

تأثير ميل وسمت حاجز مسطح على مساحة ظله المتشكل على سطح أفقي

الدكتور سليمان سليمان *

الدكتور حبيب محمود **

آصف ملحم ***

(قبل للنشر في 2004/4/6)

□ الملخص □

انطلاقاً من العلاقات الواصفة لحركة الشمس الظاهرية والمحددة لتبعية شعاع موضع الشمس للزمن تم تحديد مساحة ظل حاجز مستطيل الشكل تبعاً لطوله وعرضه ولميله على الأفق ولتوجيهه بالنسبة للجنوب وحركة هذا الظل على مدار اليوم. ونظراً للدور الهام الذي تلعبه زاوية ميل شعاع موضع الشمس بالنسبة لدائرة الاستواء تم قياس هذه الزاوية على مدار العام 2002 وأوجدت العلاقة الناظمة لتغيرها من يومٍ لآخر. وقورنت النتائج التي تم الحصول عليها مع النتائج العائدة لباحثين آخرين. كما تم تصميم وتنفيذ نظام لقياس مساحة الظل وقورنت النتائج التجريبية بالنتائج النظرية الموافقة.

* أستاذ في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا - دمشق ص.ب 31983 سورية.

** مدرس في قسم هندسة القوى الميكانيكية-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة تشرين- اللاذقية - سورية.

*** قائم بالأعمال -في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا - دمشق - سورية.

Tilt and Azimuth Influence of a Planar Solar Barrier on the Area of Its Shadow on the Horizontal Plan

Dr. Soulayman Soulayman*
Dr. Habib Mahmoud**
Asaif Molhem***

(Accepted 6/4/2004)

□ ABSTRACT □

On the basis of relations describing the apparent solar motion and determining the position vector of the sun as a function of time, shading movement and shading area of a rectangular planar barrier have been determined in relation to its dimensions, tilt and azimuth angle all over the day. The angle of solar declination has been measured all over the year 2002 and a precise relationship is proposed for determining its daily variations. The obtained data have been compared with the results of other authors. Shading area has been measured also using an experimental equipment constructed for this purpose. Some experimental results are compared with the corresponding theoretical ones.

*Prof Of Physics At Higher Institute Of Applied Sciences And Technology, Damascus P.O. Box 31983, Syria.

**Lecturer At Mechanical Power Engineering Department, Faculty Of Mechanical And Electrical Engineering, Lattakia, Syria.

***Jobs Manager At Higher Institute Of Applied Sciences And Technology, Damascus P.O. Box 31983, Syria.

مقدمة:

لقد حظيت حركة ظل الحواجز في الشمس ومساحته باهتمام الإنسان منذ القديم. ولم تفقد هذه المسألة أهميتها لارتباطها المباشر بحياتنا اليومية من جهة وحساباتنا المتعلقة بالأحمال الطاقية (energy loads) وأساليب تغطيتها من جهة أخرى. ويتوجب حساب الظل الشمسي عند: التصميم الأمثل للنظم الحرارية المستكينة (passive solar systems)، والنظم الشمسية الفعالة (active solar systems) متعددة الصفوف، وتحديد الريح الطاقية الشمسي، والتصميم الداخلي للبناء (من وجهة نظر الإنارة)، وتوجيه الأبنية، وتحسين دقة الحسابات الحرارية. فمنذ الأربعينيات من القرن العشرين ركزت البحوث المتعلقة بالتظليل الشمسي في مجال الهندسة المعمارية على ثلاثة محاور رئيسة هي [1]:

- الخواص الحرارية والبصرية للزجاج الواقي من الشمس وأجهزة التظليل.
 - تأثير التظليل الشمسي على استخدام الطاقة والإنارة النهارية في الأبنية.
 - طرق الحساب التي تقيم أداء الأبنية المزودة بأجهزة تظليل شمسي أو بزجاج واقٍ من أشعة الشمس.
- فبالنسبة للمحور الأول نلاحظ أن عدداً كبيراً من الدراسات الهادفة للتحديد الكمي لنقص التدفق الحراري عبر النوافذ المزودة بمختلف أنواع أجهزة التظليل يعود إلى السبعينيات والثمانينات حيث أظهرت الدراسات أن أجهزة التظليل تؤثر بشكل محسوس على التدفق الحراري وخاصة عند النوافذ أحادية الطبقة الزجاجية. ويصل تخفيض الحمل الحراري وفقاً لمعظم الدراسات إلى أكثر من 25%. ومنذ نهاية الخمسينيات من القرن الماضي والباحثون يتقدمون بمحاولات لتعيين الخواص البصرية للظلال الشمسية. ولقد عبر عن هذه الخواص من خلال قيم معاملي النفاذية والانعكاسية أو من خلال معامل الكسب الحراري الشمسي أو من خلال معامل التظليل.
- أما بالنسبة للمحور الثاني فلقد بين عدد من الباحثين أن أجهزة التظليل تساهم في زيادة حمل التدفئة وتقليل حمل التكييف وكلما قلت الزيادة في حمل التدفئة وكبر التخفيض في حمل التكييف زاد الريح الطاقية في استخدام أجهزة التظليل. وهذا ما سعى إليه الباحثون في الثمانينات والتسعينات من القرن الماضي. بل ووجدت حلول تخفض من حمل التدفئة والتكييف معاً بأتمتة بعض نظم التظليل.
- أما بالنسبة للطرق الحسابية (المحور الثالث) فلقد طرحت، منذ بداية الثمانينات، برامج حاسوبية لتعيين الشكل الأمثل لجهاز التظليل الخارجي بالنسبة للشمس في حالة السماء الصافية كما طرحت برامج أخرى لحساب كمية الإشعاع الشمسي الداخل في البناء.

وفي مجال الاستخدامات المرتبطة بالنظم الشمسية الفعالة نلاحظ أن دراسة أداء النظم الشمسية الكبيرة المركبة في منطقة مكشوفة يمكن فيها إهمال التظليل الناجم عن حواجز خارجية لا يعفي من ضرورة أخذ تأثير التظليل الناجم عن بعض عناصر النظام على البعض الآخر. ويظهر هذا التأثير بشكل واضح عند تركيب اللواقط الشمسية على شكل صفوف خلف بعضها البعض. وكثيراً ما تقود شروط التطبيق إلى تركيب اللواقط الشمسية بهذا الشكل. ويعود ذلك إلى الحمل الطاقية الذي يجب تغطيته بالنظام الشمسي. فحالما تنتقل من النظم الشمسية الفردية إلى النظم الجماعية نصطدم بصغر المساحات المخصصة لترتيب النظام الشمسي وعندها لا بد من اللجوء إلى تركيب اللواقط على شكل صفوف. وبالتالي تظهر مسألة التظليل بكامل أبعادها. وينحصر أثر التظليل على المساحة المظلمة من اللواقط الشمسية في حال التحول الحراري للطاقة الشمسية. ويتعدى الأمر ذلك بكثير في حالة التحول الفوتوفولطائي لأن شدة التيار في هذه الحالة في أي فرع تسلسلي من فروع النظام الشمسي المستخدم، تتحدد

بقيمة أصغر شدة تيار يسري في الفرع المذكور وهذه الشدة تتناسب طردياً مع كمية الإشعاع الشمسي الوارد على أكثر عناصر الفرع تظليلاً مما يجعل تأثير التظليل كبيراً مقارنة مع التحول الحراري. وعلى كل حال تصبح مسألة التعيين الدقيق للمساحة المظللة من اللواقط ملحة عند دراسة سبل تغطية الحمل الطاقوي للمنشأة.

وهكذا يصطدم الباحثون بمفهوم جديد مناسب لدراسة هذه المسألة اتفق على تسميته بمعامل التظليل (shading factor). ويعبر هذا المعامل عن نسبة المساحة المظللة في صف اللواقط إلى مساحتها الكلية في ذلك الصف. وتبعاً لطول الفترة التي يدرس فيها هذا المعامل يجري الحصول على قيم لحظية (instantaneous shading factor) ووسطية يومية (daily-averaged shading factor) ووسطية شهرية (monthly-averaged shading factor) ووسطية سنوية (yearly-averaged shading factor). وهنا يتقن الباحثون في أساليب حسابه فنرى بعضهم [2] يستخدم هندسة ظل الأوتاد الشاقولية والمائلة لحساب معامل التظليل اللحظي للواقط متجهة نحو الجنوب. ويقترح بعضهم [3] عبارة لحساب القيمة الوسطية اليومية الشهرية لمعامل التظليل بالنسبة للواقط مسطحة شاقولية مظللة بشرفات. وأخذت هذه المسألة بعداً جديداً في [4] حيث حسبت القيم الوسطية اليومية والشهرية اليومية للظل المتشكل للشرفات على سطح مختلف الميل والسمت (azimuth angle). ولم تقتصر هذه الدراسات على تأثير التظليل على النظم الحرارية بل حظيت النظم الفوتوفولطائية بنفس القدر من الاهتمام (انظر على سبيل المثال [5]).

وبقيت مسألة التظليل مقتصرة عملياً على اللواقط الشمسية المتجهة نحو الجنوب (انظر على سبيل المثال [6-8]). إضافة لما سبق، ووفقاً للمراجع المتوفرة لدينا، تتسم معظم الدراسات المتعلقة بموضوع التظليل بشكل عام (انظر على سبيل المثال [9-12]) أو موضوع التظليل في تطبيقات محددة (انظر إضافة لما سبق [13,14])، بطابع نظري بحث عدا دراسة وحيدة [12] لجأ فيها الباحثون، بغية اختبار برنامجهم، إلى تصميم نموذج تمثيلي لبيت وأربع أشجار مصنوعة من الخشب بمقياس 1:33.3 واختبار هذا النموذج المخبري صغير الأبعاد بشكل محدود أيضاً.

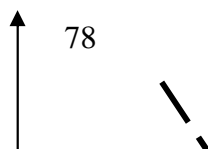
ويهدف بحثنا هذا إلى تطوير نموذج نظري يسمح بحساب مساحة الظل المتشكل لحاجز مستطيل الشكل ومختلف الميل والاتجاه مركب على سطح أفقي. وللتحقق من أداء هذا النموذج تم تصميم نظامين تجريبيين يسمح أحدهما بقياس مساحة الظل المتشكل للوح مستطيل الشكل طوله متر واحد وعرضه نصف متر (أي يماثل سطح لاقط شمسي صغير إلا أنه قابل للتطبيق والاستثمار عملياً) ويمكن الآخر من قياس زاوية ميل الشمس (solar declination angle) وفقاً للمنهجية المقترحة في [15]. ولقد حددت دقة النموذج المقترح بمقارنة نتائجه مع النتائج التجريبية.

