Available online at www.ejournals.uofk.edu
UofKEJ Vol.3 Issue 2 pp. 69-76((August -2013)

UNIVERSITY OF KHARTOUM ENGINEERING JOURNAL (UoFKEJ)

كمية الطاقة الشمسية الساقطة على سطح

محمد علي حمد عباس

قسم الهندسه الكهربائية والالكترونية، كلية الهندسه, جامعة الخرطوم
الخرطوم, السودان (البريد الإلكتروني: mabbas@uofk.edu)

المستخلص: جرت في هذا التقرير محاولة لحساب كمية الطاقة الشمسية التي تسقط على سطح موضوع على الأرض في مدينة الخرطوم. بنيت حسابات كمية الطاقة على افتراض أن كمية الطاقة الواصلة عمودياً لسطح الأرض في مدينة الخرطوم تساوي حوالي 1000 واط على المتر المربع أي أقل من 70% من تلك الساقطة على تخوم الجو (1367واط/م م) وذلك قبل دخولها جو الأرض وتعرضها للامتصاص بمكوناته، وهي نسبة معقولة في حالة الظروف العادية عندما تكون السماء صافية خالية من الغبار والسحب. كذلك افترض أن توهين الجو يتناسب خطياً فقط مع كمية الهواء التي تمر بها أشعة الشمس وهذا الافتراض يعطي معامل توهين تقريبياً. وجد أن زاوية ميل السطح المائل التي تحقق تجميع أقصى كمية طاقة على هذا السطح تساوي تقريباً درجة خط عرض مدينة الخرطوم وهذا يتوافق ما هو متوقع. تم تحويل التكامل في المعادلة (17) إلى تجميع في المعادلة (18) ليسهل عملية الحساب إلا أن ذلك يؤثر على دقة الحساب. وجد أن الطاقة الشمسية الساقطة في العام على المتر المربع، في الخرطوم عند خط عرض 15.6 درجة شمال، تساوي حوالي 2275 كيلوواط – ساعة تحت الظروف العادية، أي بمتوسط يومي يساوي 6.23 كيلوواط – ساعة، وهي أقصى قيمة ويُتَحصل عليها عند زاوية ميل α تساوي تقريباً درجة خط عرض الخرطوم. يلاحظ أن مساحة مقدارها واحد كلم مربع يمكن أن توفر طاقة بمعدل يساوي ما توفره محطة توليد كهرباء سعتها حوالي 25 ميجاواط تعمل 24 ساعة يومياً وذلك بافتراض أن كفاءة تحويل الطاقة الشمسية إلى الطاقة الكهربائية تساوي حوالي 16%.

الكلمات المفتاحيه : *الطاقة الشمسية, الامتصاص الجوى, الخلايا الضوئية, توليد الطاقة.*

1. المقدمة

الطاقة الشمسية نعمة عظيمة أتاحها الله لعباده للانتفاع بها، خاصة الذين يقطنون البلاد الواقعة بين المدارين مثل السودان. ظل الناس يستفيدون من الطاقة الشمسية على الطبيعة دون تدخل منهم لقرون عديدة. أما في العقود الأخيرة فبدأ الناس يبتكرون وسائل وحيل للاستفادة من الطاقة الشمسية بطرق جديدة بالإضافة لما كان متاحاً طبيعياً مستفيدين من التقدم التقني الذي انتظم العالم. ويبرز موضوع الاستغلال الكفؤ للطاقة الشمسية كشئ بديهي لتعظيم الفائدة من المجهودات المبذولة في هذا المجال. يسهم هذا التقرير في الاهتمام بالطرق التحليلية التي تساعد على تحقيق ذلك الهدف.
في هذا التقرير عرض لطريقة حساب كمية الطاقة المجمعة في العام ومتوسط الطاقة المجمعة في اليوم الواحد في كل متر مربع علىسطح وضع مائلاً للتمكنمن التقاط (تجميع) أقصى كمية طاقة شمسية في العام في موقع ما عند خط عرض معين في النصف الشمالي من الكرة الأرضية.

2. زاوية ميل الشمس

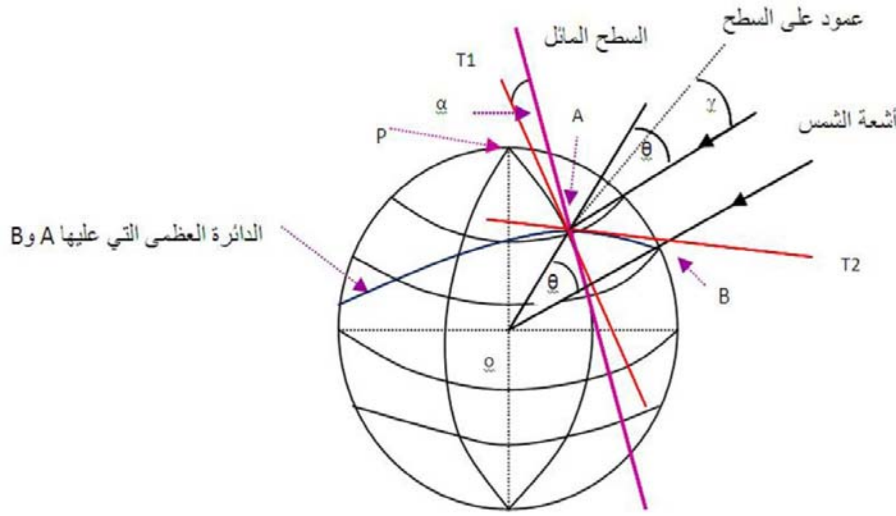
أنظر الشكل (1) الذي به سطح مستوٍ موضوع مائلاً فوق السطح الأفقي بزاوية ميل α من ناحية الشمال الجغرافي، وتسقط عليه أشعة الشمس مكونة زاوية مع المتعامد على السطح المائل تساوي γ وهي تختلف عن θ حيث θ هي الزاوية التي تكونها أشعة الشمس مع المتعامد على السطح الأفقي. إذا كانت مساحة السطح الحقيقية واحد متر مربع فإن المساحة المتعامدة مع أشعة الشمس تكون$\cos(\gamma)$، وهي المساحة المحددة لكمية الطاقة الشمسية الساقطة على السطح، أنظر الشكل(1).

