



بررسی عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی شیب‌دار و معمولی در اقلیم‌های مختلف ایران

محمد کلته^{1*}، میلاد رضوی نوری² و محمد رضا عاکف²

¹ استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

² دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

تاریخ دریافت: 1392/09/02؛ تاریخ بازنگری: 1393/06/04؛ تاریخ پذیرش: 1393/09/02

چکیده

با توجه به نیاز روز افزون به منابع انرژی ارزان قیمت و نامحدود، انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از منابع اصلی انرژی‌های تجدید پذیر انرژی خورشیدی می‌باشد. در این مقاله با استفاده از انرژی خورشیدی، عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی شیب‌دار و معمولی در اقلیم‌های مختلف ایران مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور مدل ریاضی مناسب برای تابش خورشید، کلکتور خورشیدی و دودکش در نظر گرفته شده است. برای تحلیل بهتر، سه نوع کلکتور افقی، شیب‌دار 30 درجه و 60 درجه در نظر گرفته شده و تابش دریافت شده و توان الکتریکی تولید شده با هم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که کلکتورهای افقی در تابستان توان بیشتری تولید می‌کنند در حالی که هر چه شیب کلکتور بیشتر شود در زمستان توان بیشتری تولید می‌شود. همچنین، کلکتورهایی با زاویه 30 درجه بیشترین تابش خورشید را دریافت می‌کنند در حالی که کلکتورهایی با زاویه 60 درجه بیشترین توان الکتریکی را تولید می‌کنند. در نهایت از میان شهرهای بررسی شده، شهر یزد بهترین عملکرد را داشته است.

کلمات کلیدی: دودکش خورشیدی؛ ایران؛ تابش دریافت شده؛ توان الکتریکی تولید شده؛ کلکتور شیب دار.

Performance evaluation of conventional and sloped solar chimney power plants in different climates of Iran

M. Kalteh^{1*}, M. Razavinouri² and M.R. Akef²

¹ Assist. Prof., Dep. Mech. Eng., University of Guilan, Rasht, Iran

² M. Sc. Student, Mech. Eng., University of Guilan, Rasht, Iran

Abstract

According to the ever-increasing need for low-cost and unlimited energy sources, renewable energies have been taken into consideration. Solar energy is one of the main sources of renewable energies. In this article, with the use of solar energy, conventional and sloped solar chimney power plant performance in different climates of Iran has been examined. To do this, the appropriate mathematical models for the radiation of the Sun, solar collector and chimney are used. For a better analysis, three types of horizontal collectors and 30° and 60° sloped ones are considered and their received radiation and electric power outputs are compared together. The results show that the horizontal collectors produce more power in the summer, while in the winter, power output increases with an increase in collector slope. Also, 30° sloped collectors get the most Sun's radiation, while 60° sloped ones produce maximum electrical power. Finally, among the considered cities, Yazd has the best performance.

Keywords: Solar chimney; Iran; Received radiation; Generated electrical power; Sloped collector.

1- مقدمه

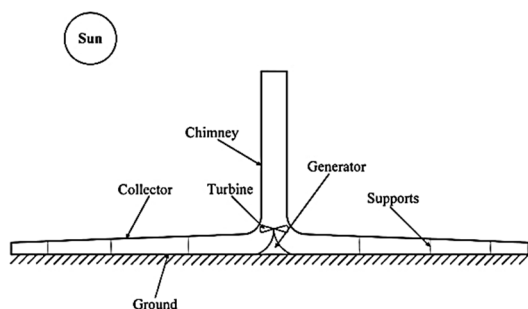
مفهوم دودکش خورشیدی در ابتدا توسط پروفیسور شلایش¹ از شهر اشتوتگارت در اواخر سال 1970 مطرح شد. کمتر از چهار سال بعد او ایده‌های خود را در یک کنفرانس مطرح کرد. سپس ساخت یک نیروگاه آزمایشی در مانزانارس اسپانیا آغاز شد و دولت آلمان و اسپانیا در راستای این سرمایه‌گذاری سودمند با یکدیگر همکاری کردند و یک نیروگاه آزمایشگاهی 36 کیلوواتی ساخته شد که به مدت 7 سال برق تولید کرد و در نتیجه کارایی و قابلیت اطمینان این تکنولوژی اثبات شد. پس از آن مطالعات فراوانی در این زمینه انجام گردید. کروگر² و بایس³ [1] با استفاده از شبیه‌سازی عددی به مطالعه عملکرد یک نیروگاه دودکش خورشیدی در سایتی در آفریقای جنوبی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که مقدار توان تولید شده در طول روز متغیر می‌باشد و از طرف دیگر به دلیل ظرفیت حرارتی زمین زیر کلکتور، در شب نیز می‌توان مقداری توان تولید نمود.

دای⁴ و همکاران [2] عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی در منطقه شمال شرق چین را مورد بررسی قرار دادند و تاثیر پارامترهایی همچون قطر دودکش، ارتفاع دودکش و دمای محیط بر عملکرد آن را مطالعه نمودند.

نیزتیک⁵ و همکاران [3] دو ناحیه از کشور کرواسی را به عنوان نماینده نواحی مدیترانه انتخاب و عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی در آنجا را مورد بررسی قرار دادند. آنها برای ارتفاع دودکش 550 متر و قطر کلکتور 1250 متر، 6/2-2/8 مگاوات قدرت تولیدی را گزارش داده‌اند.

لاربی⁶ و همکاران [4] عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی در قسمت جنوب غربی کشور الجزایر را بررسی کردند. بدین منظور آنها از مدل ارائه شده توسط شلایش استفاده نمودند. در نهایت آنها به بررسی اثر پارامترهای مختلف مانند دمای محیط، ارتفاع و قطر دودکش پرداختند.