النموذج النظري لحساب الظل

يبين الشكل (1) المخطط التمثيلي للنظام المدروس. وعندئذٍ، يعطى شعاع الواحدة المحمول على أشعة الشمس بالعلاقة:

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin w \cdot \cos d \\ \cos w \cdot \sin j \cdot \cos d - \cos j \cdot \sin d \\ - \cos w \cdot \cos j \cdot \cos d - \sin j \cdot \sin d \end{pmatrix} \quad (1)$$

الشاقول Z



الشرق x

B1

الشكل (1): المخطط التمثيلي لظل سطح يميل على الأفق بزاوية b وسمته g.

حيث w الزاوية الساعية (solar hour angle)، و d زاوية ميل شعاع موضع الشمس بالنسبة للدائرة الاستوائية (solar declination angle) و z زاوية خط عرض (latitude angle) الموقع المدروس. ويربط محاور جملة الإحداثيات بالشرق والشمال والشرق والشاقول كما هو مبين في الشكل (1)، يمكننا تحديد أشعة موضع رؤوس السطح المدروس بالعلاقات التالية (علماً أن أحد رؤوس السطح منطبق على مبدأ الإحداثيات):

$$\begin{matrix} \textcircled{O}A = b \\ \textcircled{O}C = a \\ \textcircled{O}B = \end{matrix} \begin{vmatrix} -\cos b \cdot \sin g \\ \cos b \cdot \cos g \\ \sin b \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} \cos g \\ \sin g \\ 0 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} -b \cos b \cdot \sin g + a \cos g \\ b \cos b \cdot \cos g + a \sin g \\ b \sin b \end{vmatrix}$$

حيث b زاوية ميل السطح عن الأفق (tilt angle) و g زاوية سمت السطح (azimuth angle)، و a عرض اللاقط و b طوله. وتتحدد إحداثيات النقطة $A_1(x_3, y_3)$ (ظل الرأس A على المستوي الأفقي) والنقطة $B_1(x_2, y_2)$ (ظل الرأس B على المستوي الأفقي) بتقاطع كل من المستقيمين الموازيين للأشعة الشمسية والمارين من A و B (على الترتيب) مع المستوي $z=0$ ، وبذلك نجد:

$${}^{\circ}OA_1 = \begin{pmatrix} -b \cos b \cdot \sin g - b \sin b \cdot \frac{n_x}{n_z} \\ b \cos b \cdot \cos g - b \sin b \cdot \frac{n_y}{n_z} \end{pmatrix}, \quad {}^{\circ}OB_1 = \begin{pmatrix} -b \cos b \cdot \sin g + a \cos g - b \sin b \cdot \frac{n_x}{n_z} \\ b \cos b \cdot \cos g + a \sin g - b \sin b \cdot \frac{n_y}{n_z} \end{pmatrix}$$

فإذا رمزنا لإحداثيات النقطة C بـ x_1, y_1 . نستطيع أن نكتب معادلة المستقيم المار من C و B_1 كما يلي:

$$y + q \cdot x + p = 0, \quad \text{where } q = -\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \text{ and } p = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_1 - y_1$$

كما يمكننا حساب الارتفاع المتعلق بـ A_1 في متوازي الأضلاع OCB_1A_1 بحساب بعد النقطة A_1 عن المستقيم المار بـ CB_1 ، والذي يعطى بالعلاقة:

$$h = \frac{|y_3 + q \cdot x_3 + p|}{\sqrt{1 + q^2}}$$

حيث (x_3, y_3) هي إحداثيات النقطة A_1 . وبذلك تعطى مساحة ظل السطح المدروس بالعلاقة $S = h \cdot d$ ، حيث يمثل d طول الضلع $[CB_1]$. وبالتبديل عن المتحولات المختلفة من خلال الزاوية الساعية وزاوية ميل الشمس وزاوية ميل السطح وزاوية سمتة تصبح العلاقة المعبرة عن نسبة مساحة ظل السطح المدروس إلى مساحته كما يلي:

$$\frac{S}{S_0} = |\cos b + \sin b \cdot \sin g \cdot f_1(d, w, j) - \sin b \cdot \cos g \cdot f_2(d, w, j)| \quad (2)$$

حيث

$$f_1(d, w, j) = \frac{-\cos d \cdot \sin w}{\cos d \cdot \cos j \cdot \cos w + \sin d \cdot \sin j} \quad (3)$$

$$f_2(d, w, j) = \frac{\cos d \cdot \cos w \cdot \sin j - \cos j \cdot \sin d}{\cos d \cdot \cos j \cdot \cos w + \sin d \cdot \sin j}$$

ويتعين اتجاه الظل بالزاوية التي يصنعها مع محور الشمال (الزاوية بين Oy و OA_1) مثلاً والتي تتعين بالعلاقة التالية:

$$q = -\arctan \frac{\sin g + \tan b \cdot f_1(d, w, j)}{\cos g - \tan b \cdot f_2(d, w, j)} \quad \text{for } y_3 \geq 0 \quad (4)$$

$$q = -\arctan \frac{\sin g + \tan b \cdot f_1(d, w, j)}{\cos g - \tan b \cdot f_2(d, w, j)} - \text{sign}(x_3) \cdot p \quad \text{for } y_3 < 0$$

وتختلف زاوية اتجاه الظل عن زاوية سمت الشمس (solar azimuth angle) التي يصنعها مسقط شعاع موضع الشمس على الأفق مع الجنوب (سالبة قبل الظهيرة الشمسية وموجبة بعدها) والتي تعطى كما يلي:

$$\tan g_s = \frac{f_1(d, w, j)}{f_2(d, w, j)} \quad (5)$$

وترتبط الزاوية الساعية بالتوقيت المحلي LMT (local mean time) بالعلاقة التالية:

$$w = 15 \left(\frac{L}{15} LMT + E - \frac{(L - 30)}{15} - 12 \right) \quad (6)$$

حيث L زاوية خط طول موقع تركيب السطح و E معادلة الوقت (equation of time) [12]:

$$E = \frac{1}{60} (0.00037 + 0.43177 \cos(Jw_1) - 3.165 \cos(2Jw_1) + 0.07272 \cos(3Jw_1) - 7.3764 \sin(Jw_1) - 9.3893 \sin(2Jw_1) - 0.24498 \sin(3Jw_1)) \quad (7)$$

حيث $w_1 = \frac{2p}{365}$ الزاوية اليومية الشمسية (solar daily hour)، و J رقم اليوم في العام (day number)

(number). أما بالنسبة لزاوية ميل الشمس d فيمكننا حسابها باستخدام إحدى العلاقات المتوفرة في الأدبيات العلمية (انظر على سبيل المثال [12,16,17]) أو قياسها اعتماداً على المنهجية المبينة في [15]. ولقد اخترنا هذا الأسلوب لأنه يسمح لنا أيضاً بحساب زاوية عرض موقع تركيب السطح وتحديد الاتجاهات الجغرافية في نفس الموقع. وهذه أمور لا بد منها عندما يجري الحديث عن إجراء مقارنة بين القيم التجريبية والنظرية. ونظراً لشرح أسلوب القياس بالتفصيل في [15,17] ارتأينا عدم تكرار وصفه ثانية. ولقد تبين إمكانية تمثيل النتائج التجريبية لزاوية ميل الشمس بالعلاقة التالية:

$$\delta = 0.166405 + 11.725 \sin \left(\frac{2p(J-80)}{365.25} \right) + 1.8936 \sin(Jw_1) + 0.016025 \sin(2Jw_1) + 0.035935 \sin(3Jw_1) - 11.492 \cos(Jw_1) - 0.17495 \cos(2Jw_1) - 0.699 \cos(3Jw_1) \quad (8)$$

ويبين الجدولان (1) و (2) نتائج المقارنة بين نتائج العلاقة المقترحة والنتائج الناجمة عن استخدام علاقتين مقترحتين في [12] و [16] بالنسبة للاعتدالين الربيعي والخريفي وللانقلابين الصيفي والشتوي حيث رقم اليوم الموافق معروف وقيمة زاوية ميل الشمس معروفة أيضاً. وعلى الرغم من أن القيم متقاربة جداً وشبه متطابقة في الأشهر الأربعة الأولى من العام نلاحظ أمرين هاميين لاحتققهما العلاقات النظرية المقترحة وهما:
 (أ) تتوافق قيمتا ميل الشمس في حالتي الاعتدال الربيعي والخريفي في آن واحد.
 (ب) توافق القيمة العظمى لميل الشمس الانقلاب الصيفي كما توافق القيمة الصغرى الانقلاب الشتوي.

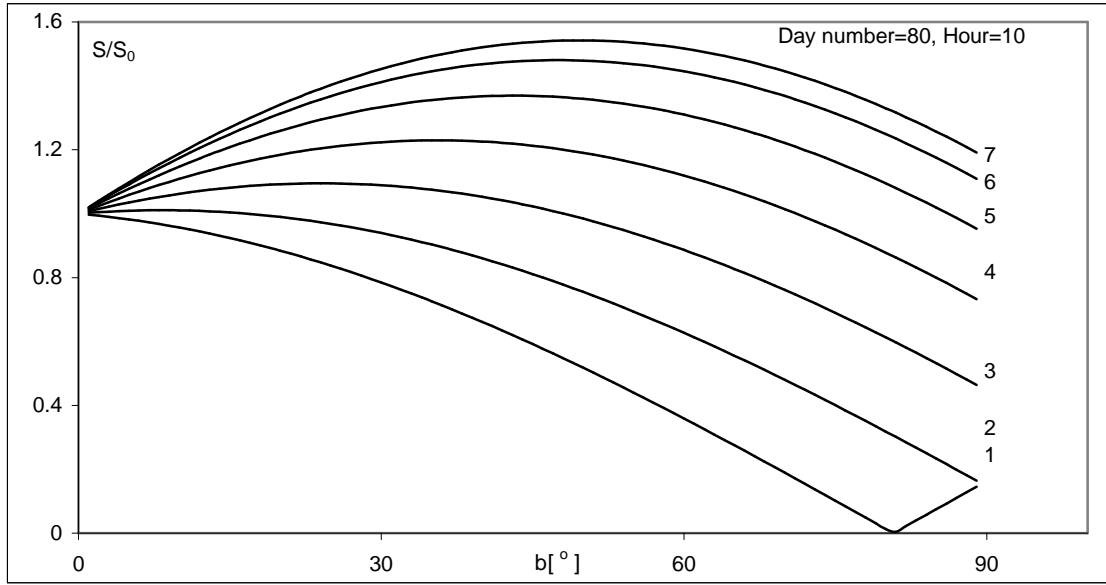
الجدول (1): مقارنة أرقام بعض الأيام المميزة المحسوبة من زاوية ميل الشمس مع القيم الفعلية