يمكن حساب الزاوية γ من الضرب المقداري لمتجهتين بقيمة الوحدة إحداهما موازية لأشعة الشمس والأخرى موازية للمتعامد على السطح المائل. وبما أن أشعة الشمس متعامدة على النقطة B فإن المتجهة الموازية لأشعة الشمس تعطى بالمعادلة (1).

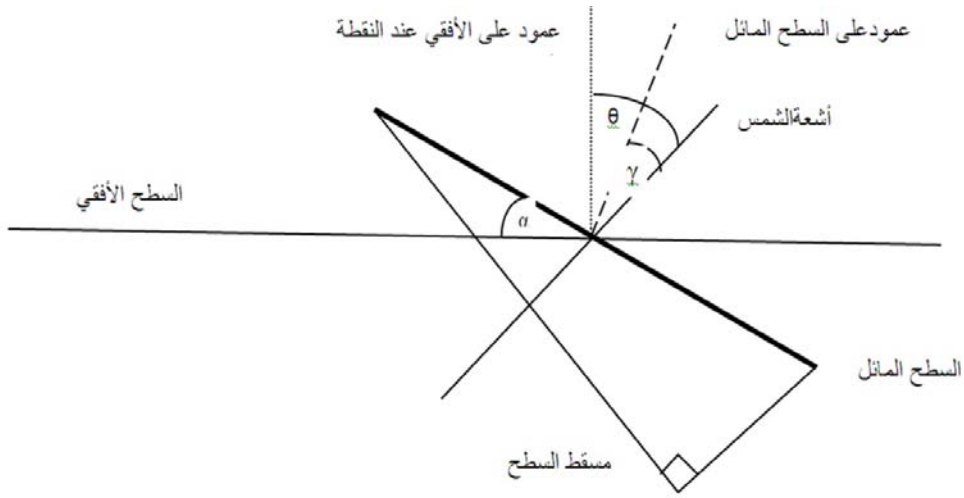
$$\vec{u}_B = \cos B.\cos L_B.\vec{i} + \cos B.\sin L_B.\vec{j} + \sin B.\vec{k} \ldots \quad (1)$$

حيث B هي درجة خط العرض و L_B هي درجة خط الطول للنقطة B.وأما المتجهة الأخرى الموازية للمتعامد عند النقطة A على السطح المائل بزاوية α فوق الأفقي من ناحية الشمال الجغرافي (أنظر الشكل (2) فتعطى بالمعادلة (2).

$$\vec{n} = \cos(A-\alpha).\cos L_A.\vec{i} + \cos(A-\alpha).\sin L_A.\vec{j} + \sin(A-\alpha).\vec{k} \ldots \quad (2)$$



الشكل 1. أشعة الشمس متعامدة على النقطة B عند خط عرض B درجة شمال وخط طول L_B درجة شرق وتسقط على النقطة A عند خط عرض A درجة شمال وخط طول L_A درجة شرق مكونة زاوية مقدارها θ مع المتعامد على السطح الأفقي وزاوية مقدارها γ مع المتعامد على سطح مائل بزاوية α فوق السطح الأفقي من ناحية الشمال الجغرافي.AT_1 و AT_2 خطا تماس عند النقطة A مع دائرة خط الطول L_A ومع الدائرة العظمى التي تقع عليها A وB.



شكل 2. السطح المائل بزاوية مع الافقى فى ناحية الشمال الجغرافى

حيث A هي درجة خط العرض و LA هي درجة خط الطول للنقطة A. باستخدام علاقة الضرب المقداري يتحصل على $\cos(\gamma)$ من المعادلة (3):

$$\cos(\gamma) = \sin(A-\alpha).\sin B + \cos(A-\alpha).\cos B.\cos(L_B - L_A) \quad (3)$$

يلاحظ أنه من الممكن الحصول على زاوية أشعة الشمس مع المتعامد على الأفقي عند النقطة A بجعل α صفراً في (3) لنحصل على $\cos(\theta)$ كما في (4).

$$\cos(\theta) = \sin A.\sin B + \cos A.\cos B.\cos(L_B - L_A) \ldots \quad (4)$$

