each month, 4 drawings related to the total radiation received by the horizontal area for each season, and one drawing in relation to the total radiation received by the horizontal area during a year.

Keywords: *renewable energy, solar energy, radiation energy potential, mathematical models, radiation atlas, iran*

*email: bsafaie@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۳/۸/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸٤/۳/۸

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

اطلاعات درست دربارهٔ تابش خورشیدی، نخستین و مهمترین نیاز در طراحی‌های کاربردی انرژی خورشیدی است. بنابراین، برای تعیین میانگین واقعی انرژی دریافتی از خورشید بر هر سطح باید از سنجش دقیق تابش خورشیدی در بازه زمانی طولانی مدّت استفاده کرد. متأسّفانه ایستگاههای سنجش تابش خورشیدی در بسیاری از مناطق وجود ندارند و در برخی از تابش‌سنجی‌های موجود هم خطای اندازه‌گیری وجود دارد و از دقّت کافی برخوردار نیستند. بنابراین، برآورد میزان انرژی خورشیدی دریافتی در هر منطقه با استفاده از داده‌های همدیدی (سینوپتیکی)[۱] و بکار بردن مدلی که بهترین نتیجه را در بر داشته باشد، امری بسیار ضروری است. مطالعهٔ وسیع و قابل توجّه دربارهٔ تعیین انرژی خورشیدی، از دههٔ ۱۹۷۰ که کاربرد انرژی خورشیدی بصورت جدّی‌تر مطرح شد، در اقصی نقاط جهان صورت گرفت و مدل‌های مناسبی با توجّه به شرایط جغرافیایی و اقلیمی مناطق مختلف ارائه گردید.

تفاوت عرض جغرافیایی زیاد در کشور ما عامل مهمی است که تغییرات میزان دریافت انرژی تابشی خورشیدی را بین شمال و جنوب کشور موجب می‌شود. بنابراین، مدلسازی مناسب به منظور برآورد میانگین ماهانه انرژی خورشیدی که روزانه در سطح افقی دریافت می‌شود، برای مناطق مختلف کشور و در نتیجه استفاده صحیح و کارآ از آن نقش مهمی در تأمین انرژی مورد نیاز کشور و کاستن مصرف انرژیهای فسیلی و آلودگیهای زیست محیطی ایفا خواهد نمود.

این پژوهش، بر اساس داده‌های تشعشع‌سنجی ۹ ایستگاه سینوپتیک کشور در دوره‌های آماری پنج الی یازده ساله صورت گرفته است و پس از پالایش این داده‌ها که گاه توأم با اطلاعات نادرست بوده‌اند، از آنها برای انتخاب مدل مناسب استفاده شده است.

پس از مطالعه و بررسی مدلهای موجود، سه مدل ریاضی: آنگستروم ـ پریسکات، روش حداکثر احتمال و مدل هیبرید برای تخمین میانگین ماهانهٔ تابش کلی روزانه در سطح افقی بکار گرفته شده‌اند. با استفاده از روابط آماری هریک از مدلها و برنامه کامپیوتری مناسب و بکارگیری داده‌های تشعشع‌سنجی پردازش شدهٔ ۹ ایستگاه کشور و حل معادلات همبستگی مربوطه، ضرایب معادلهٔ مربوط به هر یک از این سه مدل برای ایران بدست آمد. این مدلهای ریاضی از نظر آزمون‌های آماری برای ایران بررسی شدند و از میان آنها، مدل هیبرید که بهترین برازش را دارا بود انتخاب گردید.

با استفاده از مدل هیبرید، ۱۲ نقشه مربوط به میانگین ماهیانه تابش کلی خورشیدی روزانه برای ماههای مختلف سال و ٤ نقشه مربوط به مجموع انرژی تابشی کلّی رسیده به واحد سطح افقی در روی زمین برای فصول مختلف و یک نقشه مربوط به مجموع انرژی تابشی دریافتی سالیانه در سطح افقی برای کل کشور ترسیم شده است.

مطالعات تابش خورشیدی در نواحی محدود قبلاً توسّط دانشیار [۱]، یعقوبی و جعفرپور [۲] گزارش شده است. البته مطالعات تابش خورشیدی در تمام ایران قبلاً توسّط جلال صمیمی [۳] انجام گرفته است، امّا در تحقیق ایشان ضرایب مدل انتخابی، بر مبنای اصول کلّی انتخاب شده‌اند نه بر مبنای بهترین برازش به داده‌های موجود. امّا در این تحقیق علاوه بر اینکه مطالعات تابش خورشیدی برای تمام ایران انجام گرفته‌اند، ضرایب مدل‌های برگزیده بر مبنای بهترین برازش به داده‌های موجود انتخاب شده‌اند.