رقم اليوم الموافق	رقم اليوم الموافق	رقم اليوم الموافق	رقم اليوم الموافق	
حسب هذا العمل	حسب [16]	حسب [12]	فعلاً	
80	80	80	80	الاعتدال الربيعي
172	173	171	172	الانقلاب الصيفي

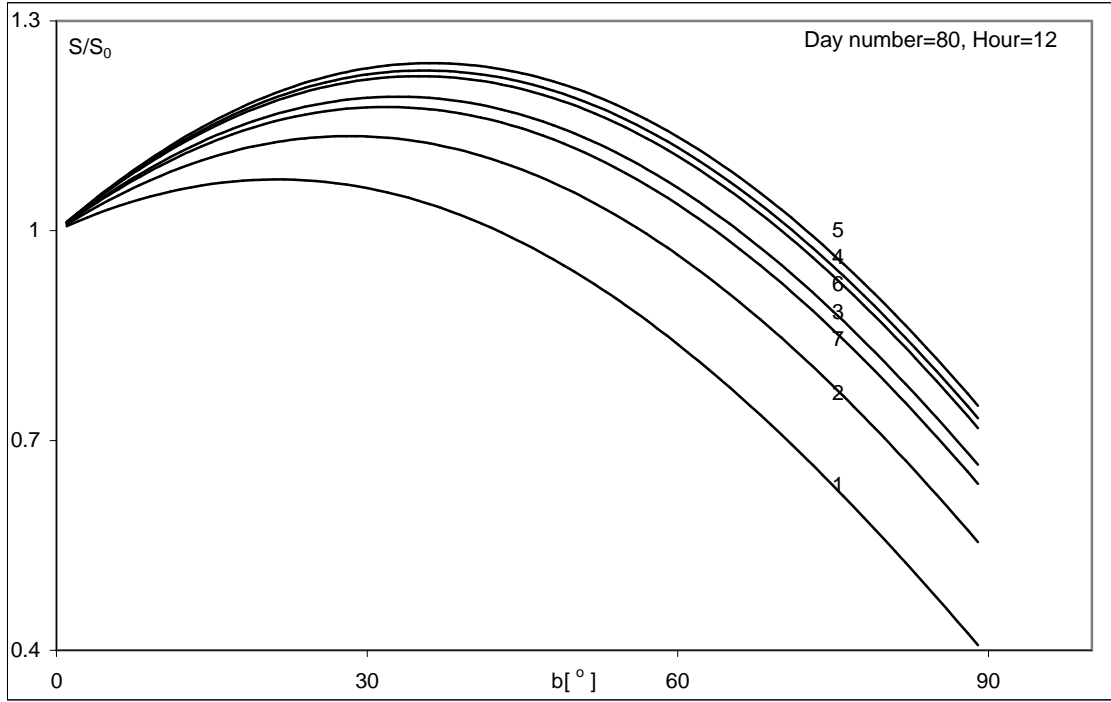
264	266	263	264	الاعتدال الخريفي
355	356	354	355	الانقلاب الشتوي

الجدول (2): مقارنة قيم زاوية ميل الشمس في بعض الأيام المميزة

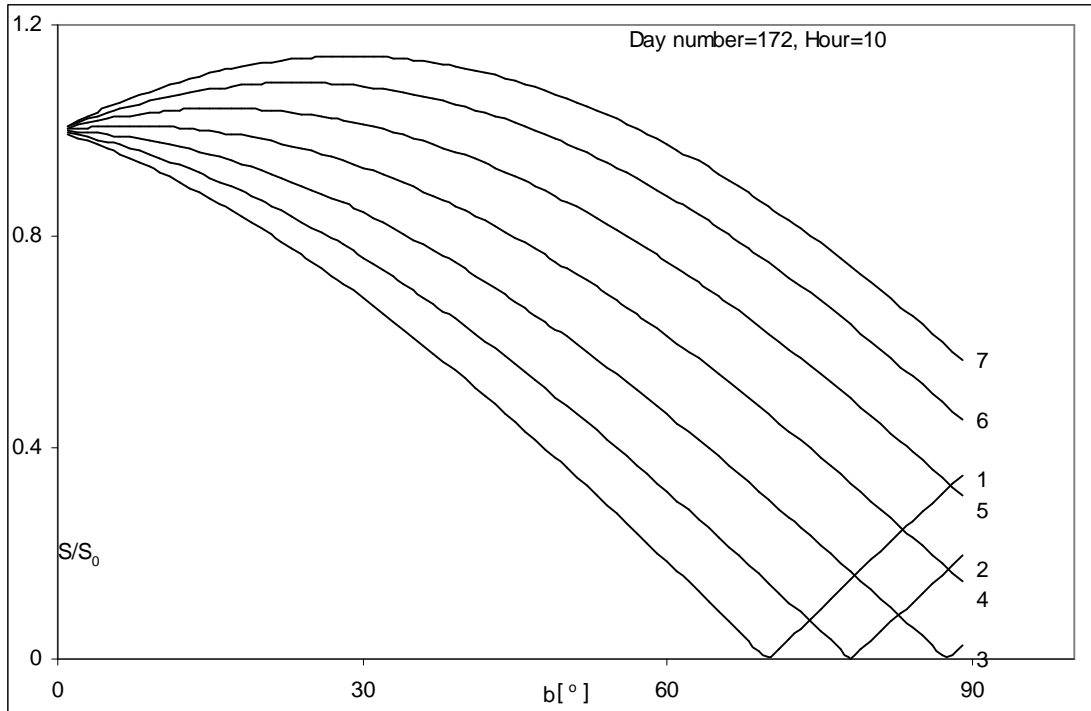
القيمة المحسوبة حسب هذا العمل	القيمة المحسوبة حسب [16]	القيمة المحسوبة حسب [12]	القيمة التجريبية [18]	
0.0106782-	0.0213564-	0	0	الاعتدال الربيعي
23.4449	23.4414	23.4484	23.45	الانقلاب الصيفي
0.110074	0.774766	0.554619-	0	الاعتدال الخريفي
23.4518-	23.4575-	23.4461-	23.45-	الانقلاب الشتوي



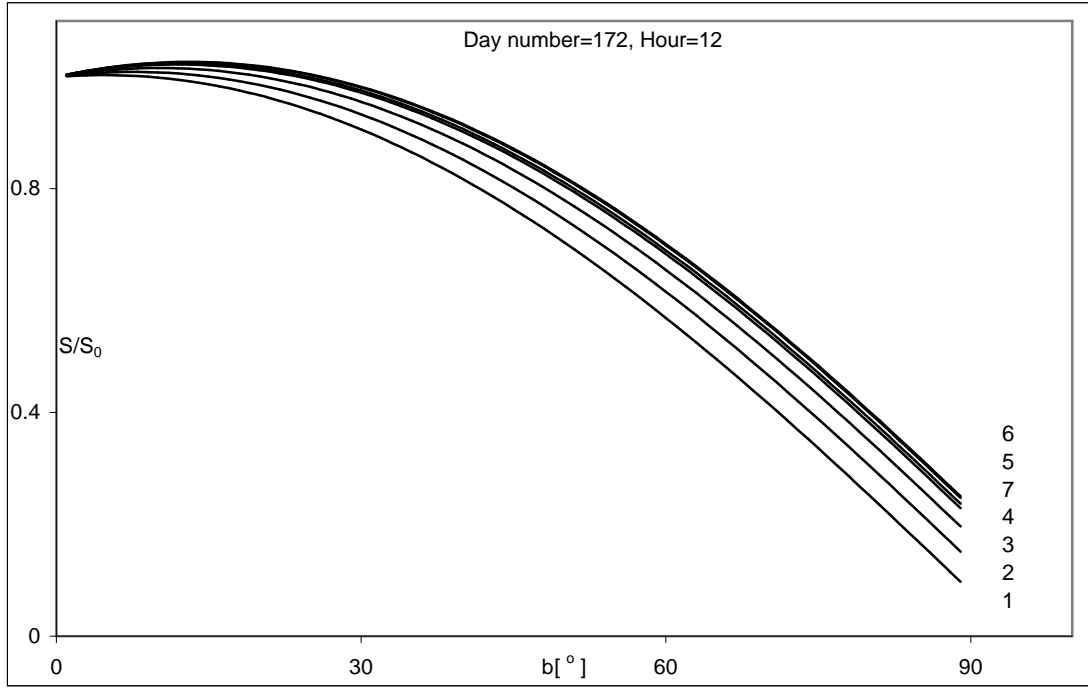
الشكل (2): تبعية نسبة مساحة ظل اللوح إلى مساحته لكل من زاويتي ميل اللوح على الأفق وسمته عند الساعة العاشرة صباحاً من يوم الاعتدال الربيعي. (في هذا الشكل وفي الأشكال (3)-(7) تدل الأرقام 1-7 إلى قيم السمات -45، -30، -15، 0، 15، 30، 45 على الترتيب)