3. إتجاه النقطة B من النقطة A

عندما يكون ضرورياً التوجيه المستمر نحو الشمس، بالإضافة لزاوية ميل الشمس نحتاج لتحديد اتجاه النقطة B التي تتعامد على خط عرضها الشمس من النقطة A. وللحصول على اتجاه النقطة B من النقطة A الذي تمثله الزاوية الأفقية T1AT2 عند A محسوبة من اتجاه الشمال، نعرف متجهتين بقيمة الوحدةمتعامدتين على السطحين AOT1 و BOT2 باستخدام الضرب الاتجاهي لمتجهتين بقيمة الوحدة في كل حالة، ثم يتحصل على الزاوية بين المتجهتين المتعامدتين على السطحين بضربهما ضرباً مقدارياً. وتستخدم الزاوية الناتجة للحصول على الزاوية الأفقية T1AT2 كما موضح في الفقرة التالية. في حالة السطح AOT1 نستخدم متجهتين إحداهما توازي OP والأخرى توازي OA وبينهما زاوية تساوي $(0.5\pi\text{-}A)$ وحاصل ضربهما الاتجاهي مقداره يساوي $\sin(0.5\pi\text{-}A)$ ولذا نحصل على المتجهة بقيمة الوحدة في (5).

$$\vec{n}_1 = \frac{1}{\sin(0.5\pi - A)}\left(0.\vec{i} + 0.\vec{j} + 1.\vec{k}\right) \times \left(\cos A.\cos L_A.\vec{i} + \cos A.\sin L_A.\vec{j} + \sin A.\vec{k}\right) = -\sin L_A.\vec{i} + \cos L_A.\vec{j} \ldots \quad (5)$$

في حالة السطح BOT_2 نستخدم متجهتين إحداهما توازي OA والأخرى توازي OB وبينهما زاوية تساوي θ وحاصل ضربهما الاتجاهي يساوي $\sin(\theta)$ ولذا نحصل على المتجهة في (6).

$$\vec{n}_2 = \frac{1}{\sin(\theta)}\left(\cos A.\cos L_A.\vec{i} + \cos A.\sin L_A.\vec{j} + \sin A.\vec{k}\right) \times \left(\cos B.\cos L_B.\vec{i} + \cos B.\sin L_B.\vec{j} + \sin B.\vec{k}\right)$$
$$= \frac{1}{\sin(\theta)}\{(\cos A.\sin B.\sin L_A - \sin A.\cos B.\sin L_B).\vec{i} - (\cos A.\sin B.\cos L_A - \sin A.\cos B.\cos L_B).\vec{j} + \cos A.\cos B.\sin(L_B - L_A).\vec{k}\} \ldots \quad (6)$$

إذا رمزنا للزاوية المحصورة بين هاتين المتجهتين (5) و(6) بالحرفφ نحصل (7).

$$\varphi = \cos^{-1}\left\{\frac{-\cos A.\sin B + \sin A.\cos B.\cos(L_B - L_A)}{\sin(\theta)}\right\} \ldots \quad (7)$$

ويكون اتجاه النقطة B من النقطة A (أي الزاوية الأفقية T1AT2) مساوياً φ في حالة وقوع خط طول النقطة B شرق خط طول النقطة A وخط عرض النقطة B شمال خط عرض النقطة A ، ويكون الاتجاه$(\pi\text{-}\varphi)$ في حالة وقوع خط طول النقطة B شرق خط طول النقطة A وخط عرض النقطة B جنوب خط عرض النقطة A ، ويكون الاتجاه$(\pi+\varphi)$ في حالة وقوع خط طول النقطة B غرب خط طول النقطة A وخط عرض النقطة B جنوب خط عرض النقطة A ، ويكون الاتجاه$(2\pi\text{-}\varphi)$ في حالة وقوع خط طول النقطة B غرب خط طول النقطة A وخط عرض النقطة B شمال خط عرض النقطة A.

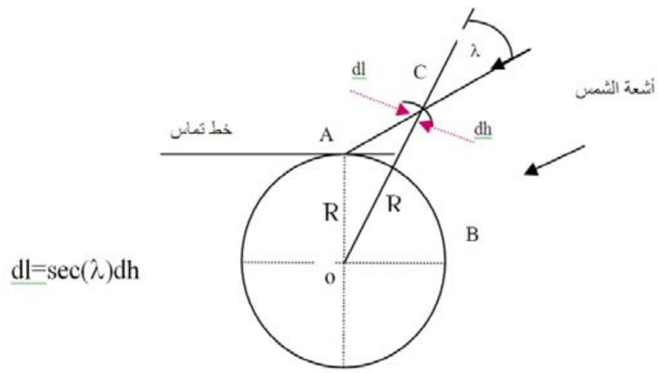
4. الطاقة الشمسية الساقطة على السطح

يلاحظ أن أشعة الشمس تسقط على النقطة A مكونة زاوية مقدارها θ مع المتعامد على السطح الأفقي وزاوية مقدارها γ مع المتعامد على السطح المائل بزاوية α فوق السطح الأفقي من ناحية الشمال الجغرافي. بذا يكون مسقط مساحة السطح المائل حسب قيمة زاوية ميل أشعة الشمس هو$\cos(\gamma)$.