۲- برآورد میزان تابش کلی خورشیدی بر سطح زمین

نخستین رابطه پیشنهادی برای تخمین تابش کلّی خورشیدی[۲] رابطهٔ مشهور آنگستروم است. آنگستروم در سال ۱۹۲٤ رابطه خطّی بین تابش کلّی خورشیدی و ساعتهای آفتابی را بدست آورد [٤]. بعدها رابطهٔ آنگستروم توسّط محققان سایر کشورهای جهان اصلاح شد.

مدل آنگستروم، یا مدل آنگستروم ـ پریسکات، راحت‌ترین و مناسب‌ترین روشی است که می‌توان با آن به آسانی میزان انرژی تابشی بر یک سطح افقی در روی زمین را حساب کرد. رابطه‌های آنگستروم و پریسکات به صورت زیر است:

$$\frac{H}{H_0} = a + b\frac{n}{N} \qquad (۱)$$

$$\frac{T.S.R}{R_a} = a + b\frac{n}{N} \qquad (۲)$$

www.SID.ir

Archive of SID

در این روابط $H=T.S.R$ میزان انرژی تابشی روزانه به واحد سطح افقی و H_o میزان انرژی تابشی روزانه به واحد سطح در سطح افقی بالای جو که $H_o=R_a$ است. a و b ضرایب بدون دیمانسیون، n ساعات آفتابی روزانه و N تعداد ساعات آفتابی ممکن روزانه یا طول روز است. ضرایب a و b توسّط محققان کشورهای مختلف بدست آمده است. آنان به این نتیجه رسیده‌اند که این ضرایب مقادیر ثابتی نیستند، بلکه به بسیاری از پارامترها، از جمله عرض جغرافیائی، فصول سال و غیره بستگی دارند. عدّه‌ای نیز عقیده دارند که این ضرایب به شرایط جغرافیائی و اقلیمی هر منطقه بستگی دارد. بستگی ضرایب آنگستروم به پارامترهای مختلف را اکینوگلو مرور کرده است [۵].

سازمان جهانی خواربار، FAO، برای محاسبهٔ پتانسیل تبخیر و تعرّق نیاز به داشتن مقدار انرژی دریافتی از خورشید دارد؛ از این رو پروفسور مونتیس پیشنهاد کرده است که در مناطق خشک، هنگامی که دستیابی به داده‌های تشعشع‌سنجی امکان‌پذیر نباشد مقادیر a=۰/۲۵ و b=۰/۵۰ در نظر گرفته شوند [٦]. نویرث ضرایب آنگستروم را برای اتریش، با رابطهٔ درجه دوم، به ارتفاع از سطح دریا مرتبط کرده است [۷].

گوپیناتان مقادیر a و b را بصورت تابعی از عرض جغرافیائی محل، ارتفاع محل از سطح دریا و نسبت ساعات آفتابی روزانه به طول روز ارائه داده است [۸]. در صورتیکه اجویت و اکینوگلو رابطه بین تابش خورشیدی با ساعات آفتابی را بصورت معادلهٔ درجه دومی از نسبت ساعات آفتابی روزانه به طول روز ارائه داده‌اند [۵]. جدیدترین و بهترین مدلی که تاکنون جهت برآورد میانگین ماهیانه انرژی تابشی کلّ روزانه خورشیدی بر سطح افقی ارائه شده مدل هیبرید است که توسّط یانگ، هوانگ و تامائی در سال ۱۹۹۹ ارائه گردید [۹].

اساس کار دانشمندان ژاپنی بر مبنای روش آنگستروم- پریسکات استوار است با این تفاوت که به جای استفاده از داده‌های هواشناختی از روش بینابی و اندازه‌گیری‌های ساعتی انرژی دریافتی مدل خود را عرضه کرده‌اند.