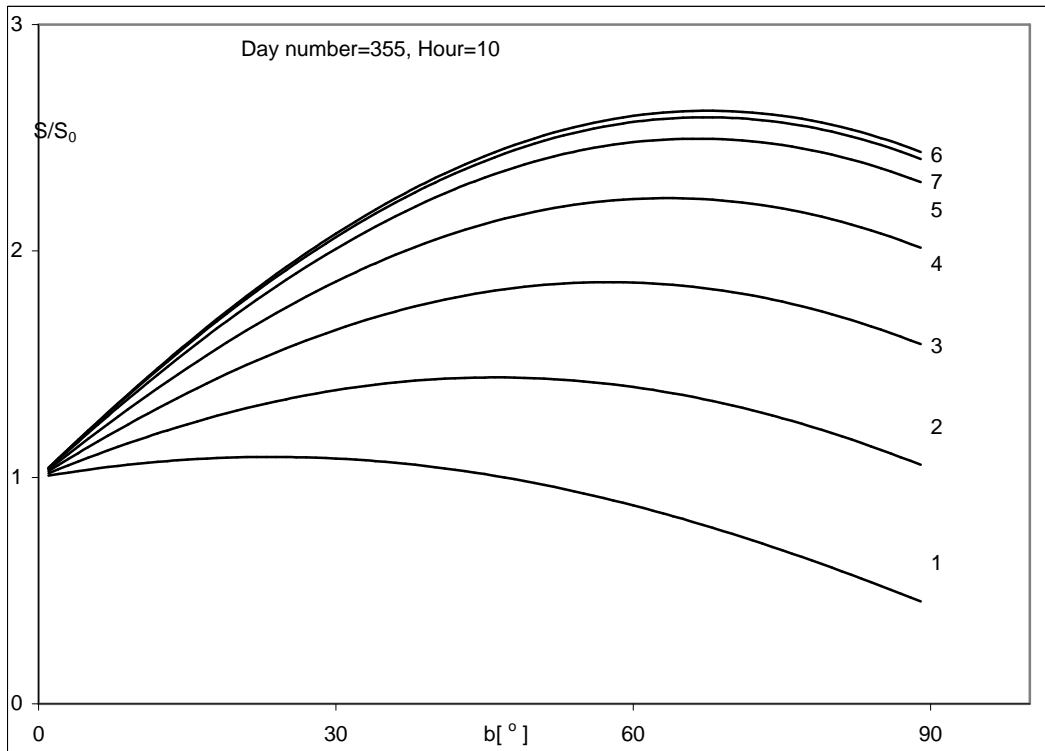
الشكل (3): تبعية نسبة مساحة ظل اللوح إلى مساحته لكل من زاويتي ميل اللوح على الأفق وسمته عند الساعة الثانية عشرة ظهراً من يوم الاعتدال الربيعي.



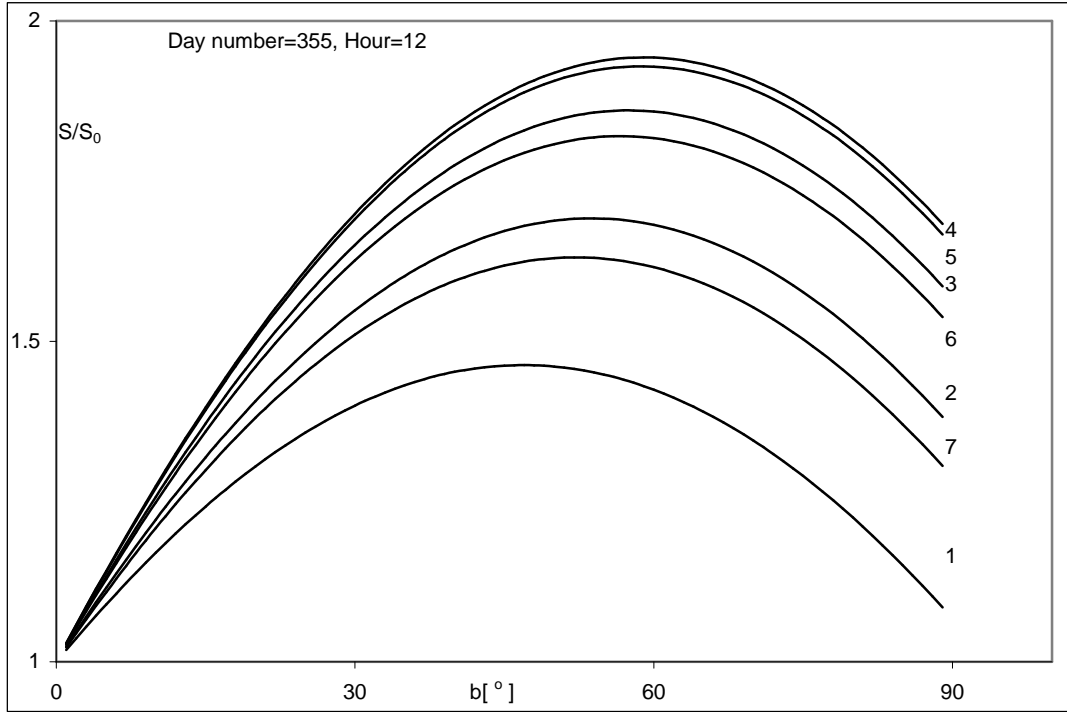
الشكل (4): تبعية نسبة مساحة ظل اللوح إلى مساحته لكل من زاويتي ميل اللوح على الأفق وسمته عند الساعة العاشرة صباحاً من يوم الانقلاب الصيفي.



الشكل(5): تبعية نسبة مساحة ظل اللوح إلى مساحته لكل من زاويتي ميل اللوح على الأفق وسمته عند الساعة الثانية عشرة ظهراً من يوم الانقلاب الصيفي. (يأتي ترتيب المنحنيات من الأعلى إلى الأسفل 6، 5، 4، 7، 3، 2، 1 على الترتيب).



الشكل(6): تبعية نسبة مساحة ظل اللوح إلى مساحته لكل من زاويتي ميل اللوح على الأفق وسمته عند الساعة العاشرة صباحاً من يوم الانقلاب الشتوي.



الشكل (7): تبعية نسبة مساحة ظل اللوح إلى مساحته لكل من زاويتي ميل اللوح على الأفق وسمته عند الساعة الثانية عشرة ظهراً من يوم الانقلاب الشتوي.

وتسمح جملة العلاقات (11) بتحديد مجال تغير الزاوية الساعية، التي يمكن أن تتعدم فيه مساحة الظل. وتجدر الإشارة هنا إلى أن كل قيمة معينة للزاوية الساعية واقعة في المجال المذكور توافق قيمة محددة لميل اللاقط b_0 . بالطبع إن المجال السابق تابع لرقم اليوم ولزاوية سمت اللاقط. ويمكن بسهولة تحديد المجال المذكور:

- من أجل $g < 0$ تكون الزاوية الساعية

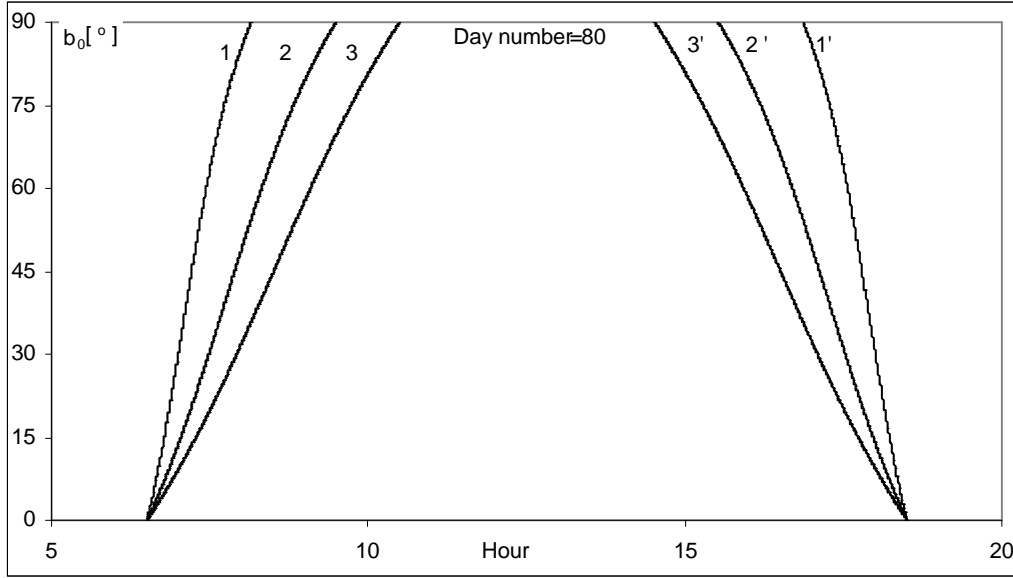
$$w_{sr} \leq w \leq [-\arccos(\cos w_0 |\cotanj \cdot tand) + |w_0|]$$

- ومن أجل $g > 0$ تكون الزاوية الساعية

$$w_{ss} \leq w \leq [\arccos(\cos w_0 |\cotanj \cdot tand) - |w_0|]$$

مع العلم أن w_{ss} و w_{sr} هما الزاويتين الساعيتين الموافقتين للشروق والغروب على اللوح المدرس.

- من أجل زاوية سمت معدومة فنجد أن مساحة الظل تتعدم فقط عند الشروق والغروب على سطح اللوح المدرس. ولتوضيح هذه الظاهرة قمنا برسم تبعية زاوية الميل b_0 ضمن المجال الزمني المسموح وذلك عند قيم مختلفة لزاوية سمت اللوح (انظر الشكل (8)).



الشكل (8): تبعية b_0 للتوقيت المحلي في يوم الاعتدال الربيعي، حيث توافق الأرقام 1, 2, 3 القيم التالية لزاوية سمت اللوح -15، -30، -45 على الترتيب، أما الأرقام 1', 2', 3' القيم التالية لزاوية سمت اللوح 15، 30، 45 على الترتيب.

ولقد تبين أيضاً أن مساحة ظل السطح المدرس تابع جيبي لزاوية الميل دوره p . وبما أن مساحة ظل هذا السطح معدومة عند قيم معينة لزاوية الميل وزاوية ميل السطح تتغير فقط في المجال $[0, 90^\circ]$ فكل قيمة من هذه القيم توافق قيمة أخرى لزاوية الميل تبلغ فيها مساحة الظل قيمتها العظمى، ولندعو هذه القيمة بـ b_m . ويكون الفرق بين هاتين الزاويتين مساوياً نصف الدور أي أن:

$$b_m - b_0 = \pm \frac{p}{2} \quad (12)$$

ويتضح من العلاقة (12) استحالة الحصول على قيمتين b_0 و b_m ضمن المجال $[0, 90^\circ]$ ، إلا إذا انعدمت إحداهما فتكون الأخرى زاوية قائمة (انظر الشكل (8)). ففي حالة توجيه اللوح باتجاه الجنوب الشرقي نلاحظ أن قيمة b_0 تزداد مع تزايد الزاوية الساعية إلى أن تصل إلى قيمتها العظمى 90° أما في حالة توجيه اللوح

نظام قياس الظل

يتألف نظام القياس من ثلاثة ألواح مستطيلة الشكل أبعاد كل منها تساوي 100x50 cm. يمكن تدوير كل من هذه الألواح ميكانيكياً حول محور أفقي مما يسمح بتغيير زاوية ميل سطح اللوح عن الأفق من -85 إلى 85 درجة. ويثبت المحور الأفقي على محور شاقولي يرتكز بدوره على قاعدة قابلة للحركة على قوس دائرية مما يسمح بتدوير اللوح حول المحور الشاقولي وبالتالي بتغيير سمتة من -45 إلى 45 درجة. ويمكن استخدام النظام لتحديد تبعية نتائج القياس لزاوية الميل عن الأفق عند سمت ثابت أو لتحديد تبعية مساحة الظل لزاوية سمت عند ميل ثابت. كما يسمح النظام بتحديد دقة القياس من خلال استخدام الألواح الثلاثة في ظروف ومعطيات مماثلة لأن هذا الترتيب

يقود إلى ثلاث قيم تجريبية موافقة لنفس الشروط. وتجدر الإشارة هنا إلى أن النظام المقترح قد ركب على سطح أفقي في منطقة زاوية خط عرضها 35.5 درجة شمالاً وزاوية خط طولها 35.64 درجة شرقاً في مدينة اللاذقية وتم استخدامه عدة أيام في حالة سماء صافية خلال العام 2002.

