

## برآورد پتانسیل تابش خورشیدی در شهر یزد

سام معینی<sup>۱</sup>، شهرام جوادی<sup>۲</sup>، محسن دهقان منشادی<sup>۳</sup>، رضا اسماعیلی<sup>۴</sup>

### چکیده:

شهر یزد، روی کمربند زرد تابشی قرار دارد و از نظر دریافت انرژی خورشید دارای پتانسیل بالایی می‌باشد. بر اساس برآوردهای انجام شده انرژی تابشی ورودی به یزد در حدود  $7787 \text{ Mj/m}^2$  در سال می‌باشد. هدف از این مقاله، ارائه دو روش برای برآورد تابش کل انرژی خورشیدی روی سطح صاف و مقایسه آن با اندازه‌گیری‌های پیرانومتري و تعیین خطاهای آماری در این شهر می‌باشد. در روش اول با دریافت پارامترهای دما، بارندگی، ساعات آفتابی و تابش از سازمان هواشناسی در بازه زمانی ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۳ معادله رگرسیونی تابش بر حسب این متغیرها را تعیین کردیم، در روش دوم (مدل آنگستروم) با استفاده از داده‌های پیرانومتري و ساعات آفتابی در همان بازه زمانی و محاسبه بقیه پارامترهای مقدار تابش تخمین زده شد. با بررسی‌های انجام شده توسط نرم‌افزار آماری SPSS مشاهده شد که در روش اول خطاهای آماری بیشتر می‌باشد و بین متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده همبستگی آماری وجود دارد و این پارامترها بر روی هم تاثیر دارند و در نهایت تنها پارامتر مستقل ساعات آفتابی می‌باشد. بدین منظور زمانی که میزان تابش شهر یزد در دسترس نباشد، معادله

$$\text{آنگستروم به فرم } \frac{H}{H_0} = 0.345 + 0.398 \left( \frac{n}{N} \right) \text{ پیشنهاد می‌شود.}$$

### تاریخ دریافت مقاله:

۸۸/۱۰/۲۸

### تاریخ پذیرش مقاله:

۸۹/۲/۲۰

### کلمات کلیدی:

انرژی خورشیدی، مدل‌های ریاضی، برآورد تابش خورشیدی، ساعات آفتابی

(۱) کارشناس ارشد مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز (نویسنده مسئول)