۳- روش برآورد میانگین ماهیانه تابش کلی روزانه در سطح افق در ایران

در این کار تحقیقاتی، پس از مطالعه و بررسی مدلهای موجود، ما از سه مدل ریاضی انگستروم - پریسکات، مدل حداکثر احتمال و مدل هیبرید برای تخمین میانگین ماهیانه تابش کلّ روزانه در سطح افقی استفاده کرده‌ایم. با استفاده از روابط آماری هر یک از مدلها و برنامه کامپیوتری مناسب و بکارگیری داده‌های تشعشع‌سنجی پردازش شدهٔ ۹ ایستگاه (در دوره‌های آماری پنج الی یازده ساله) در ایران و حلّ معادلات همبستگی مربوط، ضرایب معادله مربوط به هر یک از سه مدل پیش‌گفته برای ایران بدست آمد. مشخّصات جغرافیائی ایستگاههای مورد مطالعه در ایران در جدول شماره ۱ مندرج است.

کار پالایش داده‌های تشعشع‌سنجی این ایستگاهها بر اساس دستورالعمل WMO 100 سازمان جهانی هواشناسی و یک تجربه کارشناسی در سه مرحله بشرح ذیل انجام گرفت:

- در صورتیکه اطلاعات از میزان تشعشع خالص رسیده به بالای جوّ برای آن روز به خصوص بزرگتر بودند حذف شدند.
- داده‌های تشعشع‌سنجی با کُد هوای حاضر بر اساس مه، بارندگی، میزان پوشش ابری، نوع ابر، میزان گرد و خاک و میزان رطوبت موجود در هوا بررسی شدند.
- بعد از پالایش اولیه از روش منحنی‌های جرم مضاعف[۳] استفاده شده و اطلاعات دوباره تصحیح شدند.

جدول ۱ ـ پارامترهای ژئومتریک در ۹ ایستگاه سینوپتیک هواشناسی.

ردیف	ایستگاه هواشناسی	طول جغرافیایی (E)	عرض جغرافیایی (N)	ارتفاع (m)
۱	اصفهان	۵۱/۸۷	۳۲/٦۷	۱٦۰۰/۷
۲	اقلیسیه	۵۱/٦۲	۳۵/۷۸	۱۵٤۸/۲
۳	بندرعباس	۵٦/۳۷	۲۷/۲۲	۱۰/۰
٤	رامسر	۵۰/٦۷	۳٦/۹۰	-۲۰/۰
۵	تبریز	٤٦/۲۸	۳۸/۰۸	۱۳٦۱/۰
٦	مشهد	۵۹/٦۳	۳٦/۲۷	۹۹۰/۰
۷	تهران	۵۱/۳۲	۳۵/٦۸	۱۱۹۰/۸
۸	کرمانشاه	٤۷/۱۲	۳٤/۳۲	۱۳۲۲/۰
۹	یزد	۵٤/٤۰	۳۱/۹۰	۱۲۳۰/۲

www.SID.ir

Archive of SID

۳-۱ مدل آنگستروم - پریسکات

با استفاده از مدل آنگستروم - پریسکات و بکارگیری داده‌های تشعشع‌سنجی پردازش شدهٔ این ۹ ایستگاه و حل معادلات همبستگی مربوطه، ضرایب معادله (۲) برای ایران بدست آمد. (ضریب همبستگی معادله مربوطه ۰/۹ بود).

$$\frac{T.S.R}{R_a} = 0.2515 + 0.446\frac{n}{N} \qquad (r = ۰/۹) \qquad (۳)$$

$T.S.R$= میانگین ماهیانه تابش کلی روزانه در سطح افقی بر حسب $Jouls/m^2$

R_a = میانگین ماهیانه تابش کلی روزانه در سطح افقی در خارج جو بر حسب $Jouls/m^2$

n = میانگین ماهیانه ساعات آفتابی روزانه

N = میانگین ماهیانه طول روز

اگر از ۹ ایستگاه یاد شده، داده‌های رامسر و کرمانشاه حذف شوند، ضرایب بدست آمده برابر a=۰/۲۵ و b=۰/۵۰ شده و به پیشنهاد پرفسور مونتیس نزدیک می‌شوند.

۳-۲ مدل حداکثر احتمال

در مدل حداکثر احتمال[۴] هدف بدست آوردن معادلهٔ درجه دومی نسبت به $\frac{n}{N}$ است که با آن بتوان به آسانی میزان انرژی کلّی تابش خورشیدی را حساب کرد. بر مبنای داده‌های تشعشع‌سنجی ۹ ایستگاه سینوپتیک یاد شده، رابطه‌ای با ضریب همبستگی ۰/۹۱ بدست آمد. این رابطه بصورت زیر است:

$$\frac{T.S.R}{R_a} = 0.1088 + 0.9749\left(\frac{n}{N}\right) - 0.4421\left(\frac{n}{N}\right)^2 \qquad (٤)$$

$T.S.R$= میانگین ماهیانه تابش کلی روزانه در سطح افقی بر حسب $Jouls/m^2$

R_a = میانگین ماهیانه تابش کلی روزانه در سطح افقی در خارج از جو بر حسب $Jouls/m^2$

n = میانگین ماهیانه ساعات آفتابی روزانه

N = میانگین ماهیانه طول روز می‌باشد.