ژو⁷ و همکاران [5] با استفاده از مدلسازی ریاضی، به بررسی عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی در فلات تبت پرداختند. نتایج آنها نشان داد که توان تولید شده در آنجا دو برابر توان تولید شده در مکانهای دیگر با همان عرض جغرافیایی می‌باشد. اسنقی⁸ و لاجوردی⁹ [6] با استفاده از شبیه‌سازی عددی حجم محدود، عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی افقی در 12 منطقه از ایران را بررسی کردند. نتایج آنها برای شهرهای مختلف و به صورت ماهانه ارائه گردید. بر اساس نتایج آنها امکان تولید توان 10-28 مگاوات ساعت در ماه با استفاده از تکنولوژی نیروگاه دودکش خورشیدی وجود دارد. اخیراً، استفاده از کلکتورهای شیب‌دار جهت استفاده در نیروگاههای دودکش خورشیدی در مناطق مرتفع توصیه شده است. بر این اساس کائو¹⁰ و همکاران [7] به مقایسه عملکرد دودکش خورشیدی معمولی و شیب‌دار در کشور چین پرداخته‌اند.



شکل 1- شماتیک نیروگاه دودکش خورشیدی با کلکتور افقی [7]

از آنجایی که چنین مطالعاتی برای کشور ایران وجود ندارد و مقایسه نتایج عملکرد برای دو نوع کلکتور معمولی و شیب‌دار می‌تواند اطلاعات طراحی مناسبی را ارائه دهد، در این مقاله به این مقوله پرداخته شده است. از طرف دیگر مقایسه‌ای نیز بین چند شهر مختلف کشور انجام گرفته است. جهت انجام این کار، از مدل مناسب جهت مدلسازی تابش خورشیدی، کلکتور خورشیدی افقی و شیب‌دار و

¹ Schlaich

² Kroger

³ Buys

⁴ Dai

⁵ Nizetic

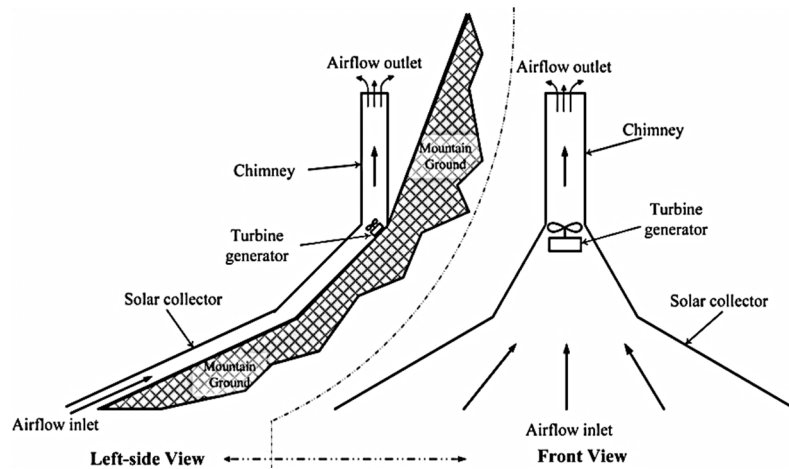
⁶ Larbi

⁷ Zhou

⁸ Asnaghi

⁹ Ladjevardi

¹⁰ Cao



شکل 2- شماتیک نیروگاه دودکش خورشیدی با کلکتور شیب‌دار [7]

2- مدل ریاضی

2-1- مدل تابش خورشید

برای محاسبه انرژی خورشیدی دریافت شده در سطح افقی و شیب‌دار برای عرض‌های جغرافیایی مختلف و روزهای مختلف سال از مدل موجود در [8] استفاده شده است. متوسط ماهانه تابش دریافت شده در خارج از اتمسفر از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\bar{H}_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{SC} \left(1 + 0.33 \cos \frac{360 \times n}{365} \right) \times [\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta] \quad (1)$$

G_{SC} ثابت خورشید می‌باشد و مقدار آن $1376 \left(\frac{W}{m^2} \right)$ تعیین شده است و n شماره متوسط روز برای ماههای مختلف سال می‌باشد. ϕ عرض جغرافیایی، δ زاویه انحراف و ω_s زاویه ساعت غروب خورشید می‌باشد که از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \times \frac{284+n}{365} \right) \quad (2)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3)$$

متوسط ماهانه ضریب صافی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (4)$$

که \bar{H} متوسط ماهانه کل تابش دریافت شده توسط صفحه افقی روی سطح زمین می‌باشد. مقدار \bar{K}_T در شهرهای مختلف از [9] استخراج شده است.

کل تابشی که به سطح افقی می‌رسد به دو بخش تابش مستقیم و پخش شده تقسیم می‌شود:

دودکش استفاده شده است. معادلات حاکم برای شهرهای مختلف ایران و به صورت ماهیانه حل شده و نتایج آنها با هم مقایسه شده است.

2-1- توصیف سیستم

یک نیروگاه دودکش خورشیدی شامل 3 بخش اصلی می‌باشد؛ جمع‌کننده‌ی خورشیدی (با یک لایه ذخیره گرما در زیر آن)، دودکش خورشیدی و توربین هوا. در این فرایند هوای سرد محیط از پیرامون کلکتورها وارد آن می‌شود و در حین حرکت در کانال بر اثر انتقال حرارت گرم می‌شود و چگالی آن کاهش می‌یابد. اختلاف فشار به وجود آمده بر اثر اختلاف چگالی هوای گرم داخل کلکتور با هوای سرد محیط باعث حرکت هوا به سمت دودکش می‌شود. توربین هوای بکار رفته در دودکش انرژی جنبشی هوا را گرفته و آن را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. سپس جریان هوا با سرعت و دمای کم بر اثر پدیده‌ی رانش از بالای دودکش خارج می‌شود. تفاوت اصلی بین کلکتورهای تخت با نوع شیب‌دار آن در زاویه کلکتور و ارتفاع دودکش آنها است. در کلکتورهای تخت آنها را به صورت افقی تنظیم می‌کنند در حالی که در نوع شیب‌دار آنها را در امتداد یک کوه قرار می‌دهند.