(۲) عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز - استادیار گروه برق

(۳) کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

(۴) دانشجوی دکتری اقلیم شناسی

## مقدمه

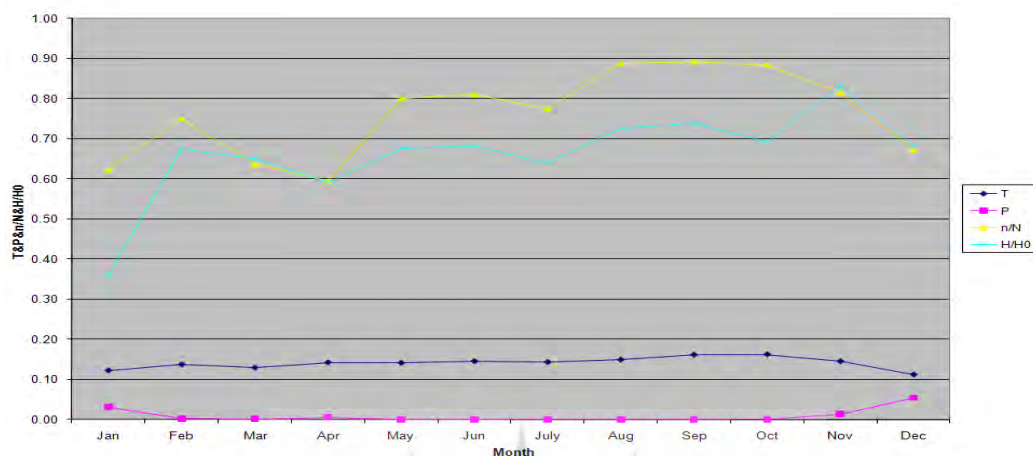
سوخته‌های فسیلی بیش از ۹۵ درصد انرژی ایران و بیش از ۸۱ درصد انرژی مصرفی دنیا را تامین می‌کنند. مصرف گسترده و بی‌رویه سوخته‌های فسیلی باعث بالا رفتن دمای کره زمین، بارش بارانهای اسیدی، اثر گازهای گلخانه‌ای و کاهش لایه ازن می‌شود. انرژی خورشید از تمیزترین انرژی‌های غیر فسیلی است و استفاده از آن کمترین آلودگی را در محیط زیست به وجود می‌آورد. [۳] دانستن اطلاعات مربوط به تابش خورشید در بسیاری از کاربردهای صنعتی، سیستم‌های فتوولتائیک، کشاورزی و طراحی کلکتورهای خورشیدی کاربرد دارد. دسترسی به اطلاعات انرژی خورشیدی به دو روش امکان‌پذیر است. روش اول اندازه‌گیری مستقیم انرژی خورشید توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری مانند پیرانومتر و پیرهلومتر می‌باشد. در روش دوم در مناطقی که مجهز به دستگاه‌های اندازه‌گیری تابش خورشید نیستند، یا اندازه‌گیری تابش در آن نقاط به صورت پراکنده می‌باشد با استفاده از مدل‌های تجربی انرژی خورشید را برآورد می‌کنند. ایران کشوری آفتابی است و از نظر انرژی خورشیدی دارای پتانسیل بالایی می‌باشد. در ایران، فعالیتهایی توسط محققان مختلف در زمینه تخمین انرژی خورشیدی صورت گرفته است. دانشیار [۵] با استفاده از داده‌های تابشی تهران اقدام به تصحیح ضرایب پالتریک-پروکتور [۱۳] نمود و روابطی بر اساس تابش مستقیم، تابش پخشی و تابش کل برای ۳۴ شهر ایران پیشنهاد کرد. بهادری و میرحسینی [۲]، روابطی برای تعیین ضریب صافی هوا برای شهرهای مختلف ایران ارائه کردند. جعفر پور و یعقوبی [۱۱] ضرایب معادله آنگستروم را برای شیراز بدست آوردند. صمیمی [۶] بیشتر وابستگی تابش را به ارتفاع محل می‌داند و از فرمول ارائه شده توسط ماینل و ماینل [۱۲] استفاده کرد و ضرایب آن مدل را برای ایران به دست آورد. صمیمی در نهایت نقشه انرژی خورشیدی را برای ایران تهیه کرد. سبزی پرور [۱] مدل صباغ [۱۵] و دانشیار را با اعمال تاثیر فاصله زمین تا خورشید تصحیح کرد. اهداف این مقاله عبارتند از:

- ۱- ارائه رابطه رگرسیونی بین تابش خورشید به عنوان متغیر وابسته و سایر متغیرهای هواشناسی مانند بارندگی، ساعات آفتابی و دما به عنوان متغیرهای مستقل و تعیین ضرایب آن برای شهر یزد
- ۲- معرفی رابطه خطی آنگستروم و تعیین ضرایب آن
- ۳- مقایسه مقادیر برآورد شده با اندازه‌گیری‌های پیرانومتری و تعیین خطاهای آماری

## مدل‌های ریاضی برای تخمین تابش کل خورشیدی

## برآورد تابش کل خورشیدی با استفاده از پارامترهای هواشناسی

انرژی خورشیدی که به گیرنده‌ای بر روی سطح زمین می‌رسد، تحت تاثیر عوامل مختلف هواشناسی شدت و کیفیت آن تغییر می‌کند. از این میان می‌توان پارامترهای مختلف هواشناسی همچون دما، بارندگی، رطوبت، ساعات آفتابی، مقدار ابرناکی (ضریب ابر) و... نام برد. در این جا ما ۳ پارامتر دما ( $T$ )، بارندگی ( $P$ ) و ساعات آفتابی ( $n$ ) در نظر گرفتیم. (شکل ۱)



شکل ۱: نمودار وابستگی تابش و ساعات آفتابی، بارندگی، دما

لازم به ذکر است، این پارامترهای جغرافیایی اولاً باید به لحاظ فیزیکی مقدار تابش را توجیه کنند و در ثانی، از لحاظ آماری هم نباید با یکدیگر همبستگی داشته باشند. با کمک نرم افزار آماری SPSS رابطه‌ای بر حسب پارامترهای هواشناسی نام برده شده به فرم زیر ارائه شد.