وإذا كانت الطاقة الشمسية الساقطة عمودياً على الأرض خارج نطاق الجو على سطح مساحته متر مربع تساوي So واط (So=1367W/m2) [1]، وهو ما يعرف بالثابت الشمسي، فإن الطاقة (واط ـ دقيقة) الساقطة على الأرض على السطح المائل عند النقطة A بعد اختراق الجو في يوم ما تعتمد على درجة خط العرض B التي تتعامد عليها الشمس في ذلك اليوم وتعطى بالمعادلة (8).

$$E(B) = \int_0^T S_o L^{-1}(t)\cos\gamma(t)\,dt = 2\int_0^{T/2} L_o S L^{-1}(t)\cos\gamma(t)\,dt \ldots \quad (8)$$

حيث t هو الزمن بالدقيقة وt=0 هي لحظة شروق الشمس و t=T هي لحظة الغروب عند النقطة A. والمعامل L(t) يمثل التوهين الناتج عن امتصاص كتلة الهواء لجزء من طاقة الشمس ويعتمد



الشكل 3. تسقط أشعة الشمس على الأرض عند النقطة A بعد مرورها في الجو وتعرضها للتوهين نتيجة لامتصاصها بواسطة الغازات الموجودة به

على الزمن t وعلى وضع الشمس بالنسبة للنقطة A، أنظر الشكل(3). تم تعويض L_oS بدلاً عن S_o حيث S الطاقة الشمسية الساقطة عمودياً على الأرض على سطح مساحته متر مربع والمعامل L_o يمثل التوهين الناتج عن امتصاص كتلة الهواء لجزء من طاقة الشمس في حالة سقوطها عمودياً. تم افتراض إمكانية تجاهل أثر تغير خط العرض الذي تتعامد عليه الشمس خلال اليوم الواحد.

بتطبيق قاعدة جيب الزوايا على المثلث OAC في الشكل (3) نحصل على (9).

$$\frac{\sin(\lambda)}{R} = \frac{\sin(\pi-\theta)}{R+h} = \frac{\sin(\theta)}{R+h} \dots \qquad (9)$$

وإذا افترضنا اعتماداً خطياً للتوهين على كتلة الهواء التي تمر خلالها أشعة الشمس، فمن الممكن التعبير عن L بالعلاقة الموضحة في (10) باعتماد تغير أسي لكثافة الهواء مع الارتفاع h بالكيلومترمن سطح الأرض.

$$L(t) = \int_0^H K\rho_o \exp(-\beta h)\, dh/\cos(\lambda) = \int_0^H \frac{K\left(1+\frac{h}{R}\right)\rho_o \exp(-\beta h)\, dh}{\sqrt{\cos^2(\theta)+2\frac{h}{R}+\left(\frac{h}{R}\right)^2}} \qquad (10)$$

حيث H تمثل سمك الغلاف الجوي بالكيلومتر و ρ_o تمثل كثافة الهواء على سطح الأرض و K معامل تناسب التوهين مع كتلة الهواء في متر مكعب. والمعامل β يساوي $0.1225 km^{-1}$ تقريباً[2]. ويمكن نسبة معامل التوهين L لقيمته L_o في حالة التعامد ($\lambda=0$) وهي:

$$L_o = \int_0^H \frac{K\left(1+\frac{h}{R}\right)\rho_o \exp(-\beta h)\, dh}{\sqrt{1+2\frac{h}{R}+\left(\frac{h}{R}\right)^2}} = \int_0^H K\rho_o \exp(-\beta h)\, dh = \frac{K\rho_o}{\beta}\{1-\exp(-\beta H)\} \dots \qquad (11)$$

وبتعويض (10) و(11) تكون هذه النسبة كما في (12).

$$\left[\frac{L(t)}{L_o}\right]^{-1} = \left\{\frac{\beta R}{\{1-\exp(-\beta H)\}}\int_0^{\frac{H}{R}} \frac{(1+x)\exp(-\beta R x)\, dx}{\sqrt{\cos^2(\theta)+2x+x^2}}\right\}^{-1} \dots \qquad (12)$$

عند الشروق عند النقطة A تكون الزاوية θ مساوية 0.5π وتكون الشمس متعامدة على B عند درجة خط طول تساوي L_{BR}. من (4) نحصل على

$$L_{BR} = L_A + \cos^{-1}[-\tan A.\tan B] \dots \quad (13)$$

ويكون الزمن t عند النقطة A محسوباً بالدقيقة من لحظة الشروق بدلالة خط الطول L_B الذي تتعامد عليه الشمس كما في (14):

$$t = 4(L_{BR}-L_B) = 4\{\cos^{-1}[-\tan A.\tan B] - [L_B - L_A]\} \dots \qquad (14)$$

وبتعويض $dt=-4dL_B$ في (8) نحصل على الطاقة بالواط - دقيقة

$$E(B) = 8\int_{L_A}^{L_{BR}} S_o L^{-1}(L_B) cos\gamma(L_B) dL_B \dots \quad (15)$$

وبتعويض L(t) من (10) نحصل على (16).

$$E(B) = 8\int_{L_A}^{L_{BR}} S_o cos\gamma(L_B) dL_B \left\{ \int_0^{\frac{H}{R}} \frac{KR(1+x)\rho_o \exp(-\beta Rx)\, dx}{\sqrt{sin^2\theta(L_B) + 2x + (x)^2}} \right\}^{-1} \quad (16)$$

