

GÜNEŞ ENERJİSİ TOPLAYICILARINDA EĞİM VE YÖNLENDİRMENİN YARARLANABİLİRLİĞE ETKİSİ

Erkan KAÇAN¹, Koray ÜLGEN²

¹Pamukkale Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 20100 Kınıklı/Denizli, Türkiye

²Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Enerji Teknolojisi, 35100 Bornova/İzmir, Türkiye
erkankacan@pau.edu.tr, koray.ulgen@ege.edu.tr

(Geliş/Received: 23.11.2011; Kabul/Accepted: 29.08.2012)

ÖZET

Bu çalışmada, İzmir ilinde yatay yüzey üzerine gelen, günlük toplam ve yayılı güneş ışınım değerleri ölçülerek, güneş enerjisi toplayıcılarının optimum eğim açısı, zamana bağlı olarak 0° ile 61° arasında hesaplanmıştır. Kış aylarında optimum eğim açısının $55,7^{\circ}$, ilkbahar ve sonbahar aylarında $18,3^{\circ}$ - 43° , yaz aylarında ise $4,3^{\circ}$ olduğu ortaya konmuştur. Bütün yıl boyunca sabit optimum eğim açısı değeri ise $30,3^{\circ}$ olarak elde edilmiştir. Ölçülen bu değerler, optimum eğim açısı hesaplama yöntemleriyle karşılaştırılmış ve $2,87^{\circ}$ ile $5,9^{\circ}$ arasında değişen sapmalar gözlenmiştir. 3° 'nin üzerinde gözlenen sapmaların elde edildiği eşitliklerin uygun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bütün aylar için, optimum eğim açısına ayarlanmış güneş enerjisi toplayıcılarının optimum yüzey azimut açısı (γ) değeri 0° bulunmuştur. Güneş ışınımından en fazla faydalanmak için, Nisan ayında, eğim açısı ($\beta \geq 60^{\circ}$) seçilen toplayıcılarda ($\gamma = \pm 60^{\circ}$), Mayıs ve Ağustos aylarında eğim açısı ($\beta \geq 40^{\circ}$) seçilen toplayıcılarda ($\gamma = \pm 75^{\circ}$), Haziran ve Temmuz aylarında eğim açısı ($\beta \geq 30^{\circ}$) seçilen toplayıcılarda ($\gamma = \pm 90^{\circ}$), Eylül ayında ise eğim açısı ($\beta \geq 70^{\circ}$) seçilen toplayıcılarda ($\gamma = \pm 45^{\circ}$) olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi toplayıcısı, optimum eğim açısı, yüzey azimut açısı, açıklık endeksi, güneş ışınımı.

EFFECT OF COLLECTOR SLOPE AND ORIENTATION ON SOLAR ENERGY UTILIZATION

ABSTRACT

The study is based upon the measured values of daily global and diffuse solar radiation on a horizontal surface which are taken in Izmir, Turkey. The optimum tilt angle of solar collector is determined between 0° and 61° and changed by the time period through the year. In winter (December, January, and February) the tilt should be $55,7^{\circ}$, in spring (March, April, and May) $18,3^{\circ}$, in summer (June, July, and August) $4,3^{\circ}$, and in autumn (September, October, and November) 43° . Annually, optimum tilt is found to be $30,3^{\circ}$ as a fixed tilt throughout the year. Also, these measured values are compared with other equations put forward for calculating the optimum tilt angles. Small deviations are observed between $2,87^{\circ}$ and $5,90^{\circ}$. The equations that give a result higher than 3° as a deviation are not suitable to calculate the optimum tilt angle. If solar collector is installed on the monthly optimum tilt angle, optimum azimuth angle (γ) has to be 0° for all months of the year. However, azimuth angle of the solar collector has to be ($\gamma = \pm 60^{\circ}$) if the slope is chose ($\beta \geq 60^{\circ}$) in April. In addition, azimuth angle of the solar collector has to be ($\gamma = \pm 75^{\circ}$) if the slope is chose ($\beta \geq 40^{\circ}$) in May and August, azimuth angle of the solar collector has to be ($\gamma = \pm 90^{\circ}$) if the slope is chose ($\beta \geq 30^{\circ}$) in June and July, azimuth angle of the solar collector has to be ($\gamma = \pm 45^{\circ}$) if the slope is chose ($\beta \geq 70^{\circ}$) in September.