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = A_0 + A_1 \left(\frac{n}{N}\right) + A_2 T' + A_3 P' \quad (1)$$

$$\Delta = T_{\max} - T_{\min} \quad (2)$$

$$T' = \frac{\Delta}{\Delta_{\max}} \quad (3)$$

$$P' = \frac{P}{P_{\max}} \quad (4)$$

$\bar{H}$ : انرژی کل اندازه‌گیری شده روی سطح افقی است.

$\bar{H}_0$ : تابش فراجو می‌باشد که مقدار آن به طریق زیر محاسبه می‌شود [۶]

$$\bar{H}_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} (1 + 0.033 \cos \frac{360 n}{365}) \times \left[ \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (5)$$

$G_{sc}$ : ثابت خورشیدی است و مقدار آن در این مقاله ۱۳۷۳ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است.

$\delta$ : زاویه میل خورشیدی است. این زاویه را می‌توان از معادله تقریبی کوپر [۴] که در سال ۱۹۹۶ پیشنهاد کرد، محاسبه نمود.

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (۶)$$

$n$ : شماره روز می‌باشد و مقدار متوسط آن برای هر ماه در جدول (۱) است.

جدول ۱: مقدار  $n$  برای ماههای مختلف سال

Month	n For ith Day of Month	For the average Day Of The Month	
		Date	n Day of Year
January	I	17	17
February	31+i	16	45
March	59+i	16	75
April	90+i	15	105
May	120+i	15	135
June	151+i	11	162
July	181+i	17	198
August	212+i	16	228
September	243+i	15	258
October	273+i	15	288
November	304+i	14	318
December	334+i	10	344

$\omega_s$ : زاویه ساعت خورشیدی است (معادل ۱۵ درجه برای هر ساعت از ظهر خورشیدی) و مقدار آن از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (۷)$$

$N$ : طول روز که مقدار آن از رابطه به دست می‌آید.

$$N = \frac{2}{15} \omega_s \quad (۸)$$

$\bar{n}$ : میانگنر ساعات آفتابی می‌باشد که مقدار آن توسط دستگاه آفتاب نگار مدل کمبال- استوکس (Combal-Stokes) از سال ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۳ برای ایستگاه یزد اندازه‌گیری شده است و مقادیر آن در سازمان هواشناسی موجود می‌باشد.

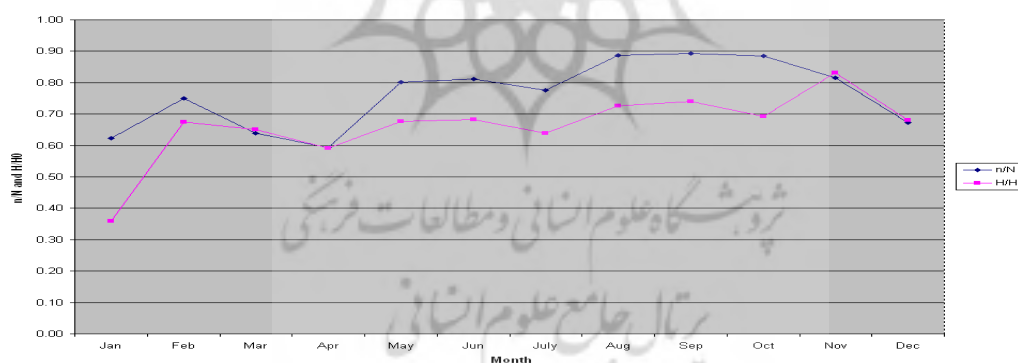
همان طور که مشاهده می‌شود در روابط (۲)، (۳)، (۴) پارامترهای دما، بارندگی را همانند تابش و ساعات آفتابی بدون دیمانسیون می‌کنیم تا تغییرات خطا در آنها کمتر شود و از طرفی ضریب همبستگی بهتر شود.