يمكن تعويض SL_o بدلاً عن S_oفي (16) وبتعويض النسبة (12) نحصل على(17)

$$E(B) = 8\int_{L_A}^{L_{BR}} S cos\gamma(L_B) dL_B \left\{ \frac{\beta R}{\{1-\exp(-\beta H)\}} \int_0^{\frac{H}{R}} \frac{(1+x)\rho_o \exp(-\beta Rx)\, dx}{\sqrt{sin^2\theta(L_B) + 2x + (x)^2}} \right\}^{-1} \quad (17)$$

بعد إجراء التكامل في (17) نحصل على E بدلالة درجة خط العرض B التي تتعامد عليها الشمس في يوم ما. كما يمكن الحصول على قيمة النسبة L/L_o لمختلف قيم الزاوية θ بإجراء التكامل عددياً ثم تمثيل الناتج بدالة(θ)L تعطي هذه النسبة بدلالة الزاوية θ كما يمكن استخدام التجميع بدلاً عن التكامل كما في (18) .

$$E(B) = 8\sum_{L_B=L_A}^{L_{BR}} \frac{S cos\gamma(L_B)}{L[\theta(L_B)]}, \quad W - \min \dots \ (18)$$

وتعطى الدالة(θ)L بالمعادلة (19) وهي موضحة في الشكل(4).

$$L(\theta) = \frac{1}{1-\left(\frac{\theta}{91.5}\right)^{4.5}}, \quad 0 \le \theta \le 90 \text{ deg} \quad (19)$$

تعوض في المعادلة(19) قيم الزاوية θ بالدرجات.

تعطى العلاقة (20) درجة خط العرضB(شمال) التي تتعامد عليها الشمس حسب يوم السنة [3]،

$$B(D) \cong \frac{22.5\pi}{180} \cos\left\{\frac{2\pi}{365}(D-172)\right\} \dots \quad (20)$$

بذا نحصل على كمية الطاقة الشمسية الساقطة في العام على السطح المائل (مساحة 1 متر مربع) عند النقطة A من (21) و (20) و(18).

$$E_Y = \sum_{D=1}^{365} E\{B(D)\} \dots W - \min \dots \quad (21)$$

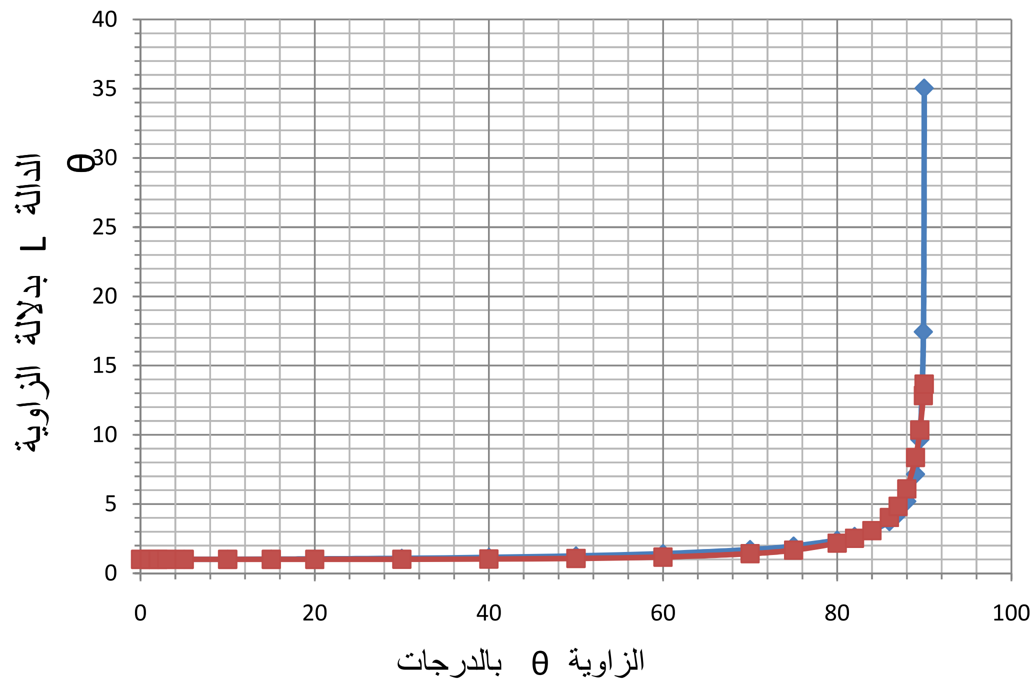
تم استخدام برنامج إكسيل لحساب كمية الطاقة من المعادلة (21) بافتراض أن كمية الطاقة الواصلة عمودياً لسطح الأرض تساوي حوالي 1000 واط على المتر المربع (أقل من 70% من تلك الساقطة على تخوم الجو(1367واط/م م).وبذا تساوي الطاقة الساقطة في العام على المتر المربع، في الخرطوم عند خط عرض 15.6 درجة شمال، حوالي 2275 كيلوواط – ساعة تحت الظروف العادية، أي بمتوسط يومي يساوي 6.23 كيلوواط – ساعة، وهي أقصى قيمة ونحصل عليها عند زاوية ميل α تساوي حوالي17 درجة، أنظر الشكل (5).