و ضریب عبور شیشه را محاسبه کرد و در هم ضرب نمود که مقادیر آن برای سطوح افقی و شیب‌دار متفاوت است. برای محاسبه ضریب جذب زمین می‌توان آن را خاکستری فرض کرد در این صورت:

$$\alpha = \varepsilon \quad (13)$$

که ε ضریب نشر می‌باشد. برای حالت شیب‌دار ابتدا باید زاویه برخورد را بدست آورد:

$$\bar{\theta}_b = \arccos(\sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega) \quad (14)$$

$$\bar{\theta}_d = 59.7 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \quad (15)$$

$$\bar{\theta}_g = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \quad (16)$$

که γ زاویه سمت سطح می‌باشد که با توجه به [8] برای محاسبه متوسط ماهیانه زاویه برخورد $\gamma = 0$ است و ω نیز زاویه ساعت می‌باشد و 2/5 ساعت بعد از ظهر در نظر گرفته می‌شود (هر ساعت 15 درجه می‌باشد).

متوسط ماهانه ضریب جذب برای سطح شیب‌دار از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_n (1 + 2.0345 \times 10^{-3} \bar{\theta} - 1.990 \times 10^{-4} \bar{\theta}^2 + 5.324 \times 10^{-6} \bar{\theta}^3 - 4.799 \times 10^{-8} \bar{\theta}^4) \quad (17)$$

در رابطه‌ی فوق $\bar{\alpha}_n$ همان ضریب جذب سطح افقی است. با قرار دادن $\bar{\theta}_b$ ، $\bar{\theta}_d$ و $\bar{\theta}_g$ در رابطه‌ی فوق می‌توان $\bar{\alpha}_d$ ، $\bar{\alpha}_b$ و $\bar{\alpha}_g$ را محاسبه نمود.

برای محاسبه ضریب عبور شیشه ابتدا باید ضریب انعکاس را محاسبه کرد که در حالت افقی از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$r_{(0)} = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \quad (18)$$

که n شاخص انکسار شیشه می‌باشد و برای زاویه برخورد θ_1 به شرح زیر است:

$$r_{\perp} = \left(\frac{\sin(\theta_2 - \theta_1)}{\sin(\theta_2 + \theta_1)}\right)^2 \quad (19)$$

$$r_{\parallel} = \left(\frac{\tan(\theta_2 - \theta_1)}{\tan(\theta_2 + \theta_1)}\right)^2 \quad (20)$$

$$r_{(\theta_1)} = \frac{1}{2}(r_{\perp} + r_{\parallel}) \quad (21)$$

که θ_2 با توجه به رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \theta_1}{1.525}\right) \quad (22)$$

$$\bar{H} = \bar{H}_b + \bar{H}_d \quad (5)$$

که \bar{H}_b معرف متوسط ماهانه تابش مستقیم و \bar{H}_d متوسط ماهانه تابش پخش شده می‌باشد. مقدار \bar{H}_d نیز از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\text{برای } \omega_s \leq 81.4 \text{ و } 0.3 \leq \bar{K}_T \leq 0.8:$$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.391 - 3.560\bar{K}_T + 4.189\bar{K}_T^2 - 2.137\bar{K}_T^3 \quad (6)$$

$$\text{و برای } \omega_s > 81.4 \text{ و } 0.3 \leq \bar{K}_T \leq 0.8:$$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.311 - 3.022\bar{K}_T + 3.427\bar{K}_T^2 - 1.821\bar{K}_T^3 \quad (7)$$

کل تابش دریافتی در سطح شیب‌دار برای زاویه کجی β با توجه به [7] از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$\bar{H}_t = (\bar{H} - \bar{H}_d)R_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \bar{H}(ref) \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (8)$$

که ref بازتابش زمین می‌باشد که با توجه به [10] مقدار آن 0/25 در نظر گرفته شده است. R_b نسبت متوسط ماهانه تابش مستقیم در سطح شیب‌دار به سطح افقی می‌باشد که توسط رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$R_b = \frac{\cos(\theta - \beta) \cos \delta \sin \omega_{ts} + (\pi/180)\omega_{ts} \sin(\theta - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180)\omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (9)$$

که ω_{ts} زاویه ساعت غروب خورشید برای سطح شیب‌دار می‌باشد و رابطه‌ی آن به صورت زیر است:

$$\omega_{ts} = \min [\cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta), \cos^{-1}(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta)] \quad (10)$$

مقدار تابشی که در حالت افقی و شیب‌دار جذب زمین می‌شود از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\bar{S}_{hor} = \bar{H}(\bar{\alpha}) \quad (11)$$

$$\bar{S}_t = (\bar{H} - \bar{H}_d)R_b(\bar{\alpha})_b + \bar{H}_d(\bar{\alpha})_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \bar{H}(ref)(\bar{\alpha})_g \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (12)$$

که اندیس hor معرف سطح افقی و t سطح شیب‌دار می‌باشد. در معادلات فوق $(\bar{\alpha})$ حاصل ضرب ضریب عبور شیشه و ضریب جذب زمین می‌باشد. اندیس های d ، b و g به ترتیب معرف مستقیم، پخش شده و بازتابش زمین می‌باشد.

2-1-1-1-2- ضریب جذب و ضریب عبور

زمین آن بخشی از تشعشع خورشید را جذب می‌کند که از شیشه کلکتور عبور کرده باشد. پس باید ضریب جذب زمین

اتلاف حرارتی کل، T_{pm} دمای متوسط صفحه کلکتور، T_a دمای هوای محیط و \bar{S} متوسط ماهانه انرژی تابشی جذب شده می‌باشد که با توجه به معادلات (11) و (12) بدست می‌آیند.