Key Words: Solar collector, optimum tilt angle, surface azimuth angle, clearness index, solar radiation.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkiye bütün yıl boyunca yüksek güneş ışınımı seviyesine sahiptir. Günlük güneşlenme süresi ve güneş enerjisi yoğunluğu ortalama değerleri 7,2 saat, 12,96 MJ/m²gün'dür [1]. Türkiye'nin brüt güneş enerjisi potansiyeli 88 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP)'tir. Bu potansiyelin % 40'ı ekonomik olarak kullanılabilir ve $\frac{3}{4}$ 'ü, etkin termal kullanım ve elektrik üretimi için uygundur [2]. Bu yüksek potansiyele ve kullanılmayan yenilenebilir enerji kaynaklarına rağmen Türkiye enerji ithal eden ülke konumundadır. 2009 yılı itibarıyla Türkiye, 30,3 MTEP birincil enerji üretimi, 82,1 MTEP enerji ithalatı ve 6,6 MTEP enerji ihracatı değerlerine sahiptir. 1986'daki güneş enerjisi üretim değeri 5000 TEP'ten, 2005 yılında 385000 TEP'e ulaşmış ve 2025 projeksiyonunda bu değerin 5,5 MTEP (birincil enerji üretim değerinin % 5,5'i) değerine ulaşacağı öngörülmüştür [3]. Türkiye'nin en yaygın ısı güneş enerjisi uygulaması, kullanım sıcak suyu elde etmek için kullanılan düzlemsel toplayıcılarıdır. 2005 yılı itibarıyla 11 milyon m² kurulu toplayıcı alanından 0,4 MTEP ısı enerji elde edilmektedir [4].

Güneş toplayıcıları, güneş ışınımını yutan, yuttukları enerjiyi ısı transfer akışkanına minimum kayıpla aktaran ünitelerdir. Toplayıcıların performanslarının belirlenmesi için yutulan enerji miktarının ve ısı kayıplarının önemi büyüktür. Bir toplayıcının etkinliğinde yaygın olarak optik ve geometrik özellikleri belirleyicidir. Diğer belirleyici unsurlar da toplayıcının yatay düzlemle yaptığı eğim ve yönlendirmesinin belirlendiği yüzey azimut açısıdır. Kuzey yarım kürede optimum yüzey azimut açısı genellikle güney yönde ($\gamma=0^\circ$) olarak bilinmekte, optimum eğim açısı ise enlem ve deklinasyon açısına göre değişmektedir. Bazı araştırmacılar, kuzey yarım kürede optimum eğim açısını $\beta_{opt} = \phi \pm 15^\circ$ olarak tanımlamışlardır [5-7]. Duffie ve Beckman [8] bu değer ($\phi + 15^\circ$) $\pm 15^\circ$ arasında olması gerektiğini belirtmiştir. Bazı çalışmalarda optimum eğim açısı için enleme bağlı değişik öneriler getirilmiştir [9,10]. El-Naggar [11] ısıtma sezonunda bu değer $\approx 30^\circ$ ($\beta_{opt} = \phi + 10^\circ$) olduğu sonucuna ulaşmıştır. Elasyed [12] düzlemsel toplayıcılarda tek ve çift cam uygulamasının optimum eğim ve yüzey azimut açısını etkilemediğini ortaya koymuş, eğim açısındaki $\pm 10^\circ$ değişimin aylık yutulan güneş ışınım değerini % 3'ten daha az etkilediğini belirtmiştir.

Bu çalışmalar ek olarak Tırıs ve Tırıs [13,14], optimum eğim açısının hesaplanması için, yayılı ışınımın toplam ışınım oranına (H_d/H), açıklık indeksine (K_T) ve deklinasyon açısına bağlı (δ) eşitlikler geliştirmiştir. Gebze için optimum eğim açısı değerleri $\beta_{opt,yıllık} = 33^\circ$, $\beta_{opt,ilkbahar} = 21,3^\circ$, $\beta_{opt,yaz} = 6,3^\circ$, $\beta_{opt,sonbahar} = 47,4^\circ$, $\beta_{opt,kış} = 58^\circ$ olarak bulunmuştur. Bari [15,16] enlemi 1-7° K arasında olan Malezya'da, kurutma ve tuz distilasyonu için kullanılan toplayıcıların optimum eğim açılarını hesaplamış, Haziran-Temmuz döneminde $\beta_{opt} = 25^\circ$,

Ekim-Ocak döneminde $\beta_{opt} = 32^\circ$, Temmuz-Eylül döneminde $\beta_{opt} = 15^\circ$ değerlerini bulmuştur. Yakup ve Malik [17] enlemi 4,9° K olan Brunei'de her ayın sabah, öğle ve öğleden sonra periyodunda optimum eğim açılarını elde etmiştir. Lewis [18] optimum eğim açısı için $\beta_{opt} = \phi \pm 8^\circ$ değerine uygun iki farklı teorik model geliştirmiştir.