۳-۳ مدل هیبرید

هنگامیکه نور خورشید از اتمسفر می‌گذرد پنج نوع فرایند اُفت[۵] در تابش خورشید رخ می‌نماید که عبارتند از: پراکندگی رایله، کم فروغی یا تضعیف[۶] بر اثر جذب در ذرات معلق در هوا (هواویز یا آئروسل‌ها)، جذب انرژی تابشی توسط لایه اُزن، بخارآب و گازهای دائمی جو که این عوامل به وسیلهٔ توابع تراگسیله $\tau_a(\lambda), \tau_r(\lambda), \tau_g(\lambda), \tau_w(\lambda), \tau_{oz}(\lambda)$ نشان داده می‌شوند (λ طول موج نور است). برای بررسی اثر همه تراگسیله‌ها باید ابتدا تراگسیله شعاعی τ_b و تراگسیله پخشی τ_d را تعریف کنیم.

$$\overline{\tau_b} \equiv I_o^{-1} \int_{\lambda min}^{\lambda max} I_{oi}(\lambda)\tau_{oz}(\lambda)\tau_w(\lambda)\tau_g(\lambda)\tau_r(\lambda)\tau_a(\lambda)\,d\lambda \qquad (۵)$$

و اندازه تراگسیله پخشی متناسب است با

$$\overline{\tau_d} \equiv I_o^{-1} \int_{\lambda min}^{\lambda max} I_{oi}(\lambda)\tau_{oz}(\lambda)\tau_w(\lambda)\tau_g(\lambda)\times[1-\tau_r(\lambda)\tau_a(\lambda)]\,d\lambda \qquad (۶)$$

که مقدار I_o از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$I_O = \int_{\lambda min}^{\lambda max} I_{Oi}(\lambda)\,d\lambda \qquad (۷)$$

I_{oi} شدت تابش در هر طول موج نور بر حسب $\frac{W}{m^2 \mu m}$ است.

اکنون با توجّه به روابط فوق، به آسانی تابش مؤثّر شعاعی H_b و تابش پخشی H_d بدست می‌آید:

$$H_b \equiv \int \overline{\tau_b} Sin\theta\, dt \qquad (۸)$$

$$H_d \equiv \int \overline{\tau_d} Sin\theta\, dt \qquad (۹)$$

در این روابط، θ زاویه فراز یا زاویه ارتفاعی خورشید است. H_b و H_d بر حسب $Jouls/m^2$ در طول روز بدست می‌آیند که با توجّه به رابطه آنگستروم - پریسکات، تابش کلّی (گلوبال) به این صورت حساب می‌شود:

www.SID.ir

Archive of SID

$$H = (a + b\ n/N)H_b + (c + d\ n/N)H_d \qquad (۱۰)$$

که در آن ضرایب a، b، c، d مقادیر ثابتی بوده و H_b و H_d توسّط مدل بینابی قابل محاسبه است.

برای محاسبه H_b و H_d از مدل بینابی لکنر (Leckner) که در ۱۹۷۸ عرضه شده است می‌توان استفاده کرده و پنج تابع تراگسیله زیر را بدست آورد.

$$\bar{\tau}_{oz} = exp\left(-lm\overline{k_{oz}}\right) \qquad (۱۱)$$

$$\bar{\tau}_w = exp\left(-\bar{c}_w\right) \qquad (۱۲)$$

$$\bar{\tau}_g = exp\left(-\bar{c}_g\right) \qquad (۱۳)$$

$$\bar{\tau}_r = \exp\left(-0.008735\ \ m\,\bar{\lambda}_r^{-4.08}\ p/p_o\right) \qquad (۱٤)$$

$$\bar{\tau}_a = \exp\left(-\beta_t m\,\bar{\lambda}_a^{-1.3}\right) \qquad (۱۵)$$