اتلاف حرارتی کل نیز با توجه به [11] از روابط زیر بدست می‌آید:

$$U_L = U_t + U_b \quad (28)$$

که U_t ضریب اتلاف حرارتی فوقانی و U_b ضریب اتلاف حرارتی تحتانی می‌باشد و از روابط زیر بدست می‌آید [8]:

$$U_t = \frac{q_t}{T_{pm} - T_a} \quad (29)$$

$$q_t = \frac{T_{pm} - T_a}{NC - 1 \left(\frac{T_{pm} - T_a}{N + ff} \right)^{0.25 + h_w - 1}} + \frac{\sigma(T_{pm}^4 - T_a^4)}{\varepsilon_p^{-1} + \frac{2N + ff - 1}{\varepsilon_p} - N} \quad (30)$$

$$C = 1.2529 - 0.00651\beta + 0.0000267\beta^2 \quad (31)$$

$$ff = 0.76 - 0.118v_w + 0.0066v_w^2 \quad (32)$$

$$h_w = 2.8 + 3.0v_w \quad (33)$$

$$U_b = 2 \left(\frac{k\rho c_p}{\pi t} \right)^{0.5} \quad (34)$$

که در آن N تعداد شیشه کلکتور، h_w ضریب جابجایی باد، σ ثابت استفان - بولتزمن، ε_p ضریب نشر زمین، v_w سرعت باد روی سطح کلکتور، k رسانایی حرارتی زمین، ρ چگالی زمین، c_p ظرفیت حرارتی زمین و t دوره‌ی زمانی می‌باشد که مقدار آن 86400 ثانیه است.

از طرف دیگر شار حرارتی در داخل کلکتور از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_o - T_a) \quad (35)$$

$$\dot{m} = \rho_f v_{chi} A_{chi} \quad (36)$$

که \dot{m} دبی جرمی جریان، T_o دمای جریان در خروجی کلکتور، ρ_f چگالی جریان، v_{chi} سرعت جریان در ورودی دودکش، A_{chi} مساحت سطح مقطع دودکش و c_p ظرفیت حرارتی جریان هوا می‌باشد.

چگالی با توجه به [12] برای دمای بین 0 تا 70 درجه سلسیوس از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$\rho(T) = 0.000012T^2 - 0.011167T + 3.445689 \quad (37)$$

برای بدست آوردن عملکرد کلکتور به دمای متوسط صفحه‌ی کلکتور و دمای متوسط جریان نیاز داریم که از روابط زیر بدست می‌آیند [8]:

$$T_{pm} = T_a + \frac{\dot{Q}}{F_R A_{coll} U_L} (1 - F_R) \quad (38)$$

ضریب عبور از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\tau = \tau_a \tau_r \quad (22)$$

که در آن برای سطوح افقی τ_r از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\tau_r = \frac{1 - r(0)}{1 + r(0)} \quad (23)$$

و همچنین برای سطوح شیب‌دار نیز داریم:

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \right] \quad (24)$$

اندیس r به خاطر این است که فقط اتلاف ناشی از انعکاس در نظر گرفته شده است.

همچنین τ_a نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$\tau_a = \exp\left(-\frac{kl}{\cos\theta_2}\right) \quad (25)$$

که در آن k ضریب انقراض شیشه و l ضخامت شیشه می‌باشد. برای حالت افقی مطابق [8] $\theta_2 = 0$ در نظر گرفته می‌شود. اندیس a بخاطر این است که فقط اتلاف ناشی از جذب در نظر گرفته شده است.

با قرار دادن $\bar{\theta}_g$ و $\bar{\theta}_a$ در معادلات بالا می‌توان τ_a ، τ_b و τ_g را محاسبه کرد.

در نهایت مقدار متوسط ماهانه ضریب جذب زمین و عبور یافته از شیشه از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$(\bar{\tau}\alpha) = 1.01 \times \bar{\tau}\alpha \quad (26)$$

با قرار دادن $\bar{\alpha}_b$ و $\bar{\tau}_b$ در معادله فوق $(\bar{\tau}\alpha)_b$ قابل محاسبه خواهد بود و بطور مشابه $(\bar{\tau}\alpha)_a$ و $(\bar{\tau}\alpha)_g$ محاسبه می‌شود.

2-2- مدل ریاضی کلکتور خورشیدی

در بررسی کلکتورهای خورشیدی فرضیات موجود در [8] در نظر گرفته شده است که عبارتند از:

- 1- جریان پایاست.
- 2- سرعت جریان هوا در ورودی کلکتور نادیده گرفته می‌شود.
- 3- هیچگونه تبخیری در کلکتور انجام نمی‌شود.
- 4- تغییرات دما در راستای عمود بر جریان صفر می‌باشد.
- 5- تلفات انرژی در ورودی کلکتور نادیده گرفته می‌شود.

مقدار انرژی گرمایی که صفحه‌ی کلکتور به واسطه‌ی تابش دریافت می‌کند طبق [8] از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\dot{Q} = A_{coll} (\bar{S} - U_L (T_{pm} - T_a)) \quad (27)$$

که در آن \dot{Q} مقدار شار گرمایی است که جذب جریان هوای داخل کلکتور می‌شود، A_{coll} مساحت سطح کلکتور، U_L

قراردادن $z=0$ برای ورودی کلکتور اختلاف فشار کلکتور به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\Delta P_{coll} = \left(\frac{\rho_a + \rho_o}{2}\right) g H_{coll} \quad (46)$$

با ترکیب معادلات (43) و (46) اختلاف فشار کلی به صورت زیر بدست خواهد آمد.

$$\Delta P_{tot} = (\rho_a - \rho_o) g \left(H_{chi} + \frac{H_{coll}}{2} \right) \quad (47)$$

برای کلکتورهای افقی $H_{coll} = 0$ می‌باشد.