Bununla beraber, isotropic ve anisotropic güneş ışınım modeli kullanılarak, optimum eğim açısı hesaplanan korelasyonlar ortaya konmuştur [13, 19-22]. Bazı çalışmalarda [23-40], yerel toplayıcı konumuna bağlı olarak düzlemsel toplayıcıların, vakum tüplü güneş toplayıcılarının ve PV'lerin optimum eğim açısı ile optimum eğim açısının güneş enerjisinden faydalanma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Güneş enerjili, hava-tutuculu "toplayıcı pencere" sisteminin, ısı performansının incelenmesi ile ilgili çalışmada, sabit eğim açıları 0° ve 50° olarak seçilmiştir [41].

Bu çalışmanın amacı, İzmir ilinde eğimli yüzeye gelen toplam güneş ışınımının ve düzlemsel toplayıcılar için optimum eğim ve yüzey azimut açısının belirlenmesidir. Bununla beraber, optimum eğim açısı durumunda ve bu durumun dışında yüzey azimut açısının ve güneş ışınım değerlerinin davranışının incelenmesi hedeflenmektedir. Bu amaç doğrultusunda, 1993 yılından itibaren saatlik bazda alınan ölçümlere dayanarak, farklı eğim ve azimut açılara yerleştirilecek toplayıcılarda aylık, mevsimlik ve yıllık toplam güneş ışınım değerlerinin değişimi hesaplanarak güneş enerjisinden yararlanabilirlik incelenmiştir. Optimum eğim ve yüzey azimut açısının belirlenmesi için ölçülen değerler, Tırıs ve Tırıs [13] ile Ertekin ve arkadaşlarının [34] ortaya koyduğu eşitlikler ile karşılaştırılmıştır.

2. YÖNTEM (METHOD)

2.1. Ölçüm verileri (Measured Data)

Güneş enerjisi ile ilgili veriler, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü çatısına yerleştirilen ve Dünya Meteoroloji Örgütü'nün baz aldığı ISO 9060:1990(E) standardına göre $38^\circ 28' K$, $27^\circ 13' D$ ve $27m$ yükseklikte kurulan "Meteoroloji İstasyonu" ile ölçülmüştür. Veriler Ekim-1993, Kasım-2011 arasında anlık olarak alınmış, saatlik ortalamalara dönüştürülmüş ve ışınım değerleri, yatay düzlemde aylık ortalama "toplam" (H) ve "yayılı ışınım" (H_D) olarak aylık ortalama açıklık indeksi (K_T) ile birlikte Tablo 1.'de verilmiştir. Yatay düzlemde aylık ortalama "atmosfer dışı ışınım" (H_0) değeri Eş. (17) yardımı ile hesaplanıp, Tablo 1'e eklenmiştir.

2.2. Hesaplama Algoritması (Algorithm of Calculation)

Güneş enerjisi çevrim sistemlerinin tasarımında en önemli parametre ışınım değerleridir. Güneş ışınım verileri genellikle iki şekilde ölçülmektedir; yatay düzlemde aylık ortalama günlük toplam güneş ışınım

değeri (H) ve yatay düzlemde saatlik toplam güneş ışınım (I) değeridir [8]. Eğimli yüzeydeki toplam ışınım (H_T), direkt ışınım (H_B), yayılı ışınım (H_D) ve yansıyan ışınımın (H_R) toplamından oluşur. Bu nedenle eğimli yüzeydeki anlık toplam güneş ışınım değeri Eş. (1) ile ifade edilir;

$$H_T = H_B + H_D + H_R \quad (1)$$

Eğimli yüzeydeki günlük direkt ışınım değeri, eğimli yüzeydeki direkt ışınımın yatay düzlemdeki direkt ışınımına oranına (R_b) bağlı olarak Eş. (2)'deki gibi ifade edilir;

$$H_B = (H - H_D)R_b \quad (2)$$

“ R_b ” bulutluluk indeksine, su buharı ve atmosferik partikül yoğunluğuna bağlı, atmosfer geçirgenliğinin bir fonksiyonudur. Liu ve Jordan [42], ekvatora yönlendirilmiş yüzeylerde “ R_b ” değerinin hesaplanması için; atmosfer dışı ışınımın eğimli yüzeydeki değerinin yatay düzlemdeki değerine bölünmesini önermiştir (3);