النتائج والمناقشة

لقد طبق النموذج النظري لحساب نسبة مساحة الظل المتشكل للوح إلى مساحة اللوح نفسه تبعاً لتغير كل من المتحولات التي تتبع لها هذه النسبة وهي الزاوية الساعية ورقم اليوم في العام وميل اللوح عن الأفق وسمت اللوح بالنسبة لاتجاه الشمال. وتتضمن الأشكال (2) - (7) النتائج التي تم الحصول عليها بالنسبة لهذه النسبة خلال الاعتدالين الربيعي والخريفي والانقلابين الصيفي والشتوي المذكور تبعاً لزاوية ميل اللوح عن الأفق ولزاوية سمته في الساعتين العاشرة صباحاً والثانية عشرة ظهراً من هذه الأيام المميزة كأمثلة عن هذه النتائج. ولقد وجدت قيم زوايا الميل التي تتعدم فيها مساحة الظل (انظر الشكل (8)). كما تتضمن الأشكال (9) - (17) النتائج التي تم الحصول عليها بالنسبة لحركة الظل على مدار اليوم تبعاً لميولات مختلفة ولتوجيه مختلف للوح. وتجدر الإشارة هنا إلى أن حساب مساحة ظل اللوح يجب أن تتم خلال فترة سطوع الشمس على الوجه المعتبر للوح. وهذه الفترة مختلفة عموماً عن فترة السطوع على سطح أفقي. وللاطلاع بشكل أوسع ومستفيض على هذه النقطة يمكن العودة إلى المرجع [18].

من خلال استقراء نتائج الحسابات السابقة، المبيّنة على الأشكال (2) - (7)، نلاحظ أنه يوجد قيمة لزاوية ميل اللاقط تكون عندها مساحة الظل معدومة، سوف ندعو هذه القيمة بـ b_0 ، يمكننا تعيين هذه القيمة من العلاقة:

$$\cotan(b_0) = -\sin g \cdot f_1(d, w, j) + \cos g \cdot f_2(d, w, j) \quad (9)$$

نعلم أن زاوية ميل الشمس تتعلق فقط برقم اليوم المدروس، كما أن زاوية خط العرض ثابتة في المنطقة المدروسة، لذلك من المهم معرفة تبعية الزاوية b_0 لكل من زاوية سمت اللاقط والزاوية الساعية. بالنسبة لنا إن القيم المقبولة لزاوية ميل اللاقط يجب أن تكون محصورة في المجال $[0 - 90^\circ]$ لذلك يمكننا أن نجزم $\cotan(b_0)^3 \geq 0$ ومنه نجد:

$$\frac{\cos d \cdot \cos w \cdot \sin j - \cos j \cdot \sin d + \cos d \cdot \sin w \cdot \tan g}{\cos d \cdot \cos w \cdot \cos j + \sin j \cdot \sin d} \geq 0 \quad (10)$$

إن المقام في المتراجحة (10) أكبر أو يساوي الصفر باستمرار، لذلك نكتفي بدراسة إشارة البسط حيث نستطيع أن نجد بسهولة:

$$\cos(w - w_0)^3 \frac{\cotan j \cdot \tan d}{\sqrt{1 + \tan^2 w_0}} = |\cos w_0| \cotan j \cdot \tan d \quad (11)$$

$$\cos w_0 = \frac{\sin j}{\sqrt{\sin^2 j + \tan^2 g}}, \quad \sin w_0 = \frac{\tan g}{\sqrt{\sin^2 j + \tan^2 g}}$$

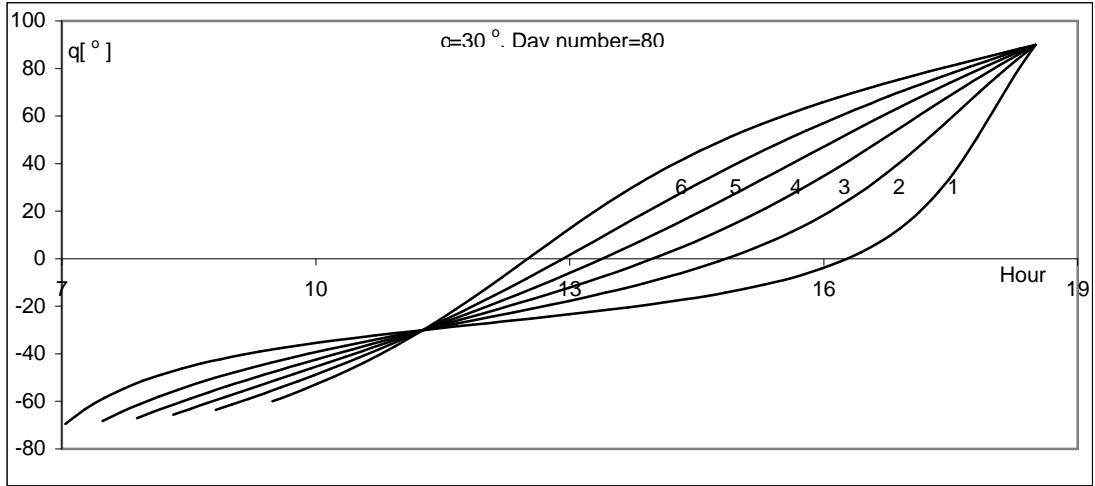
باتجاه الجنوب الغربي فإن قيمة b_0 تتناقص مع تزايد الزاوية الساعية إلى أن تصل إلى قيمتها الصغرى 0° أما عند انعدام سمت اللوح (في حالة توجيه اللوح باتجاه الجنوب تماماً) فللزاوية b_0 قيمة واحدة معدومة تأخذها عند الشروق والغروب. وبالتالي عند تصميم منشآت استثمار الطاقة الشمسية لا بد من أخذ قيم هاتين الزاويتين بعين الاعتبار b_m و b_0 .

ولا تقل دراسة تيعية اتجاه ظل اللوح ذي التوجيه المختلف أهمية عن دراسة مساحة ظل ذلك اللوح، وخاصة في حقول الاستثمار عند دراسة التوزيع الأمثل للواقط الشمسية، أو توضع هذه اللواقط بالنسبة للأبنية والتضاريس الطبيعية المجاورة. وعلى الأشكال (9)–(17) قمنا بعرض نتائج هذه الدراسة. وهنا تبين أن الزاوية التي يصنعها الظل مع اتجاه الشمال مختلفة جذرياً عن زاوية سمت الشمس (انظر الشكل (18) للمقارنة مع الأشكال السابقة) ولا تحصل المساواة إلا في حالة $b=90^\circ$. والعلاقة بين الزاويتين تتمتع بالشكل التالي:

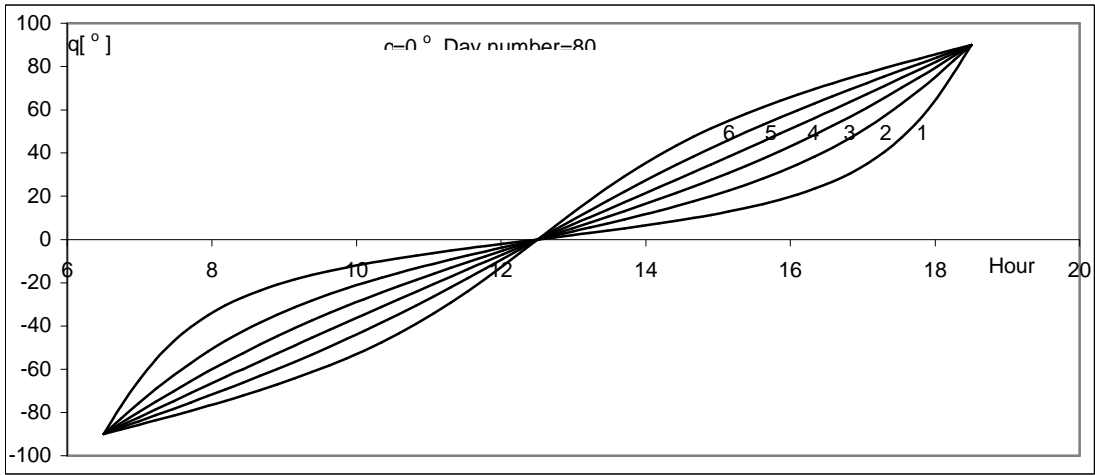
$$\tan q = - \frac{\sin g + \tan b \cdot \tan g_s \cdot f_2(d, w, j)}{\cos g - \tan b \cdot f_2(d, w, j)}$$

فالشمس لا يمكن أن تسطع على اللوح وهي موجودة تحت الأفق ولكنها يمكن أن تشرق على (أو تغرب عن) الأفق قبل شروقها على (أو بعد غروبها عن) اللوح. وفترة سطوع الشمس على اللوح، المائل بزاوية ما عن الأفق والمتجه بزاوية ما بالنسبة لاتجاه الجنوب، مدروسة بالتفصيل [18]. وتترافق فترة ظهور الظل لوجه معين من وجهي اللوح مع فترة سطوع الشمس على ذلك الوجه.