اختلاف فشار شامل 4 بخش زیر می‌باشد:

1- افت اصطکاکی کلکتور و دودکش ΔP_f

2- تلفات انرژی جنبشی در ورودی توربین ΔP_{in}

3- تلفات انرژی جنبشی در خروجی دودکش ΔP_{out}

4- فشار موثری که توربین برای تولید برق استفاده می‌کند ΔP_t

بنابراین می‌توان نوشت:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_f + \Delta P_{in} + \Delta P_{out} + \Delta P_t \quad (48)$$

$$\Delta P_f = f \frac{L_{th}}{D_h} \frac{1}{2} \rho_f v_f^2 \quad (49)$$

$$\Delta P_{in} = \frac{1}{2} \rho_o v_o^2 \quad (50)$$

$$\Delta P_{out} = \frac{1}{2} \rho_{out} v_{out}^2 \quad (51)$$

که در آن f ضریب اصطکاک (با توجه به معادلات جریان مغشوش بدست می‌آید)، L_{th} طول معادل، D_h قطر هیدرولیکی، ρ_f چگالی جریان، v_f سرعت جریان، v_o سرعت در خروجی کلکتور که با سرعت در ورودی دودکش برابر می‌باشد و v_{out} سرعت خروجی دودکش است.

$$\rho_o v_o = \rho_{out} v_{out} \quad (52)$$

2-4- توان خروجی و بازده

توان تولید شده توسط توربین از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [7]:

$$P_{ele} = \eta_t \Delta P_t v_o A_{chi} \quad (53)$$

که در آن P_{ele} توان الکتریکی و η_t بازده توربین می‌باشد.

و بازده از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}}{\bar{H} \times A_{coll}} \quad (54)$$

$$\eta_{sys} = \frac{P_{ele}}{\bar{H} \times A_{coll}} \quad (55)$$

برای کلکتورهای شیب‌دار به جای \bar{H} از \bar{H}_t استفاده می‌شود.

$$T_{fm} = T_a + \frac{\dot{Q}}{FR A_{coll} U_L} (1 - F'') \quad (39)$$

که T_{fm} دمای متوسط جریان، F_R ضریب دفع حرارت کلکتور و F'' ضریب جریان کلکتور می‌باشد. مقادیر F'' و F_R نیز با توجه به [5] از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p}{A_{coll} U_L} (1 - \exp(-\frac{A_{coll} U_L F'}{\dot{m} c_p})) \quad (40)$$

$$F'' = \frac{F_R}{F'} \quad (41)$$

F' ضریب بهره‌وری کلکتور می‌باشد و با توجه به [2] مقدار آن 0/8 در نظر گرفته شده است.

برای حل مدل به یک معادله کمکی نیاز است که می‌توان با توجه به [13] از رابطه‌ی زیر استفاده نمود:

$$T_{fm} = \frac{T_a + T_{pm}}{2} \quad (42)$$

2-3- مدل ریاضی دودکش خورشیدی

در بررسی دودکش فرضیات موجود در مرجع [8] در نظر گرفته شده است:

1- تقریب بوزینسک معتبر می‌باشد.

2- اتلاف انرژی در دیواره دودکش نادیده گرفته شده است.

3- اغتشاش بعد توربین نادیده گرفته شده است.

اختلاف فشار دودکش‌های عمودی از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\Delta P_{ch} = (\rho_{out} - \rho_o) g H_{chi} = (\rho_a - \rho_o) g H_{chi} \quad (43)$$

که در آن ΔP_{ch} اختلاف فشار دودکش، H_{chi} ارتفاع دودکش، g شتاب گرانش زمین، ρ_o چگالی هوا در ورودی دودکش، ρ_{out} چگالی هوا در خروجی دودکش و ρ_a چگالی هوای محیط می‌باشد، که چگالی هوا در خروجی دودکش با چگالی هوای محیط برابر فرض شده است.

اختلاف فشار بین ورودی و خروجی کلکتور خورشیدی نیز از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\Delta P = \int_{inlet}^{outlet} g (\rho_a - \rho(z)) dz \quad (44)$$

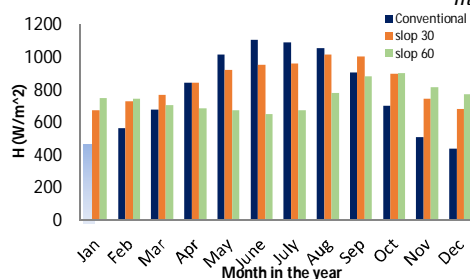
که z ارتفاع می‌باشد. مطابق مراجع [11، 14 و 15] تغییرات چگالی خطی فرض می‌شود.

$$\rho(z) = \rho_a + \frac{\rho_o - \rho_a}{H_{coll}} z \quad (45)$$

که در آن H_{coll} ارتفاع کلکتور می‌باشد. بنابراین با انتگرال‌گیری از معادله (44) و جاگذاری (45) در آن و

برای 6 شهر از اقلیم‌های مختلف ایران انجام گرفته است. ابتدا نتایج و نمودارهای مربوط به شهر یزد بیان شده است و سپس مقایسه‌ای میان شهرهای مختلف ایران انجام گرفته است.

نتایج حاصل از حل معادلات برای شهر یزد در شکل 3 نشان داده شده است. همانگونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود بیشترین تابش دریافت شده برای کلکتورهای افقی مقدار $(\frac{W}{m^2})$ 1105 مربوط به ماه ژوئن و کمترین آن مقدار $(\frac{W}{m^2})$ 440 مربوط به ماه دسامبر می‌باشد. برای کلکتورهای 30 درجه بیشترین تابش دریافت شده مقدار $(\frac{W}{m^2})$ 1016/8 مربوط به ماه آگوست و کمترین آن $(\frac{W}{m^2})$ 683 مربوط به ماه دسامبر می‌باشد. برای کلکتورهای 60 درجه بیشترین تابش دریافت شده $(\frac{W}{m^2})$ 901 مربوط به ماه اکتبر و کمترین آن $(\frac{W}{m^2})$ 652/7 مربوط به ماه ژوئن می‌باشد.