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega_s' + (\pi/180)\omega_s' \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180)\omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (3)$$

“ ω_s' ” eğimli yüzeydeki güneş batış açısıdır (4);

$$\omega_s' = \min \left[\begin{array}{l} \omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta) \end{array} \right] \quad (4)$$

Liu ve Jordan [41] yöntemi Eş. (5)'teki gibi genişletilerek ekvatora yönlendirilmeyen yüzeyler için de kullanılabilir hale getirilmiştir;

$$R_b = \frac{\left\{ \begin{array}{l} (\cos \beta \cos \delta \sin \phi (\omega_{ss} - \omega_{sr})(\pi/180)) \\ - (\sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma (\omega_{ss} - \omega_{sr})(\pi/180)) \\ + (\cos \phi \cos \delta \cos \beta (\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr})) \\ + (\sin \phi \cos \delta \sin \beta \cos \gamma (\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr})) \\ - (\cos \delta \sin \beta \sin \gamma (\cos \omega_{ss} - \cos \omega_{sr})) \end{array} \right\}}{2(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180)\omega_s \sin \phi \sin \delta)} \quad (5)$$

“ γ ” (yüzey azimut açısı), yüzey normali ile yerel meridyen arasındaki açıyı ifade eder, güneye yönlendirilen yüzeyler “0” noktası, doğu yön negatif, batı yön ise pozitif değer alır. “ ω_{sr} ” ve “ ω_{ss} ” eğimli yüzeylerde güneş doğuş ve güneş batış saat açısını ifade eder, matematiksel gösterimde “A” ve “B” değişkenleri için Eş. (10) ve (11) tanımlanmıştır;

Eğer $\gamma < 0$ ise,

$$\omega_{sr} = -\min \left\{ \omega_s, \arccos \left[\frac{(AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1})}{(A^2 + 1)} \right] \right\} \quad (6)$$

$$\omega_{ss} = \min \left\{ \omega_s, \arccos \left[\frac{(AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1})}{(A^2 + 1)} \right] \right\} \quad (7)$$

Eğer $\gamma > 0$ ise,

$$\omega_{sr} = -\min \left\{ \omega_s, \arccos \left[\frac{(AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1})}{(A^2 + 1)} \right] \right\} \quad (8)$$

$$\omega_{ss} = \min \left\{ \omega_s, \arccos \left[\frac{(AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1})}{(A^2 + 1)} \right] \right\} \quad (9)$$

$$A = \frac{\cos \phi}{(\sin \gamma \tan \beta)} + \frac{\sin \phi}{\tan \gamma} \quad (10)$$

$$B = \tan \delta \left[\frac{\cos \phi}{\tan \gamma} - \frac{\sin \phi}{(\sin \gamma \tan \beta)} \right] \quad (11)$$

İsotropik yansıma kabulü ile günlük yansıyan ışınım değeri, “ β ” eğim açısı ve “ ρ ” yer yansıma katsayısına ($\approx 0,2$) bağlı olarak Eş. (12)'deki gibi ifade edilir [42];

$$H_R = H\rho(1 - \cos \beta)/2 \quad (12)$$

Eş. (1) açık olarak yazılırsa; aylık ortalama güneş ışınım değeri için Eş. (13), Eş. (15)'te verilen “R” tanımlamasıyla Eş. (14) elde edilir;

$$H_T = (H - H_D)R_b + \frac{H_D}{2}(1 + \cos \beta) + \frac{H\rho}{2}(1 - \cos \beta) \quad (13)$$

$$H_T = RH = RK_T H_o \quad (14)$$

“R” değişkeni günlük ortalama ışınımın eğimli yüzeydeki değerinin yatay düzlemdeki değerine oranıdır. Bu nedenle, günlük ortalama direkt, yayılı ve yansıyan ışınım değerlerine bağlı olarak, isotropic yansıma kabulü ile Eş. (15) elde edilir [42].

$$R = \left(1 - \frac{H_D}{H} \right) R_b + \frac{H_D}{2H}(1 + \cos \beta) + \frac{\rho}{2}(1 - \cos \beta) \quad (15)$$