## مدل آنگستروم

اولین رابطه‌ای که به بررسی تخمین تابش کل روی سطح افقی پرداخت، رابطه خطی آنگستروم [۷] پریسکات [۱۴] بود. آنگستروم، در سال ۱۹۲۴ رابطه تجربی بین انرژی کل خورشید و ساعات آفتابی را به دست آورد. این رابطه بعدها توسط محققان دیگر مورد اصلاح قرار گرفت.

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = a + b\left(\frac{\bar{n}}{N}\right) \quad (9)$$

همان طور که مشاهده می‌شود، مهم‌ترین عامل بر روی تابش خورشیدی در رابطه آنگستروم ساعات آفتابی است. (شکل ۲) ضرایب  $a, b$  بیانگر شرایط آب و هوایی (اقلیمی) منطقه می‌باشند. گری پی [۹]، ضرایب معادله آنگستروم را تابعی از دما و بارندگی دانسته است. گپیناتهان [۱۵] ضرایب معادله آنگستروم را تابعی از عناصر اقلیمی مانند ارتفاع، عرض جغرافیایی و کسر ساعات آفتابی می‌داند. بر این اساس، با کمک نرم افزار آماری SPSS ضرایب آنگستروم برای بازه زمانی ۱۹۸۲ الی ۲۰۰۳ برای ایستگاه یزد محاسبه شدند. لذا، زمانی که اطلاعات تابشی در دسترس نیست، می‌توان با استفاده از معادله آنگستروم تابش خورشید را برای شهر یزد برآورد نمود.



شکل ۲: نمودار وابستگی تابش و ساعات آفتابی برای ایستگاه یزد

## آنالیز خطا

به طور معمول برای مقایسه مقادیر ثبت شده توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری و مقادیر محاسبه شده توسط مدل‌ها از روابط آماری

زیر استفاده می‌کنیم. در این روابط  $H_{i,c}$   $i$  امین مقدار برآورد شده و  $H_{i,m}$   $i$  امین مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشد

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{i,c} - H_{i,m}) \quad (10)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{i,c} - H_{i,m})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$MPE = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{(H_{i,m} - H_{i,c})}{n.H_{i,m}} \times 100 \right] \quad (12)$$

هر چه مقدار RMSE کمتر باشد، مدل از دقت بیشتری برخوردار است. اگر مقدار MBE مثبت باشد، یعنی مقدار پیش‌بینی شده از مقدار اندازه‌گیری شده بیشتر است و اگر مقدار MBE منفی باشد، یعنی مقدار اندازه‌گیری شده از مقدار پیش‌بینی شده بیشتر است. از طرفی برای محاسبه خطا یک تعریف جامع و کامل نداریم لذا برای حل این مشکل محاسبه آماره آزمون t پیشنهاد می‌شود و مقدار آن با t بحرانی در جدول مقایسه می‌شود.

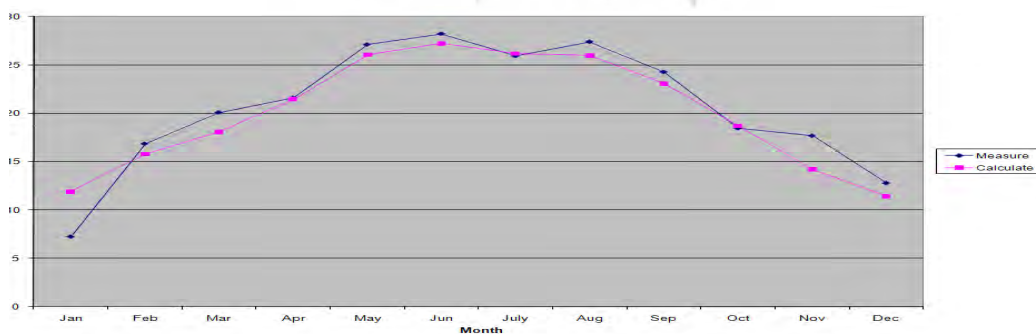
$$t = \left[ \frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2} \right]^{0.5} \quad (13)$$