شکل 3- نمودار میانگین ماهانه تابش دریافت شده در شهر یزد برای کلکتورهای افقی، 30 و 60 درجه درسال

از آنجایی که در تابستان خورشید بر سطح زمین عمودتر می‌تابد، کلکتورهای افقی در تابستان تابش بیشتری دریافت می‌کنند. در حالی که در زمستان خورشید بر سطح زمین مایل می‌تابد، زاویه تابش خورشید بر سطوح شیب‌دار عمودتر می‌باشد. بنابراین کلکتورهای شیب‌دار در زمستان تابش بیشتری دریافت می‌کنند.

توان الکتریکی تولید شده برای شهر یزد در طول سال برای سه مدل مختلف دودکش خورشیدی در شکل 4 نشان داده شده است. همانگونه که در شکل 4 مشاهده می‌شود بیشترین توان الکتریکی تولید شده برای کلکتورهای افقی مقدار 5/85 MW مربوط به ماه ژوئن و کمترین آن مقدار 2/28 MW مربوط به ماه ژانویه می‌باشد. برای کلکتورهای 30 درجه بیشترین توان الکتریکی تولید شده 3/23 MW

2-4- الگوریتم حل

با توجه به معادلات بیان شده ابتدا مقادیر مربوط به تابش را برای ماه‌های مختلف محاسبه نموده و در بخش کلکتور با حدس اولیه برای دمای متوسط زمین و دبی جریان وارد فرآیند حل شده و در نهایت مقادیر مربوط به توان محاسبه خواهد شد. در این مقاله، از نرم افزار متلب برای نوشتن برنامه حل استفاده شده است.

3- بحث و بررسی نتایج

برای بررسی عملکرد، نیروگاه دودکش خورشیدی با توان اسمی 5 مگاوات در نظر گرفته شده است. ابعاد نیروگاه با توجه به مراجع [7 و 11] در نظر گرفته شده است، که در جدول 1 نشان داده شده است.

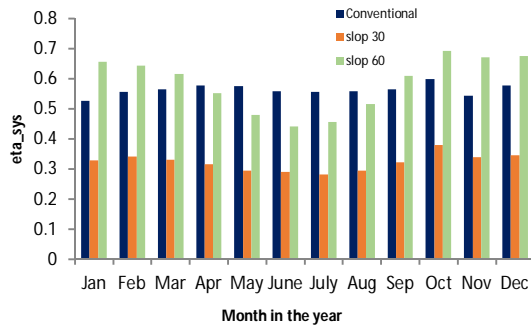
جدول 1- داده های نیروگاه 5 مگاواتی.

دودکش		دودکش	
خورشیدی شیب‌دار		خورشیدی افقی	
کلکتور	550 (m)	شعاع کلکتور	550 (m)
خورشیدی	950000(m ²)	مساحت کلکتور	950000(m ²)
	0-1378.4 (m)	ارتفاع کلکتور	0
	2.5 (m)	فاصله زمین تا شیشه کلکتور	2.5 (m)
	1.526	شاخص انکسار	1.526
	5 (mm)	ضخامت شیشه	5 (mm)
	32(m ⁻¹)	ضریب انقراض	32(m ⁻¹)
دودکش	60 (m)	ارتفاع	574 (m)
	54 (m)	قطر	54 (m)
زمین	جرانیت	جنس	جرانیت
	2640($\frac{kg}{m^2}$)	چگالی	2640($\frac{kg}{m^2}$)
	820($\frac{J}{kgk}$)	ظرفیت حرارتی	820($\frac{J}{kgk}$)
	1.73($\frac{W}{mK}$)	هدایت حرارتی	1.73($\frac{W}{mK}$)
	0.92	ضریب نشر	0.92
	0.25	بازتابش	0.25
توربین	0.8	بازده	0.8
	0.056	ضریب اتلاف ورودی	0.056

3-1- نتایج

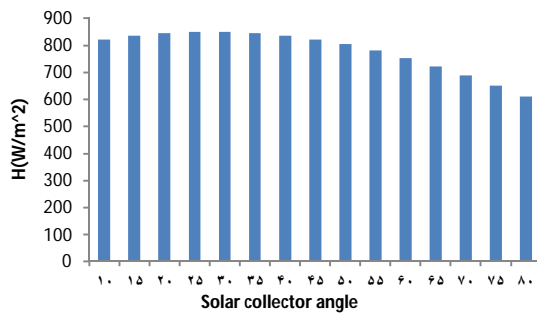
برای بررسی نیروگاه دودکش خورشیدی سه مدل دودکش خورشیدی با کلکتور افقی و دودکش خورشیدی با کلکتور 30 درجه و 60 درجه با هم مقایسه می‌شوند. این مقایسه

برای کلکتور با شیب 60 درجه بیشترین افزایش دما $9/94^{\circ}\text{C}$ مربوط به ماه اکتبر و کمترین آن $18/71^{\circ}\text{C}$ مربوط به ماه ژوئن می‌باشد. در نتیجه افزایش دما در زمستان بیشتر از تابستان می‌باشد. علت هم این است که در زمستان تابش بیشتری دریافت می‌شود.



شکل 6- نمودار بازده سیستم در شهر یزد برای کلکتورهای افقی، 30 و 60 درجه در سال

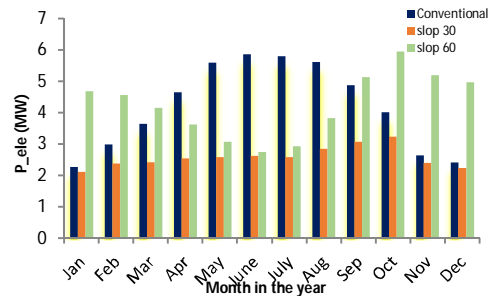
شکل 6 بازده سیستم را برای دودکش خورشیدی در شهر یزد نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل 6 مشاهده می‌شود بازده سیستم برای کلکتورهای 30 درجه کمترین مقدار را داراست و کلکتورهای 60 درجه در زمستان بازده بیشتری نسبت به تابستان دارند. چون این کلکتورها در زمستان توان بیشتری تولید می‌کنند.