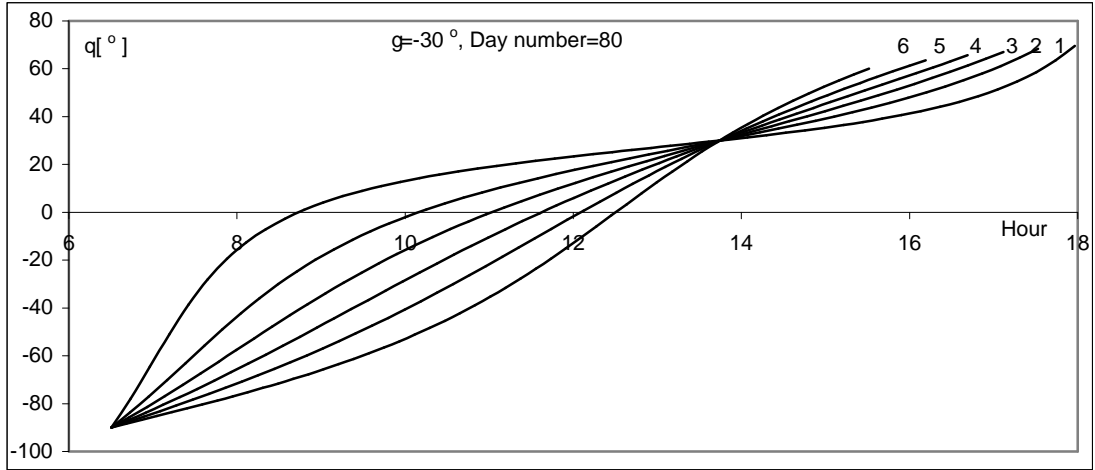
ويغية اختبار كفاءة النموذج النظري في تحديد تيعية حركة ومساحة الظل تم تطبيق النموذج النظري على لوح، طوله متر واحد وعرضه نصف متر (أي مماثل للوح المستخدم في نظام القياس)، تبعاً لميل واتجاه اللوح في عدة أيام صحو (حالة سماء صافية). وتتضمن الأشكال (19) – (22) نتائج القياس جنباً إلى جنب مع القيم النظرية. وتبين أن الفرق بين القيم التجريبية والقيم النظرية معدوم عملياً في فترة الظهيرة وقد يصل إلى حوالي 6% عند شروق وغروب الشمس. ويظهر ذلك جلياً في الأشكال (19)–(22). ويعود السبب في كبر الانزياح النسبي خلال الشروق والغروب إلى عدة أمور أهمها صعوبة تأمين أفقية سطح القياس ودقة القياس على مسافات كبيرة.



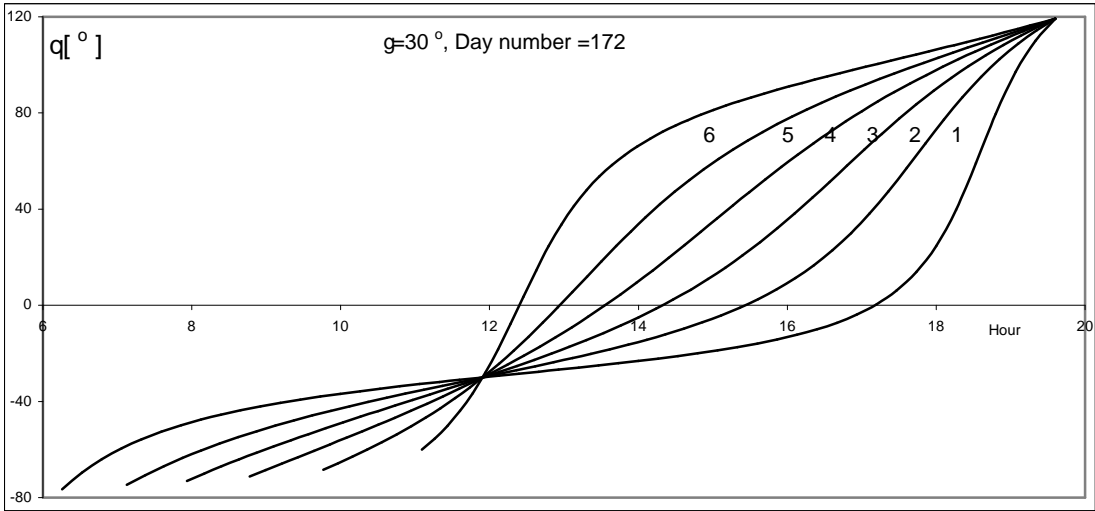
الشكل (9): تغير الزاوية التي يصنعها الظل مع محور الشمال على امتداد يوم الاعتدال تبعاً لميل اللوح على الأفق عند ما سمته يساوي 30 درجة. (في هذا الشكل وفي الأشكال (10)–(17) تدل الأرقام 1-6 إلى قيم الميل 15، 30، 45، 60، 75، 90 على الترتيب).



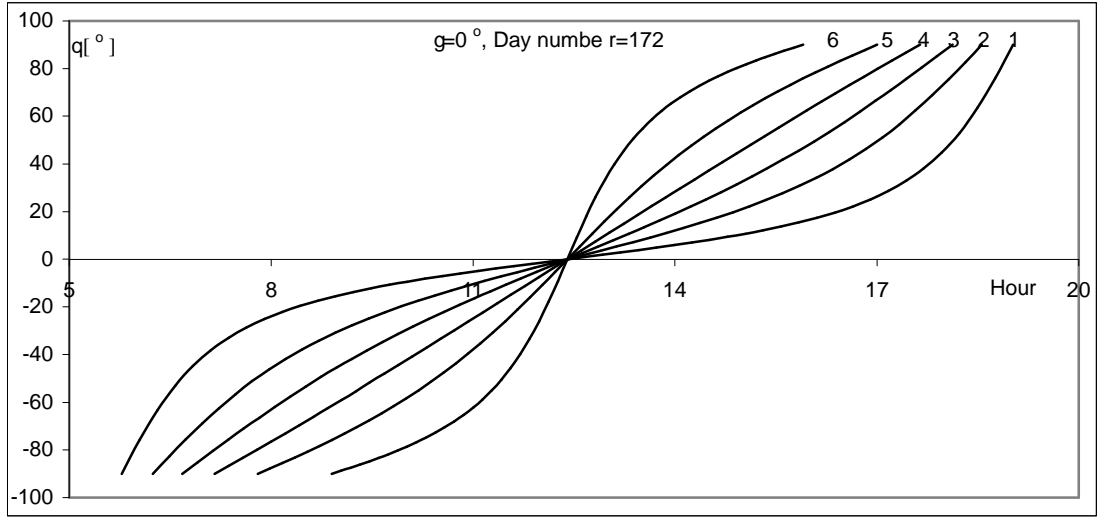
الشكل (10): تغير الزاوية التي يصنعها الظل مع محور الشمال على امتداد يوم الاعتدال تبعاً لميل اللوح على الأفق عند ما سمته يساوي 0 درجة (اللوح متجه نحو الجنوب).



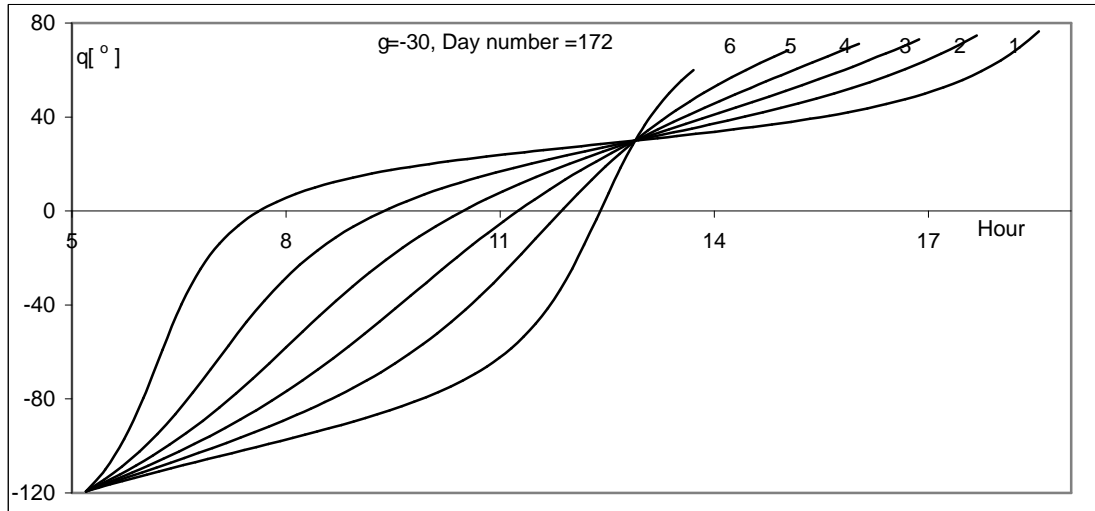
الشكل(11): تغير الزاوية التي يصنعها الظل مع محور الشمال على امتداد يوم الاعتدال تبعاً لميل اللوح على الأفق عند ما سمته يساوي -30 درجة.



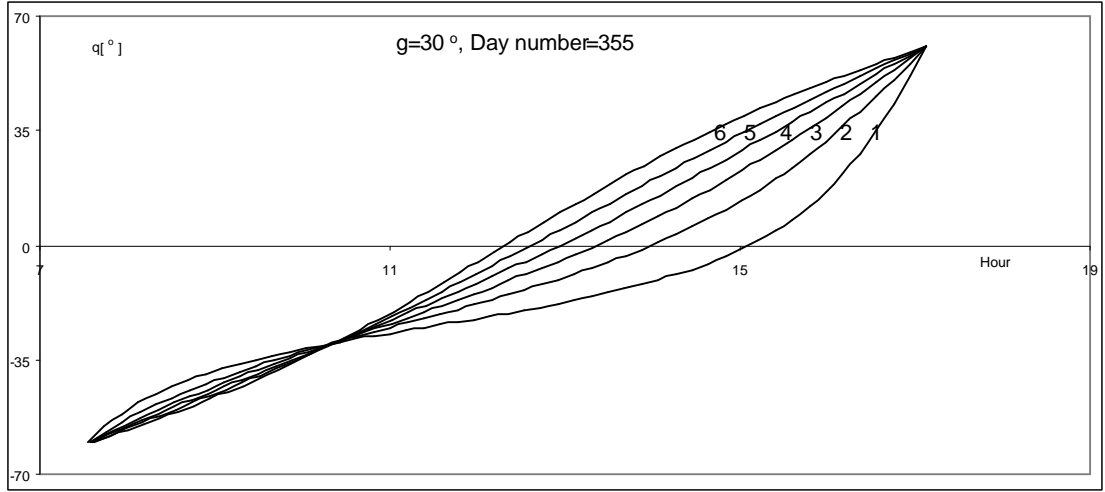
الشكل(12): تغير الزاوية التي يصنعها الظل مع محور الشمال على امتداد يوم الانقلاب الصيفي تبعاً لميل اللوح على الأفق عند ما سمته يساوي 30 درجة.