5. نظم توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية بالخلايا الضوئية

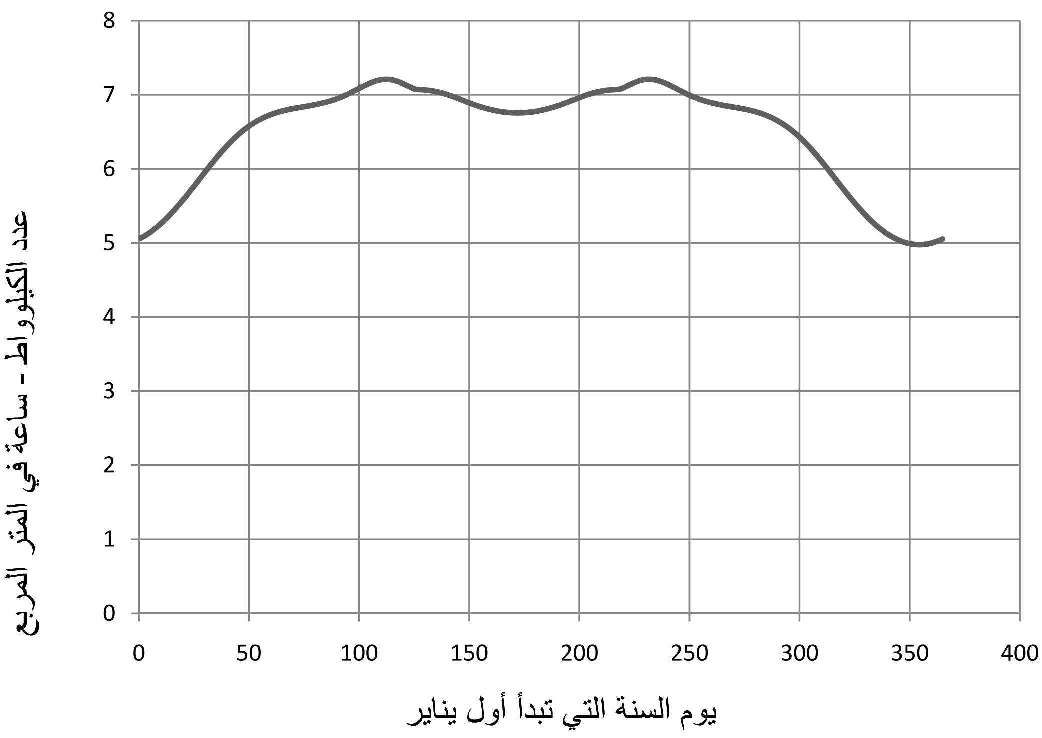
تستخدم نظم توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية بالخلايا الضوئية غير الموصولة بشبكة الإمداد الكهربائي العام (Off-Grid Systems) في البلدان النامية للأغراض المنزلية وغير المنزلية وهي نظم مستقلة غير موصولة بشبكة الامداد العام وعادة تستخدم في المناطق الريفية والنائية في المنازل وفي الزراعة وقد تستخدم في أغراض صناعية أو تجارية مثل شبكات الاتصالات وفي بعض الحالات تكون بها إمكانية تخزين الطاقة الكهربائية للاستخدام في حالات انعدام الضوء وهي ذات سعة محدودة حوالي 1 كيلوواط أوأقل. كما انتشر في البلدان المتقدمة استخدام نظم توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية الموصولة بشبكات الامداد العام (Grid-Connected Systems) وهي نوعان:

النظم الموزعة (Distributed):

وهي نظم توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية بسعات منخفضة ويتم وصلها بالشبكة بواسطة محول تيار مباشر إلى تيار متناوب مناسب وعادة تكون لوحاتها موضوعة على أسقف وأسطح (واجهات) البنايات أو في فناء قريب من البناية وتستخدم بواسطة الأفراد في منازلهم والشركات.



الشكل4. الدالة L بدلالة الزاوية θ. أضيفت في الشكل الدالة(المربعات) التي تقرب المنحنى الأصل



الشكل5. متوسط الطاقة الشمسية الساقطة يومياً في الخرطوم على المتر المربع على سطح مائل إلى أعلى من ناحية الشمال بزاوية ميل تساوي 17 درجة.