مقادیر $\bar{\lambda}_a, \bar{\lambda}_r, \bar{C}_g, \bar{C}_w, \bar{k}_{oz}$ برابر است با:

$$\bar{k}_{oz} = 0.0365\ \ (ml)^{-0.2864} \qquad (۱٦)$$

$$\bar{C}_w = -Ln\left[0.909 - 0.036\,Ln(mw)\right] \qquad (۱۷)$$

$$\bar{C}_g = 0.0117\ m^{0.3139} \qquad (۱۸)$$

$$\bar{\lambda}_r = 0.547 + 0.014\,(mp/p_o) - 0.00038\,(mp/p_o)^2 \qquad (۱۹)$$

$$\bar{\lambda}_a = 0.6777 + 0.01464(m\beta_t) - 0.00626(m\beta_t)^2 \qquad (۲۰)$$

در این روابط m مسیر دیدگانی نور خورشید یا توده هوا می‌باشد که اندازه آن برابر است با:

$$(m = 1 - 0.0001\,z_s)/\left[Sin\theta + 0.15(57.296\,0 + 3.885)^{-1.253}\right] \qquad (۲۱)$$

همانطوریکه دیده می‌شود مسیر دیدگانی نور خورشید به زاویه ارتفاعی یا فراز و ارتفاع ایستگاه (Z_s به متر) بستگی دارد. β_t ضریب تیرگی آنگستروم نام دارد و مقدار آن از روابط زیر بدست می‌آید:

$$\beta_t = \bar{\beta}_t + \Delta\beta_t \qquad (۲۲)$$

$$\bar{\beta}_t = (0.025 + 0.1\,Cos\varphi)\exp(-0.7z_s/1000) \qquad (۲۳)$$

$$\Delta\beta_t = \pm(0.02 \approx 0.06)$$

φ عرض جغرافیایی و l ضخامت لایه اُزن نسبت به سطح دریای آزاد می‌باشد و مقدار آن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$l = 0.44 - 0.16\left\{[(\varphi - 80.60)]^2 + [(d - 120)/(263 - \varphi)]^2\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (۲٤)$$

d تعداد روزها از ابتدای سال میلادی بوده در صورتیکه تعداد روزها کمتر از ۳۰۰ روز باشد بجایش همان عدد را می‌گذاریم در صورتیکه تعداد روزها از ابتدای سال بیشتر از ۳۰۰ باشد از آن عدد ۳٦٦ واحد کم می‌کنیم و بجای d قرار می‌دهیم.

در روابط فوق w آب قابل بارش می‌باشد و آن عبارت است ازمقدار آب موجود در استوانه‌ای به سطح مقطع یک سانتیمتر مربع که ارتفاع آن از سطح زمین تا بالای اتمسفر در نظر گرفته می‌شود.

$$w = 0.493(Td + 273.15)^{-1}\exp\left[26.23 - 5416(Td + 273.15)^{-1}\right] \qquad (۲۵)$$

در این رابطه Td نقطه شبنم یا نقطه اشباع برحسب درجه سانتی‌گراد و w بر حسب g/cm^2 است. در روابط بالا p فشار هوا در سطح ایستگاه به هکتوپاسکال و p_o فشار استاندارد هوا برابر ۱۰۱۳/۲۵ هکتوپاسکال می‌باشد. لازم به یاد آوری است که ضخامت لایه ازن و آب قابل بارش نسبت به عرض جغرافیایی، ارتفاع و فصل دائماً تغییر می‌کند و در توابع تراگسیله‌ها اثرات آنها را روی تابش خورشید مورد بررسی قرار داده‌ایم.

www.SID.ir

Archive of SID

پس از انجام محاسبات روابط (۱۱) تا (۱۵) و قراردادن آن در معادلات زیر مقادیر $\bar{\tau}_b$ ، $\bar{\tau}_d$ بدست می‌آیند:

$$\bar{\tau}_b = \bar{\tau}_{oz}\,\bar{\tau}_w\,\bar{\tau}_g\,\bar{\tau}_r\,\bar{\tau}_a - 0.013 \qquad (۲۶)$$

$$\bar{\tau}_d = \bar{\tau}_{oz}\,\bar{\tau}_g\,\bar{\tau}_w\left(1 - \bar{\tau}_a\,\bar{\tau}_r\right) + 0.013 \qquad (۲۷)$$

جمله‌های دوم سمت راست در روابط ۲۶ و ۲۷، میانگین انحراف اولین جمله سمت راست از معادلات ۵ و ۶ می‌باشد.