### نتیجه‌گیری و بحث

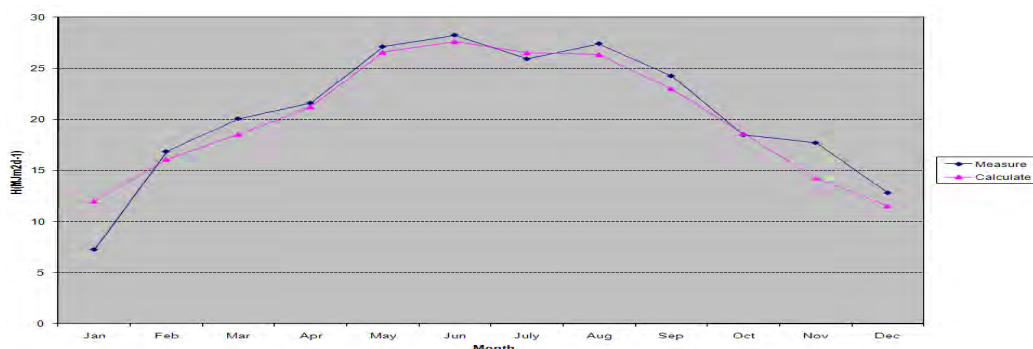
در این قسمت، با اخذ داده‌های تابشی، ساعات آفتابی، دمای ماکزیمم و دمای مینیمم از سازمان هواشناسی [۱۶] و محاسبه تابش فراجو و طول روز با استفاده از روابط (۵) و (۸) رابطه تجربی آنگستروم و مدل چند متغیره مبتنی بر پارامترهای هواشناسی برای شهر یزد برآورد شد. روابط پیشنهادی به صورت زیر می‌باشند. (شکل ۳ و ۴ مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده را نشان می‌دهد).

$$\frac{H}{H_0} = 0.236 + 0.328\left(\frac{n}{N}\right) + 1.080T' + 0.572P' \quad (14)$$

$$\frac{H}{H_0} = 0.345 + 0.398\left(\frac{n}{N}\right) \quad (15)$$



شکل ۳: مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده با استفاده از پارامترهای هواشناسی برای شهر یزد



شکل ۴: مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده با استفاده از رابطه آنگستروم برای شهر یزد

نتایج حاصل از مدل آنگستروم و مدل چند متغیره و همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده و میزان انحراف در این شهر در جدول ۲ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به جدول (۲)، مشاهده می‌شود که مدل آنگستروم اندکی دارای دقت بالاتری نسبت به مدل چند متغیره است. با توجه به نمودار، بیشترین انحراف در ماههای ژانویه و نوامبر مشاهده می‌شود.

جدول ۲: مقایسه نتایج حاصل از مدل آنگستروم و مدل چند متغیره در شهر یزد

بر حسب  $Mj/m^2.day$

Month	Measure Data	Method 1	Method 2
Jan	7.23	11.88	11.94
Feb	16.83	15.76	16.08
Mar	20.06	18.06	18.48
Apr	21.58	21.42	21.21
May	27.09	26.05	26.56
Jun	28.21	27.21	27.60
July	25.90	26.16	26.53
Aug	27.38	25.96	26.35
Sep	24.26	23.05	22.98
Oct	18.44	18.68	18.58
Nov	17.66	14.18	14.22
Dec	12.77	11.41	11.49
MBE		-0.62	-0.45
RMSE		1.96	1.88
t		1.12	0.82