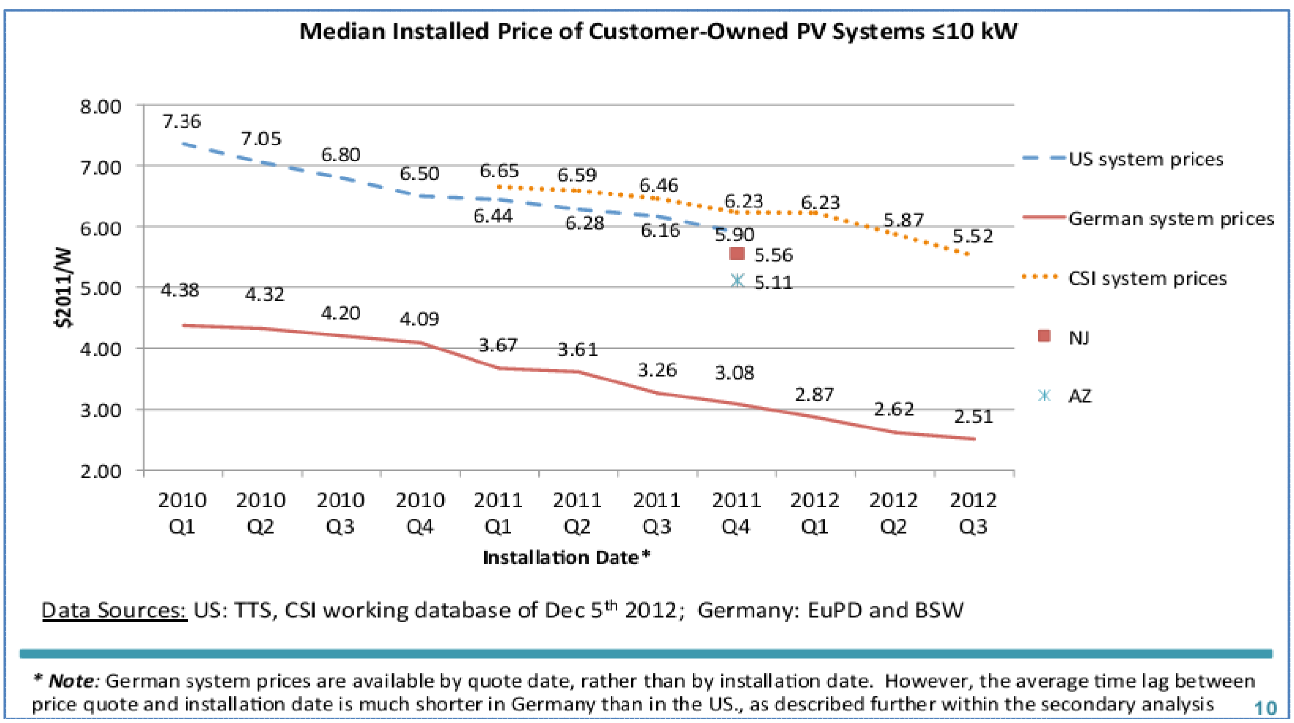
وتشجع كثير من دول العالم (فوق السبعين دولة، بما في ذلك ألمانيا والصين وأمريكا)، مواطنيها والشركات العاملة بها على استخدام الطاقة الشمسية لتوفير حاجتها من الطاقة الكهربائية، وذلك بشراء وتركيب نظم توليد الطاقة الكهربائية بالخلايا الضوئية على سطوح المنازل والبنايات أو على ساحات مجاورة، وربطها بشبكة الامداد الكهربائي العام على أن يكون النظام من حيث الأجهزة والتصميم مبنياً على المواصفات القياسية المحددة بتلك الدولة. (Photovoltaic Electric Power Generation System)

يمكن للمواطن بهذه الطريقة أن يستخدم الامداد الكهربائي العام ليلاً عندما تغيب الشمس ويستخدم الكهرباء التي ينتجها نظامه نهاراً من الطاقة الشمسية ويغذي الشبكة العامة بالفائض مقابل تعريفة تشجيعية يطلق عليها تعريفة التغذية الداخلة أي للشبكة (Feed-in-Tariff, FiT).

تطبق التعريفة التشجيعية على نظم التوليد ذات السعة المنخفضة (مثلاً في ألمانيا الأقل من 10 كيلوواط). وتمثل هذه السياسة حافزاً للمواطن لأن يقتني نظامه الخاص لتوليد الطاقة الكهربائية بالخلايا الضوئية لأن التعريفة التشجيعية تمكنه من استرداد كل أو جزء من تكلفته الرأسمالية في وقت قصير نسبياً. يلاحظ أن السعة الكلية لهذه النظم بلغت حوالي 39 جيجاواط في ألمانيا في نهاية العام 2012م. يعني ذلك أن ألمانية قطعت شوطاً كبيراً في انتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية بتشجيع مواطنيها باقتناء نظم طاقة شمسية لتوليد احتياجاتهم من الطاقة الكهربائية بالخلايا الضوئية ودفع الفائض في الشبكة وذلك بانتهاج سياسة التعريفة التشجيعية. من الملاحظ أن كلفة الكيلوواط-ساعة في ألمانيا في العام 2012م كانت حوالي 26 سنتاً أمريكياً كما أن الكلفة الرأسمالية لاقتناء نظام طاقة شمسية وتركيبه حوالي 2510 دولار مقابل كل كيلوواط.

ويشهد استخدام نظم توليد الطاقة الكهربائية بالخلايا الضوئية انتشاراً واسعاً عالمياً مما سيؤدي إلى انخفاض التكلفة الرأسمالية كثيراً. مثلاً كانت هذه الكلفة في ألمانيا في الربع الرابع من 2011م حوالي 3.0 دولار/واط في حالة نظم التوليد ذات السعة المنخفضة، منها 1.82 دولار تمثل سعر اللوحة والباقي يقابل ما يعرف بموازنة النظام (Balance of System, BoS) التي تمثل كلفة المحول (0.33 دولار) وبقية العتاد الصلد مثل البنية التحتية التي تركب عليها الألواح وكوابل التوصيل (0.23 دولار) وكلفة التصميم والتركيب ورسوم فحص النظام المركب، ورسوم الترخيص وغيرها (0.62 دلار). ولكن هذه الكلفة انخفضت إلى 2.51 دولار في الربع الثالث من 2012م ومرشحة للانخفاض مع مرور الأيام، أنظر الشكل(6) الذي يقارن بين الكلفة في ألمانيا والولايات المتحدة الأمريكية [4].