سپس بر اساس مقادیر $\bar{\tau}_b$ ، $\bar{\tau}_d$ تابش موثر شعاعی H_b و پخشی H_d را بر اساس روابط ۸ و ۹ حساب کرده‌ایم. حال با توجّه به مقادیر اندازه‌گیری شده تابش کلّی H و ساعات آفتابی برای ۹ ایستگاه یاد شده بهترین برازش به روش حداقل مربعات را انجام داده و ضرایب d,c,b,a در معادله ۱۰ را محاسبه کرده‌ایم. (ضریب همبستگی رابطه برازش شده ۰/۹۹ بود).

a= ۰/۰۲۹٤ ، b=۱/۰۵٦۳۲ ، c=۰/٤٦٦٦

d= ۰/۰٦۳۳٦ ، c=۰/۸۹۸٤۸

و مدل هیبرید برای ایران بصورت زیر درآمده است:

$$H = (0.0294 + 1.05632\frac{n}{N})H_b + (0.4666 + 0.06336\frac{n}{N})H_d + 0.89848$$

٤- بحث و نتیجه‌گیری

برای بررسی نتایج مدلهای ریاضی بوسیلهٔ نتایج تجربی و انتخاب مدل ریاضی مطلوب‌تر، تست‌های آماری مورد استفاده قرار می‌گیرند. ما در این بررسی و تحقیق از پنج نوع تست استفاده کرده‌ایم که به ترتیب عبارتند از:

- *بیراهی میانگین انحراف (MBE)*[۷]

این تست عبارتست از میانگین انحراف مقادیر حساب شده از مقادیر اندازه‌گیری شده که رابطه آن بصورت زیر است:

$$MBE = \sum_{i=1}^{n} (S_i - C_i)/n$$

- *بیراهی میانگین قدر مطلق انحراف (MAB)*[۸] که فرمول آن چنین است:

$$MAB = \sum_{i=1}^{n} |(S_i - C_i)| / n$$

- *بیراهی جذر میانگین مربعات انحراف (RMSE)*[۹]

$$RMSE = \left\{\sum_{i=1}^{n} (S_i - C_i)^2 / n\right\}^{1/2}$$

- *بیراهی جذر میانگین نسبی مربعات انحراف (RRMSE)*[۱۰]

$$RRMSE = \left\{\sum_{i=1}^{n} (S_i - C_i)^2 / nS_i\right\}^{1/2}$$

- *درصد میانگین قدر مطلق انحرافها (MADEV)*[۱۱]