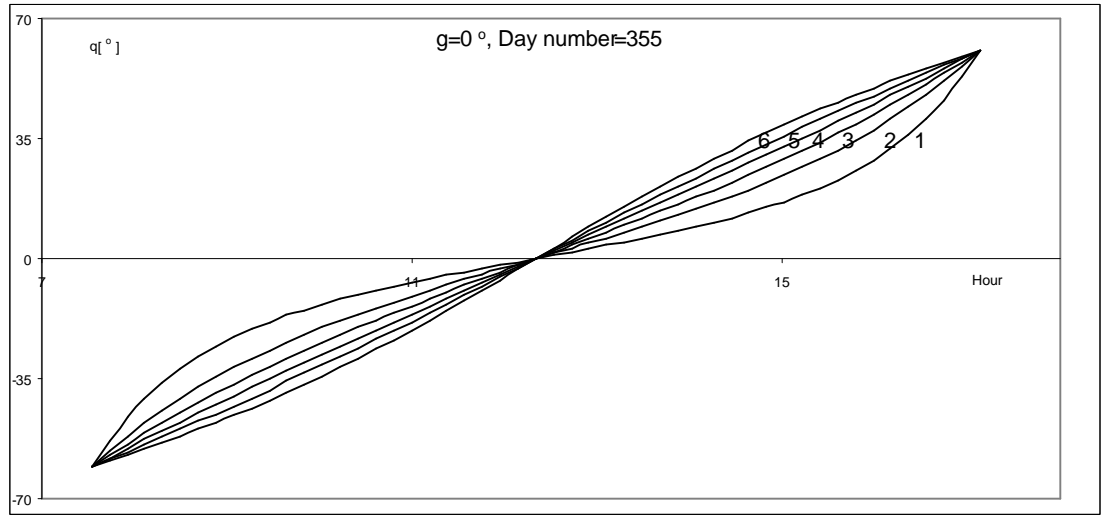
الشكل(13): تغير الزاوية التي يصنعها الظل مع محور الشمال على امتداد يوم الانقلاب الصيفي تبعاً لميل اللوح على الأفق عند ما سمته يساوي 0 درجة (اللوحة متجه نحو الجنوب).



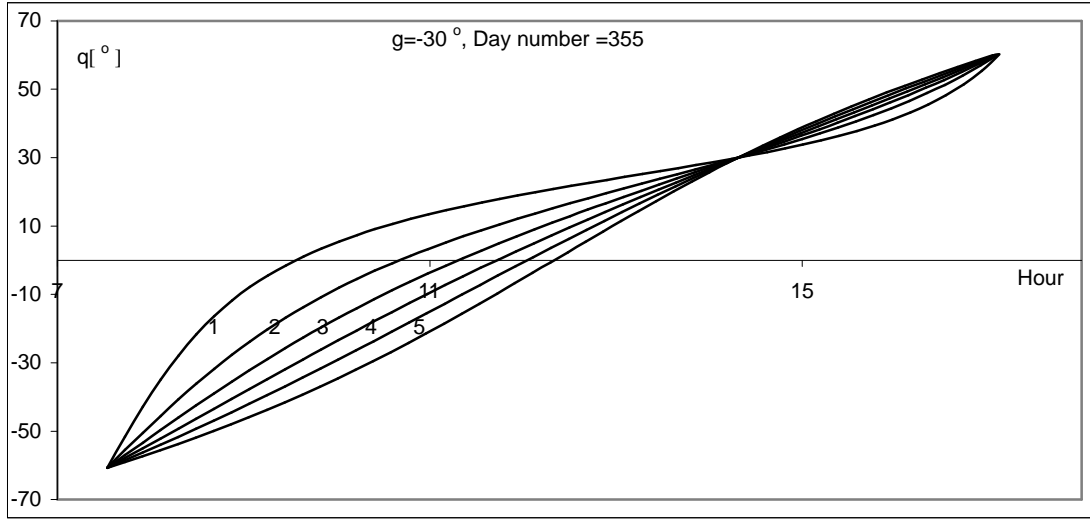
الشكل(14): تغير الزاوية التي يصنعها الظل مع محور الشمال على امتداد يوم الانقلاب الصيفي تبعاً لميل اللوح على الأفق عند ما سمته يساوي -30 درجة.



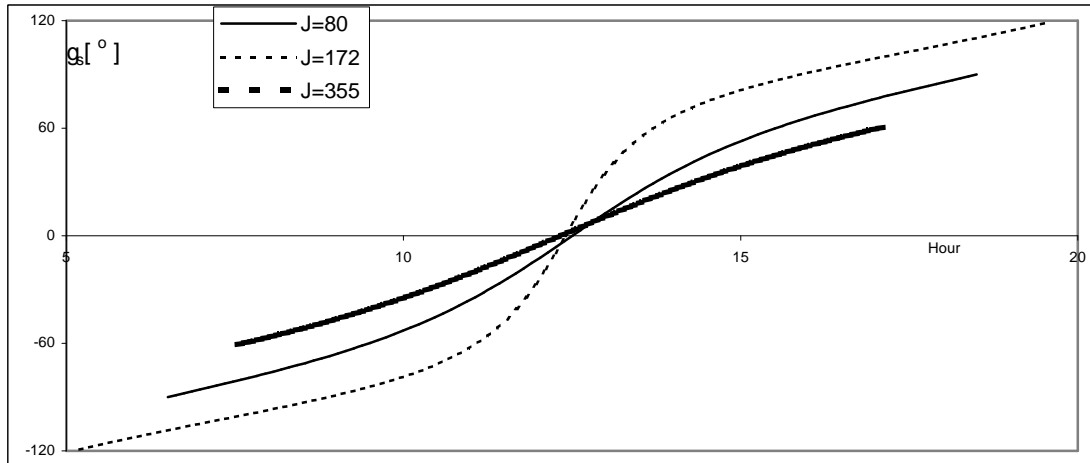
الشكل (15): تغير الزاوية التي يصنعها الظل مع محور الشمال على امتداد يوم الانقلاب الشتوي تبعاً لميل اللوح على الأفق عند ما سمتة يساوي 30 درجة.



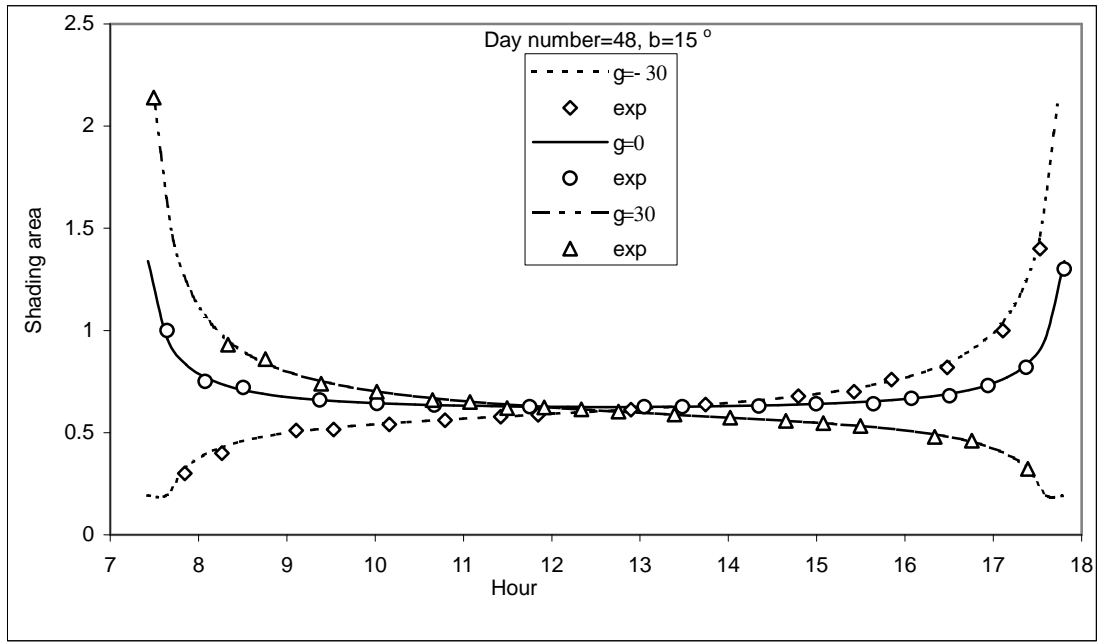
الشكل (16): تغير الزاوية التي يصنعها الظل مع محور الشمال على امتداد يوم الانقلاب الشتوي تبعاً لميل اللوح على الأفق عند ما سمتة يساوي 0 درجة (اللوح متجه نحو الجنوب).



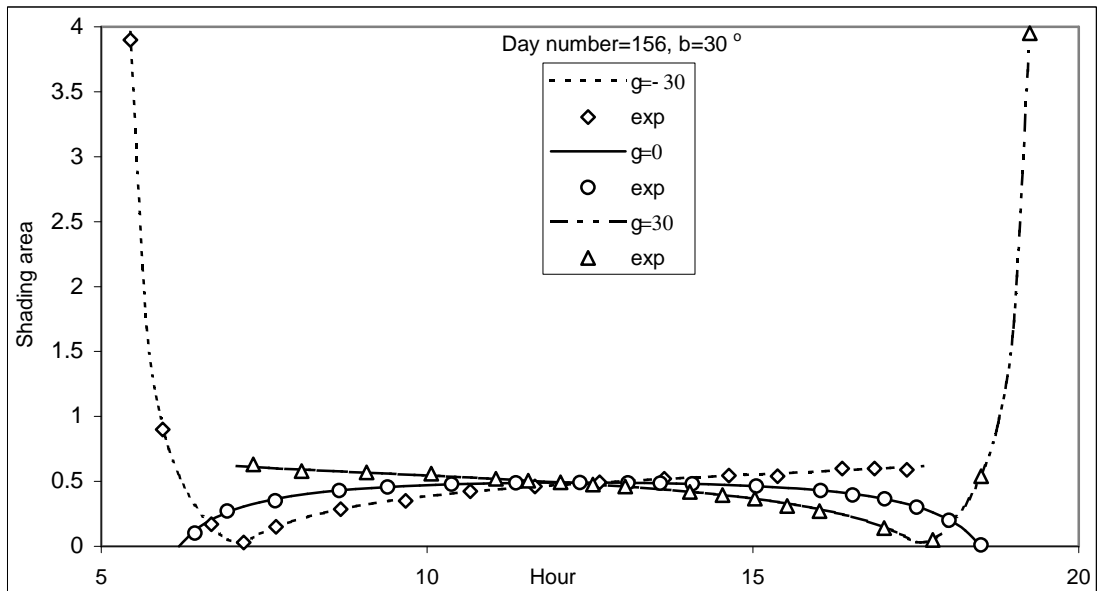
الشكل (17): تغير الزاوية التي يصنعها الظل مع محور الشمال على امتداد يوم الانقلاب الشتوي تبعاً لميل اللوح على الأفق عند ما سمتة يساوي -30 درجة.