در روش برآورد شدت تابش خورشید به وسیله مدل چند متغیره مشاهده شد که خود متغیرهای مستقل که شامل دما، بارندگی و ساعات آفتابی می‌باشند با یکدیگر همبستگی داشته و این موضوع باعث می‌شود روش اول از لحاظ آماری دچار مشکل شود. (جدول ۳ گویای این موضوع می‌باشد). در واقع در حالت خطی انتخاب چندین پارامتر با همدیگر باعث می‌شود پارامترهای فوق روی یکدیگر تاثیر داشته باشند. در این حالت بر اساس بیشترین وابستگی به تابش، پارامتر مربوطه را انتخاب می‌کنیم. در جدول شماره ۳ سهم هر یک از این پارامترها بر تابش خورشید نشان داده شده است. همان طور که در جدول ۳ ردیف اول مشاهده می‌کنیم ساعات آفتابی نزدیک به ۸۰ درصد از میزان تابش را توجیه می‌کند و بیشترین همبستگی را با تابش دارد لذا، مدل آنگستروم پیشنهاد می‌شود.

جدول ۳: همبستگی متغیرهای استفاده شده

		n/N	H/H0	T	P
n/N	Pearson Correlation	1	.754**	.708**	-.663**
	Sig. (2-tailed)		.000	.000	.000
	N	87	87	87	87
H/H0	Pearson Correlation	.754**	1	.662**	-.477**
	Sig. (2-tailed)	.000		.000	.000
	N	87	87	87	87
T	Pearson Correlation	.708**	.662**	1	-.592**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000		.000
	N	87	87	87	87
P	Pearson Correlation	-.663**	-.477**	-.592**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	
	N	87	87	87	87

## منابع

- [1] Ali A. Sabziparvar, H. Shetaee, 2007, "Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of East and West Iran", *Energy*, Vol. 32, pp 649–655.
- [2] Bahadori, M. N., and Mirhosseini, S. A., Solar radiation data for various cities in Iran (in Persian), 2004, presented at the Third Conference on Optimization of Fuel Consumption in Building, pp. 603-619.
- [3] Bahadorinejad, M., 1994, Solar energy in Iran, modeling from today for tomorrow, *Parliament and Research*, No. 2, Issue 7.
- [4] Cooper PI. The absorption of solar radiation in solar stills, 1969, *Sol Energy*;12(B):333–46.
- [5] Daneshyar M. Solar radiation statistics for Iran, 1978, *Sol Energy*;21:345–9.
- [6] Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1992, "Solar Engineering of thermal process", John Wiley & sons, new York .INC, 1991.
- [7] Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1992, "Solar Energy Engineering", John Wiley, U.S.A.
- [8] GOPINATHAN .K. K, 1988, "A simple method for predicting global solar radiation on a horizontal surface", *Sohw & Wind Technolo9*.
- [9] HALOUANI, N, NGOYEN, CT and Vo -NGOCD, 1993, "Calculation of Monthly Average Solar Radiation On Horizontal Surface Using Daily Hours Of Bright Sunshine", *Solar Ene50*, No.3, pp.247-258.
- [10] Islamic Republic of Iran Meteorological Office (IRIMO). 1988-2000, Annual year book reports, Data Center, Tehran, Iran.
- [11] Jafarpur K, Yaghoubi MA. Solar radiation for Shiraz, Iran. 1989, *Sol Wind Technol*;6(2):177–9.
- [12] Meinel, A.B., and Meinel, M.P., 1977. "Applied Solar Energy, An Introduction", Addison-Wesley Publishing, Company, Tuscon, Arizona.
- [13] Paltridge GW, Proctor D. Monthly mean solar radiation statistics for Australia, 1976. *Sol Energy*;18:235–43.
- [14] Prescott JA 1940 Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. Roy. Soc. S. A.* 64: 114–118 Samimi J. Estimation of height-dependent solar irradiation and application to the solar climate of Iran. *Sol Energy* 1994;52:5401–9.
- [15] Sabbagh J, Sayigh AAM, Al-Salam EMA, 1977, Estimation of the total solar radiation from meteorological data. *Sol Energy* ; 19:307–11.
- [16] Samimi J. Estimation of height-dependent solar irradiation and application to the solar climate of Iran, 1994, *Sol Energy*; 52:5401-9.