$$MADEV = 100 * \left\{\sum_{i=1}^{n} |(S_i - C_i)| / S_i\right\} / n$$

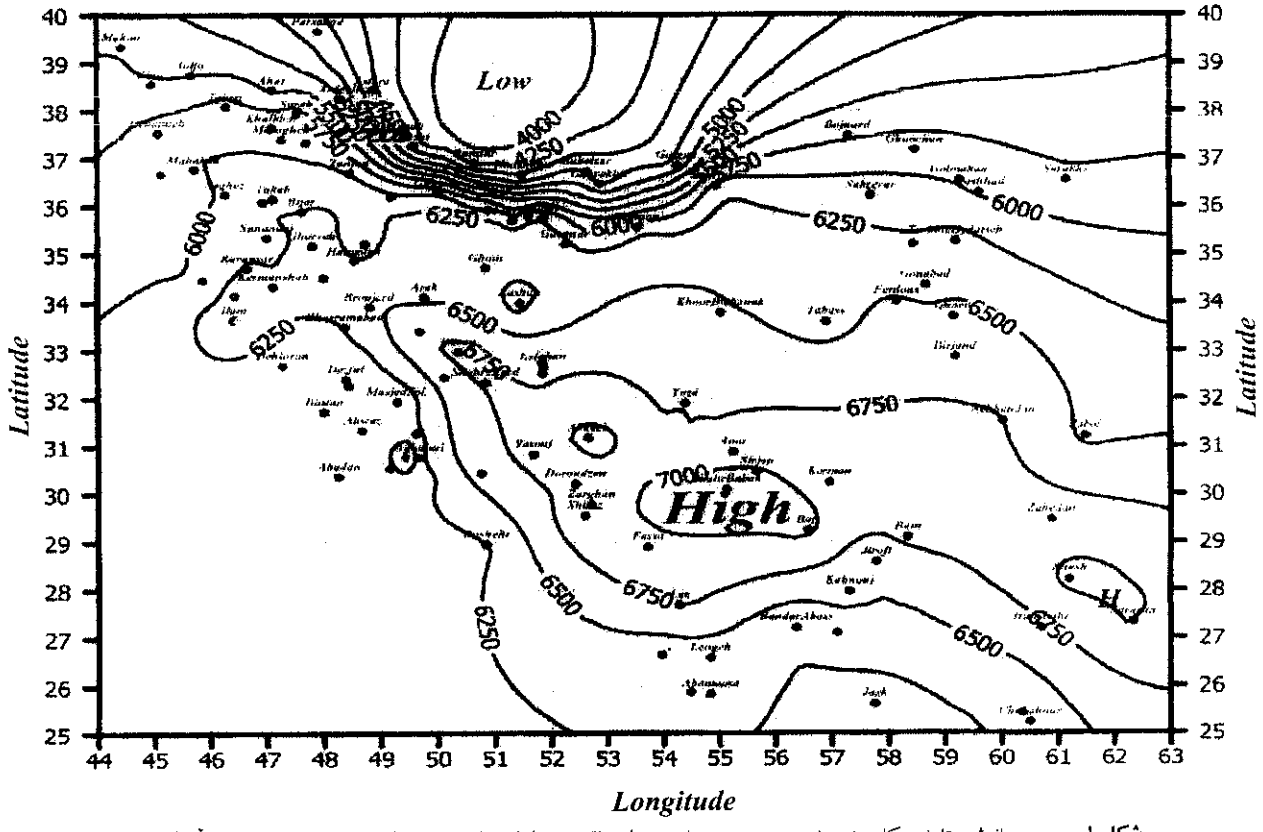
در این روابط S_i مقادیر اندازه‌گیری شده، C_i مقادیر حساب شده و n تعداد اندازه‌گیری‌ها است. در این تحقیق، پنج تست آماری فوق را برای مدل‌های بکار برده شدهٔ هیبرید (HM)، آنگستروم - پریسکات (A-PM) و مدل حداکثر احتمال (MLQM) حساب کردیم. نتایج محاسبه نشان داد که مدل هیبرید از دو مدل دیگر مناسب‌تر است. نتایج این بررسی در جدول ۲ مندرج است. در این بررسی مقدار انرژی دریافتی از خورشید در نقاط مختلف ایران با استفاده از مدل هیبرید حساب شده که حاصل آن عبارتست از رسم دوازده نقشه مربوط به میانگین ماهیانه تابش کلّی روزانه خورشیدی بر واحد سطح افقی در هر ماه، چهار نقشه مربوط به مجموع انرژی کلّ تابشی رسیده به واحد سطح افقی در فصل‌های مختلف سال و یک نقشه مربوط به مجموع انرژی تابشی کلّی رسیده به واحد سطح افقی در مدّت یک سال بر حسب مگاژول برمتر مربع برای نقاط مختلف ایران. شکل ۱ مجموع انرژی کلّ تابشی رسیده به واحد سطح افقی را به مدّت یک سال برای نقاط مختلف ایران نشان می‌دهد. این نقشه نمایانگر خطوط تراز انرژی در مدّت یک سال در تمام ایران است؛ و اعداد روی خطوط تراز، مقدار کلّ انرژی خورشیدی رسیده به واحد سطح افقی در مدّت یک سال بر حسب $MJouls/m^2$ برای نقاط مختلف ایران است. به طوری که ملاحظه می‌شود روی فلات مرکزی یک سلول پر انرژی با انرژی بیش از ۷۰۰۰ مگاژول بر متر مربع مستقر است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۲- روشهای مختلف خطاهای حساب شده برای میانگین ماهیانه تابش کل روزانه خورشیدی پیش‌بینی شده به وسیلهٔ مدلهای هیبرید (HM)، آنگستروم- پریسکات (A-PM) و حداکثر احتمال (MLQM).