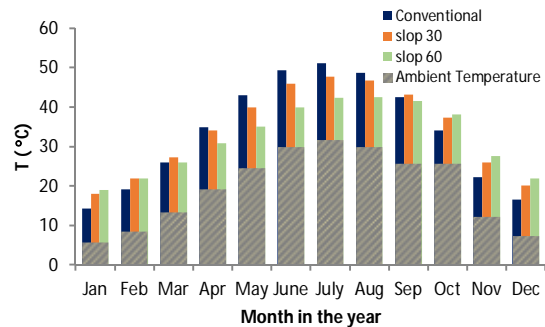
شکل 7- نمودار میانگین سالیانه تابش دریافت شده در شهر یزد برای کلکتورهایی با شیب متفاوت

در شکل 7 میانگین سالیانه تابش دریافت شده در شهر یزد برای شیب‌های مختلف کلکتور نشان داده شده است. همانگونه که در شکل 7 مشاهده می‌شود بیشترین تابش سالیانه مقدار $851/01 \frac{W}{m^2}$ مربوط به زاویه 30 درجه

مربوط به ماه دسامبر می‌باشد. در کلکتورهای 60 درجه بیشترین توان الکتریکی تولید شده مقدار $5/93 \text{ MW}$ مربوط به ماه اکتبر و کمترین مقدار آن $2/74 \text{ MW}$ مربوط به ماه ژوئن می‌باشد. در نتیجه با توجه به توضیحات فوق در ماه‌هایی که تابش بیشتری دریافت می‌شود توان الکتریکی بیشتری نیز تولید می‌شود.

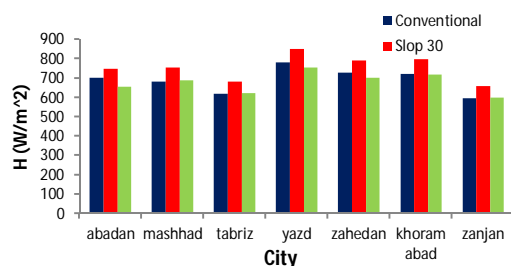


شکل 4- نمودار توان الکتریکی تولید شده در شهر یزد برای کلکتورهای افقی، 30 و 60 درجه در سال

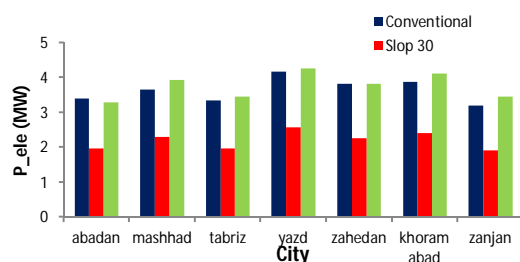


شکل 5- نمودار دمای محیط و دمای خروجی جریان در شهر یزد برای کلکتورهای افقی، 30 و 60 درجه

نمودار تغییرات دمای محیط و دمای خروجی جریان برای شهر یزد در شکل 5 نشان داده شده است. همانگونه که در شکل 5 مشاهده می‌شود برای کلکتور افقی بیشترین افزایش دما $19/34^{\circ}\text{C}$ مربوط به ماه ژوئن و کمترین آن $8/44^{\circ}\text{C}$ مربوط به ماه ژانویه می‌باشد. برای کلکتور با شیب 30 درجه بیشترین افزایش دما $15/92^{\circ}\text{C}$ مربوط به ماه ژوئن و کمترین آن مقدار $12/16^{\circ}\text{C}$ مربوط به ماه ژانویه می‌باشد. بنابراین نتیجه می‌شود که از ماه ژانویه تا ژوئن برای این دو نوع کلکتور میزان تغییر دما افزایش می‌یابد و از ژوئن تا دسامبر تغییر دما کاهش می‌یابد و به طور مستقیم تابع تابش دریافت شده در این ماه‌ها می‌باشد.



شکل 9- میانگین سالیانه تابش دریافت شده برای کلکتورهای افقی، 30 و 60 درجه برای شهرهای مختلف ایران



شکل 10- نمودار میانگین سالیانه توان الکتریکی تولید شده برای کلکتورهای افقی، 30 و 60 درجه برای شهرهای مختلف ایران

جدول 2- زاویه بهینه کلکتور برای ماکزیمم میانگین سالیانه

توان تولید شده برای شهرهای مختلف ایران

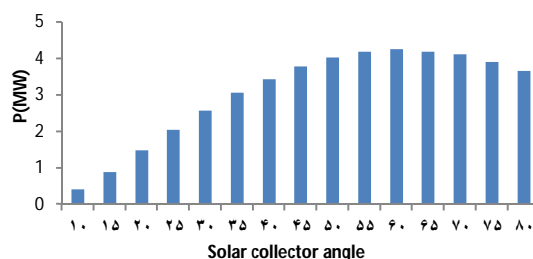
شهر	زاویه کلکتور	P (MW)	H (W)
آبادان	59.1	3.29	661.18
مشهد	62.2	3.98	676.94
تبریز	59.6	3.48	623.29
یزد	59.5	4.29	756.94
زاهدان	60.8	3.91	697.58
خرم آباد	61	4.16	713.76
زنجان	61.8	3.47	591.55

در جدول 2 زاویه بهینه کلکتور در دودکش‌های خورشیدی شیب‌دار برای شهرهای مختلف کشور ارائه شده است. معیار بهینه بودن، ماکزیمم میانگین سالیانه توان تولید شده می‌باشد. همچنین، مقادیر میانگین سالیانه توان تولید شده و تابش دریافت شده برای زاویه بهینه ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول می‌توان مشاهده نمود که زاویه بهینه برای تمام شهرها در حدود 60 درجه می‌باشد. دلیل این امر تابش دریافت شده بیشتر نسبت به حالت افقی و ارتفاع بیشتر کلکتور نسبت به 30 درجه می‌باشد.