الشكل (18): تبعية زاوية سمت الشمس للتوقيت في الاعتدال الربيعي والانقلابين الصيفي والشتوي.

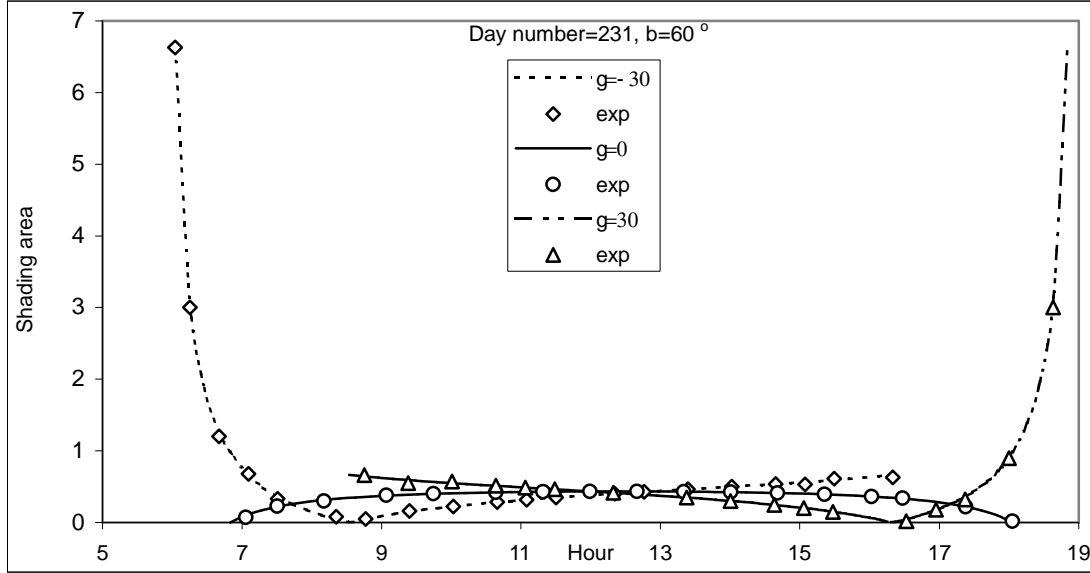


الشكل(19): القيم النظرية والتجريبية لمساحة ظل اللوح في يوم السبت الموافق للسابع عشر من شباط عام 2002 عند زاوية ميل عن الأفق تساوي 15° وثلاث قيم للسمت هي: - 30° و 0° و 30° (المساحة في هذا الشكل وفي الأشكال(20)-(22) مقدره بالمترب). (المربع).

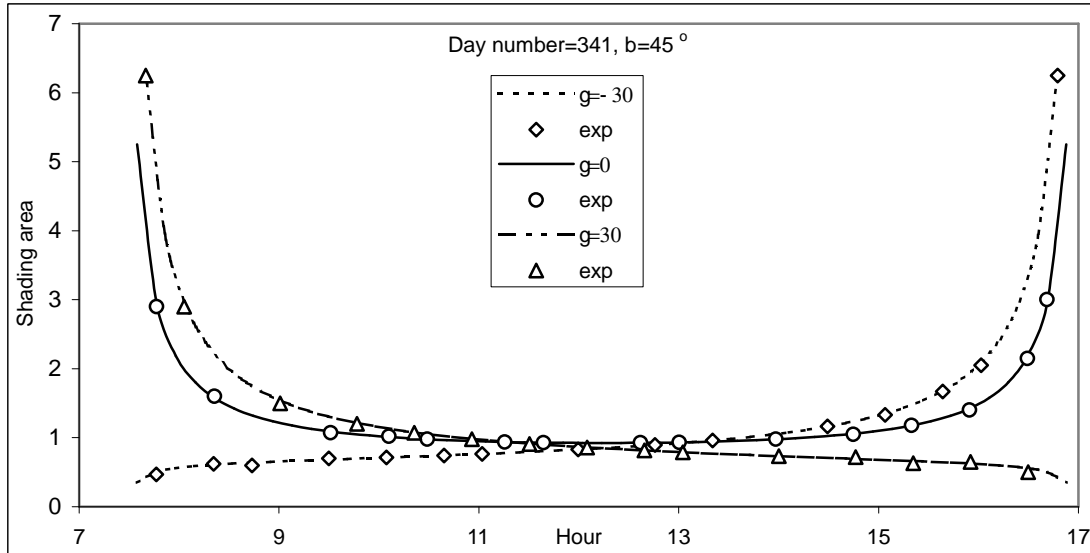


الشكل(20): القيم النظرية والتجريبية لمساحة ظل اللوح في يوم الأربعاء الموافق للخامس من حزيران عام 2002 عند زاوية ميل عن الأفق تساوي 30° وثلاث قيم للسمت هي: - 30° و 0° و 30° درجة.

ونوه ثانية إلى أن كبر الخطأ النسبي صباحاً ومساءً مرتبط أساساً بكبر طول الخيال، الذي يصل عند الشروق والغروب إلى أمتار عديدة، وإلى صغر الارتفاع في متوازي الأضلاع المعبر عن مساحة الظل (بما أن اللوح المستخدم مستطيل الشكل فالظل المتشكل له يكون عموماً على شكل متوازي أضلاع) إذ يصل إلى عدة سنتمترات مما يقلل دقة القياس في هذه الحالة.



الشكل (21): القيم النظرية والتجريبية لمساحة ظل اللوح في يوم الإثنين الموافق للتاسع عشر من آب عام 2002 عند زاوية ميل عن الأفق تساوي 60° وثلاث قيم للسمت هي: 30° و 0° و 30° درجة.



الشكل (22): القيم النظرية والتجريبية لمساحة ظل اللوح في يوم السبت الموافق للسابع من كانون الأول عام 2002 عند زاوية ميل عن الأفق تساوي 45° وثلاث قيم للسمت هي: 30° و 0° و 30° درجة.

الاستنتاجات:

- وفي نهاية هذا العمل لا بد من التأكيد على بعض النتائج التي تم الحصول عليها:
- تتبع مساحة ظل اللوح لكل من زاويتي ميله وسمته إلا أن تأثير زاوية سمت كبير جداً.
 - تتفق النتائج الحسابية التي يعطيها النموذج النظري المقترح مع النتائج التجريبية بشكل جيد إذ ليزيد الفرق النسبي عن 6% في أسوأ الأحوال.
 - يوجد مجال لزوايا ميل اللوح تتعدم فيها مساحة ظله ضمن ظروف محددة.
 - عند انعدام سمت اللوح تتغير زاوية الظل اللاقط بشكل متناظر بالنسبة للظهيرة الشمسية.
 - بشكل عام يمكن القول إن تبعية اتجاه الظل لزوايا الميل ضعيفة وتتوافق تماماً مع زاوية سمت الشمس في حالة اللوح الشاقولي خلال فترة السطوع على اللوح.

.....

1. Marie-Claude Dubois, Solar Energy and Building Use, Lund University, Lund Institute of Technology, Department of Building Science, Sweden, Report TABK-97/3049 (1997).
2. Appelbaum J. and Bany J., Shadow effect on adjacent solar collectors in large scale system, Solar Energy 23, No.6, pp.497-507(1979).
3. Utzinger D. M. and Klein S. A., A method of estimating monthly average solar radiation on shaded receivers, Solar Energy 23, No.5, pp.369-378(1979).
4. **Sharp K., Calculation of monthly average insolation on shaded surface at any tilt and azimuth, Solar Energy 28, pp.531-538(1982).**
5. Kovach A. and Schmid J., Determination of energy output losses due to shading of building-integrated photovoltaic arrays using a ray-tracing technique, Solar Energy 57, No. 2, pp. 117-124 (1996).
6. Jones Jr. R. E. and Bukhart J. F., Shading effects of collector rows tilted towards the equator, Solar Energy 26, pp.563-565(1981).
7. Elsayed M. M., Monthly-Averaged Daily Shading Factor for a Collector field, Solar Energy 47, No.4, pp. 287-297(1991).
8. Elsayed M. M. and Al-Turki A. M., Calculation of shading factor for a collector field, Solar Energy 47, No.6, pp. 413-424(1991).
9. Budin R. and Budin L., A mathematical model for shading calculations, Solar Energy 29, No. 4, pp. 339-349 (1982).
10. Sassi G., Some notes on shadow and blockage effects, Solar Energy 31, No. 3, pp. 331-333 (1983).
11. Niewianda A. and Heidt F. D., SOMBRERO: a PC-tool to calculate shadows on arbitrarily oriented surfaces, Solar Energy 58, No. 4-6, pp. 253-263 (1996).
12. Sattler M. A., Sharples S. and Page J. K., The geometry of the shading of buildings by various tree shapes, Solar Energy 38, No. 3, pp. 187-201 (1987).
13. Gordon J. M. and Wenger H. J., Central-station solar photovoltaic systems: field layout, tracker, and array geometry sensitivity studies, Solar Energy 46, no. 4, pp. 211-217 (1991).

14. Feldman J., Singer S. and Braunstein A., Solar cell interconnections and the shadow problem, *Solar Energy* **26**, no. 5, pp. 419-428 (1981).
15. Soulayman S. Sh. and Shamiyah S., Solar declination, geographic latitude and orientations measurements in Syria, *Proceedings of ENERGEX 2000*, July 23-28, 2000, Las Vegas, Nevada, USA.
16. Duffie J. A. and Beckman W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, Jone Wiley and Sons, New York (1991).
17. Shamiyah S., *The Design and Construction of Solar Tracker*, Theses Master dissertation, Damascus University, 1998.
18. Soulayman S. Sh., *On the Optimum Tilt of Solar Absorber Plates*, *Renewable Energy* **1**, No.3/4, pp.551-554 (1991).