ایستگاه سینوپتیک / نوع خطا	اصفهان	اقدسیه	بندرعباس	رامسر	تبریز	مشهد	تهران	کرمانشاه	یزد	مدل
MBE(MJ/m^2)	۱/۰۵	۰/۳۵	۰/٦۸	-۰/۳۵	-۰/٤۸	-۰/۵۷	۰/۵۷	-۰/۵۷	-۰/۲۷	HM
MBE(MJ/m^2)	۱/٤۸	۰/۸۳	-۰/٤٦	-۱/۰۹	-۰/۱۹	-۰/۵۷	۰/۸۲	-۰/۲۰	۰/۲۳	A-PM
MBE(MJ/m^2)	۱/٤۹	۰/۷۹	-۰/٦٤	-۰/٦۱	-۰/۲۲	-۰/۵۵	۰/۷٦	-۰/۲۱	۰/۳۲	MLQM
MAB(MJ/m^2)	۱/۰۵	۰/۵۲	۰/۷٤	۰/۵٦	۰/٦۹	۰/۷۷	۰/۹۷	۰/۷۰	۰/۸۰	HM
MAB (MJ/m^2)	۱/٤۸	۰/۸۲	۰/٦۰	۱/۰۹	۰/۷۳	۰/۹۰	۱/۲۸	۰/٦۹	۰/۷۸	A-PM
MAB (MJ/m^2)	۱/٤۹	۰/۵۲	۰/۷۲	۰/۸۱	۰/٦۳	۰/۸۰	۱/۲٤	۰/۵۰	۰/٦۰	MLQM
RMSE(MJ/m^2)	۱/۲۳	۰/۷۳	۰/۸٤	۰/۷٤	۰/۸۱	۰/۸٤	۱/۱۷	۰/۸۵	۰/۸۹	HM
RMSE(MJ/m^2)	۱/٦۷	۰/۹۰	۰/۷۰	۱/٤۵	۰/۸۵	۱/۰۸	۱/۵۳	۰/۷۷	۰/۸۸	A-PM
RMSE(MJ/m^2)	۱/۷۱	۰/۹٦	۰/۷۹	۱/۲٤	۰/۷۲	۰/۹۰	۱/۵۱	۰/۵۸	۰/۷۰	MLQM
MADEV(%)	٦	۳	٤	٤	٤	۵	۵	٤	۵	HM
MADEV(%)	۷	۵	۳	۹	۵	٦	۷	٤	۵	A-PM
MADEV(%)	٦	۵	٤	۵	٤	۵	٦	۳	٤	MLQM
RRMSE	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۰٤	۰/۰٤	۰/۰٤	۰/۰٤	۰/۰۷	۰/۰٤	۰/۰٤	HM
RRMSE	۰/۱۳	۰/۰٤	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۰٤	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۰۵	A-PM
RRMSE	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۰۳	MLQM



شکل۱- مجموع انرژی تابشی کلی خورشیدی رسیده به واحد سطح افقی در طول سال برای نقاط مختلف ایران برحسب MJ/m^2.

www.SID.ir

Archive of SID

پس از بررسی نقشه‌های تابش خورشیدی ماهیانه ، فصلی و سالیانه به این نتیجه رسیدیم که استانهای یزد، کرمان، سیستان و بلوچستان ، فارس ، هرمزگان و دامنه‌های زاگرس میانی و جنوبی، به لحاظ انرژی خورشیدی دارای پتانسیل بسیارخوبی می‌باشند.

پی‌نوشت‌ها:

۱- Synoptic

۲- T.S.R. (Total Solar Radiation)

۳- Double Mass Curves

٤- Maximum Likelihood Quadratic Equation

٥- Radiation Damping

٦- Extinction

۷- Mean Bias Error

۸- Mean Absolute Bias Error

۹- Root Mean Square Error

۱۰- Relative Root Mean Square Error

۱۱- Mean Absolute Percentage Deviation

References:

1. M. Daneshyar, "Solar radiation statistics for Iran," *Solar Energy*, **21**, 345-349 (1978).

2. M.A. Yaghubi and K. Jafarpour, "Global solar radiation in Fars province," *Iranian Journal of Science & Tech*, **14**, 47-62, Iran (1990).

3. ج. صمیمی، "برآورد تابش خورشیدی برحسب ارتفاع و کاربرد آن در اقلیم خورشیدی ایران،" *مجله فیزیک*، ۱۲، ۱۸، ۲٦ (۱۳۷۳).

4. A. Angstrom, "Solar and terrestrial radiation," Q.J. Roy.Met.Soc. 50, 121 (1924).

5. B.G. Akinoglu, "A review of sunshine-based models used to stimate monthly average global solar radiation," Renewable Energy, 1, **3**, 479-497 (1991).

6. Smith Martin, "1990 Report Consultation On Revision of FAO Methodology for CROP Water Requirements," (1990).

7. F. Neu wirth, "The estimation of global and sky radiation in Austria," *Solar Energy*, **24**, 421-426 (1980).

8. K.K. Gopinathan, "A general formula for computing the coefficients of the correlation connecting global solar radiation to sunshine duration," *Solar Energy*, Vol. 41, No. **6**, PP.499-502 (1988).

9. K. Yang, G.W. Huang, N. Tamai, "A hybrid model for estimating global solar radiation," *Solar Energy*, Vol. 70, **1**, 13-22 (2001).

www.SID.ir