می‌باشد. در حدود زاویه 30 درجه برای نیم کره شمالی بیشترین تابش دریافت می‌شود.

در شکل 8 مشاهده می‌شود که بیشترین توان تولید شده سالیانه مقدار $4/27$ MW مربوط به زاویه 60 درجه می‌باشد. در 30 درجه بیشترین تابش دریافت می‌شود ولی ارتفاع کلکتور کمتر است ولی در 60 درجه با اینکه تابش نسبت به 30 درجه کمتر است اما ارتفاع کلکتور زیاد شده و این توان تولیدی را افزایش می‌دهد. بعد از 60 درجه با اینکه ارتفاع کلکتور خیلی زیاد می‌شود ولی تابش زیادی را نمی‌تواند دریافت کند و در نتیجه بازده کمتری دارد.

در شکل 9 میانگین سالیانه تابش دریافت شده برای شهرهای مختلف ایران با هم مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل 9 مشاهده می‌شود میانگین سالیانه تابش دریافت شده برای شهر یزد بیشترین مقدار را دارد که برای کلکتورهای افقی $781/35$ ($\frac{W}{m^2}$) و برای کلکتورهایی با شیب 30 درجه 851 ($\frac{W}{m^2}$) می‌باشد. از طرف دیگر در زاویه‌ای حدود 30 درجه مقدار سالیانه تابش برای کلیه شهرها بیشترین مقدار را دارا است.



شکل 8- نمودار میانگین سالیانه توان الکتریکی تولید شده در شهر یزد برای کلکتورهایی با شیب متفاوت

میانگین سالیانه توان الکتریکی تولید شده برای سه نوع کلکتور در شهرهای مختلف ایران در شکل 10 نشان داده شده است. از شکل 8 بر می‌آید که میانگین سالیانه توان الکتریکی تولید شده برای کلکتورهای 30 درجه کمترین مقدار و برای 60 درجه بیشترین مقدار را دارد. از طرف دیگر، چون شهر یزد بیشترین تابش سالیانه را دریافت می‌کند پس میانگین سالیانه توان الکتریکی تولید شده‌ی آن بیشتر است.

- [5] Zhou XP, Wang F, Fan J, Ochieng RM (2010) Performance of solar chimney power plant in Qinghai-Tibet Plateau. *Renew Sust Energy Rev* 14: 2249-55.
- [6] Asnaghi A, Ladjevardi SM (2012) Solar chimney power plant performance in Iran. *Renew Sust Energy Rev* 16: 3383-3390.
- [7] Cao F, Zhao L, Li H, Guo H (2013) Performance analysis of conventional and sloped solar chimney power plants in China. *Appl Therm Eng* 50: 582-592.
- [8] Duffie JA, Beckman WA (1991) *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley Interscience, New York.
- [9] بهادری نژاد م، میر حسینی س ع (1382) ضریب صافی هوا برای شهرهای ایران. مجموعه مقالات سومین همایش بهینه سازی مصرف سوخت در ساختمان: 603-611.
- [10] Muneer T (2004) *Solar Radiation and Daylight Models*, Elsevier, Oxford.
- [11] Bilgen E, Rheault J (2005) Solar chimney power plants for high latitudes. *Solar Energy* 79 (2005) 449-45
- [12] Yang SM, Tao WQ (2006) *Heat Transfer*. fourth ed., Higher Education Press, Beijing.
- [13] Sangi R (2012) Performance evaluation of solar chimney power plants in Iran. *Renew Sust Energy Rev* 16: 704-710.
- [14] Haaf W, Friedrich G, Mayr G, Schlaich J (1983) Solar chimneys, part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares. *Int J Solar Energy* 2: 320.
- [15] Dos MA, Bernardes S, von Backstrom TW, Kroger DG (2009) Analysis of some available heat transfer coefficients applicable to solar chimney power plant collectors. *Solar Energy* 83: 264-275.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی معمولی و شیب‌دار در مناطق مختلف ایران پرداخته شده است. برای انجام این کار از مدل‌های ریاضی مناسب برای محاسبه میزان تشعشع خورشید، عملکرد حرارتی کلکتور و دودکش استفاده شده است. معادلات حاکم به صورت عددی و برای مناطق مختلف ایران حل شده‌اند. نتایج عددی مختلف برای ماه‌های سال و در اقلیم‌های مختلف در قالب نمودارهایی ارائه شده و نتایج برای شهرهای مختلف مقایسه شده‌اند. از طرف دیگر، برای هر کدام از شهرها، زاویه بهینه کلکتور برای ماکزیمم نمودن توان خروجی سالانه به دست آمده است. نتایج زاویه بهینه برای تمام شهرهای بررسی شده در حدود 60 درجه می‌باشد. در نهایت مشاهده شده که از میان تمام شهرهای بررسی شده، شهر یزد بهترین عملکرد حرارتی را ارائه می‌دهد.

مراجع

- [1] Kroger DG, Buys JD (2001) Performance evaluation of a solar chimney power plant. *Proc ISES 2001 Solar World Congress*: 907-918.
- [2] Dai YJ, Huang HB, Wang RZ (2003) Case study of solar chimney power plants in Northwestern regions of China. *Renew Energy* 28: 1295-304.
- [3] Nizetic S, Ninic N, Klarin B (2008) Analysis and feasibility of implementing solar chimney power plants in the Mediterranean region. *Energy* (33): 1680-1690.
- [4] Larbi S, Bouhdjar A, Chergui T (2010) Performance analysis of a solar chimney power plant in the southwestern region of Algeria. *Renew Sust Ener Rev* 14(1): 470-477.