من المتوقع أن تكون الكلفة المقابلة في السودان أقل من ذلك بحوالي 10% أي حوالي 2.25 دولار/واط إذا فرض أن كلفة العمالة في السودان تساوي 50% من كلفة العمالة في ألمانيا. من المتوقع أن تكون الكلفة اليوم أقل من 2 دولار/واط في ألمانيا وأقل من 1.8 دولار في السودان، ونلاحظ أيضاً أن متوسط المورد الشمسي في أوروبا حوالي 1500 كيلوواط-ساعة/السنة في حين أنه في الخرطوم حوالي 2275 كيلوواط-ساعة/السنة، مما يساعد على تقليل فترة استرداد كلفة النظام في حالة الخرطوم بالمقارنة مع ألمانيا. ونلاحظ أيضاً أن كلفة اللوحات المصنعة في الصين حوالي 1 دولار/واط في بداية العام 2012م. على الرغم من ذلك تظل الكلفة عالية ولكن من المتوقع أن تصير هذه النظم مجدية في المدى القصير.



الشكل 6. السعر الوسيط لنظام خلايا ضوئية منزلي مركب (≤10كيلوواط) [4].

النظم المركزة (Centralised):

وهي نظم توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية بسعات كبيرة تساوي مئات الكيلوواط وعشرات بل مئات الميجاواط. وهي شبيهة بمحطات توليد الكهرباء وتكون عادة على سطح الأرض خارج المدن. وتشجع الدول الكبرى الشركات للاستثمار في هذه المجال مع حوافز ضخمة مثل المساهمة في رأس المال بنسب عالية والإعفاء من الضرائب لفترة من الزمن وغير ذلك من المحفزات. تتصدر الولايات المتحدة مجال النظم الكبيرة وتوجد محطات توليد بسعات كبيرة تزيد عن المائة ميجاواط في مناطق كاليفورنيا وتكساس وأريزونا وغيرها, كما يخطط لمحطات بمئات الميجاواط. وفي هذه الحالة تساعد اقتصاديات الحجم الكبير على تخفيض الكلفة.

يمكن للسودان أن يخطط للاستثمار في هذا المجال في السنوات المقبلة ووضع خطة لذلك بالاستفادة من تجارب الآخرين, فالسودان يتمتع بمورد شمسي كبير في أجزائه المختلفة. بل يمكن العمل في المسارين معاً أي على المستوى المنزلي بتشجيع المواطنين على اقتناء نظم طاقة شمسية بالمواصفات القياسية وربطها بالشبكة (مع اعتماد سياسة التعريفة التشجيعية) وعلى المستوى الاستثماري بتشجيع شركات توليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية لمقابلة الأحمال الإضافية أثناء اليوم بدلاً عن التربينات الغازية أو حتى التربينات البخارية.

6. الخاتمة

بنيت حسابات كمية الطاقة على افتراض أن كمية الطاقة الواصلة عمودياً لسطح الأرض في مدينة الخرطوم تساوي حوالي 1000 واط على المتر المربع أي أقل من 70% من تلك الساقطة على تخوم الجو (1367واط/م م)، وهي نسبة معقولة في حالة الظروف العادية عندما تكون السماء صافية خالية من الغبار والسحب.

كذلك افتراض توهين الجو متناسباً خطياً فقط مع كمية الهواء التي تمر بها أشعة الشمس يعطي معامل توهين تقريبياً.

يلاحظ أن زاوية ميل السطح المائل التي تحقق تجميع أقصى كمية طاقة على هذا السطح تساوي تقريباً درجة خط عرض مدينة الخرطوم.

تحويل التكامل في المعادلة (17) إلى تجميع في المعادلة (18) يسهل عملية الحساب إلا أن ذلك يؤثر على دقة الحساب.

يلاحظ أن مساحة مقدارها واحد كلم مربع يمكن أن توفر طاقة بمعدل يساوي ما توفره محطة توليد كهرباء سعتها 25 ميجاواط تعمل 24 ساعة يومياً وذلك بافتراض أن كفاءة تحويل الطاقة الشمسية إلى الطاقة الكهربائية تساوي حوالي 16%.

المراجع

[1] Fröhlich, C., and R. W. Brusa (1981), Solar Radiation and its Variation in Time, *Solar Physics*, vol. 74, Nov. 1981, p. 209-215.

[2] http://acmg.seas.harvard.edu/people/faculty/djj/book/bookchap2.html(accessed on 1st Nov 2012)

[3] *The Astronomical Almanac for the Year 1981*, issued by the Nautical Almanac Office of the United States Naval Observatory

[4] Joachim Seel, Galen Barbose, and Ryan Wiser, *Why Are Residential PVPrices in Germany So Much Lower Than in the United States? A Scoping Analysis*, Lawrence Berkeley National Laboratory, February 2013 Revision