Aylık ortalama açıklık indeksi “KT”, yatay düzlemdeki aylık ortalama günlük ışınım (H) değerinin aylık ortalama günlük atmosfer dışı ışınım (H_0) değerine oranıdır [8];

$$K_T = \frac{H}{H_o} \quad (16)$$

“ H_0 ”, güneş sabiti ($G_{sc}=1367 \text{ W/m}^2$ [8]), enlem (ϕ), deklinasyon (δ), güneş saat açısı (ω_s) ve yıl içindeki gün sayısına (n) bağlı olarak (17) ve (18)'deki gibi hesaplanabilir;

$$H_o = \frac{24}{\pi} G_{on} \left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \phi \sin \delta \right] \quad (17)$$

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n_{day}}{365} \right) \right) \quad (18)$$

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Aylık ve mevsimsel optimum eğim açısındaki güneş ışınım değerleri

(Monthly solar radiation at optimum tilt angle values for each month-season)

Tablo 1’de görüldüğü gibi toplam güneş ışınım, yayılı ışınım ve açıklık indeks değerleri; (6,07-27,07 MJ/m²gün), (2,71-10,54 MJ/m²gün) ve (0,41-0,66) arasındadır. Güneye yönlendirilmiş düzlemler, 0°-90° arasında 1°’lik basamaklarla eğimi değiştirilerek ortalama günlük toplam ışınım değerleri hesaplanmış

ve eğim açısı ile ortalama günlük ışınım değerine bağlı eğri grafikleri çizilmiştir.

Eğrilerin maksimum değerlerini ifade eden ekstremum noktalarından, güneye yönlendirilmiş düzlemler için aylara bağlı optimum eğim açısı değerleri elde edilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde, optimum eğim açılarının yıl boyunca 0° (Haziran) ile 61° (Aralık) arasında değerler aldığı görülmektedir. Kış döneminde (Aralık-Ocak-Şubat) optimum eğim açısı 55,7°, ilkbahar döneminde (Mart-Nisan-Mayıs) 18,3°, yaz döneminde (Haziran-Temmuz-Ağustos) 4,3° ve sonbahar döneminde (Eylül-Ekim-Kasım) 43° elde edilmiştir. Optimum eğim açısının yıllık ortalama değeri, yıl boyunca sabit yüzeyler için 30,3° bulunmuştur.

Tablo 1. İzmir için aylık ortalama günlük H₀, H, H_D, K_T değerleri (Monthly Mean Daily H₀, H, H_D, K_T Values for Izmir)

Aylar	H ₀	H	H _D	K _T
	(MJ/m ² gün)	(MJ/m ² gün)	(MJ/m ² gün)	(-)
Ocak	16,20	7,35	3,20	0,45
Şubat	21,16	10,42	4,51	0,49
Mart	28,12	14,48	6,29	0,51
Nisan	35,04	19,27	8,24	0,55
Mayıs	39,79	23,26	9,71	0,58
Haziran	41,69	27,07	10,54	0,65
Temmuz	40,65	26,75	10,32	0,66
Ağustos	36,71	23,38	9,22	0,64
Eylül	30,42	18,64	7,35	0,61
Ekim	23,18	13,08	5,06	0,56
Kasım	17,28	8,50	3,46	0,49
Aralık	14,69	6,07	2,71	0,41

Tablo 2. İzmir’de aylık-mevsimlik ve yıllık optimum eğim açısı ve (γ=0) konumundaki toplayıcılarda ölçülen ışınım değerleri (Annual, Seasonal and Monthly Optimum Tilt Angle and Radiation Values Measured on (γ=0) Collectors in Izmir)

Aylar	β _{opt} (°)	H _{opt} (MJ/m ² gün)	Mevsimler	Mevsimlik ortalama		Yıllık ortalama	
				β (°)	H (MJ/m ² gün)	β (°)	H (MJ/m ² gün)
Aralık	61	10,81	Kış	55,7	10,77	30,3	9,54
Ocak	58	12,29			12,28		11,09
Şubat	48	14,45			14,36		13,86
Mart	34	16,81	İlkbahar	18,3	16,29	30,3	16,78
Nisan	17	19,46			19,45		19,05
Mayıs	4	23,51			22,94		21,61
Haziran	0	27,07	Yaz	4,3	26,96	30,3	23,80
Temmuz	1	26,59			26,55		23,88
Ağustos	12	23,78			23,62		22,82
Eylül	28	20,92	Sonbahar	43,0	20,38	30,3	20,91
Ekim	45	17,67			17,66		17,16
Kasım	56	13,98			13,65		12,74

Bulut yaptığı çalışmada, İzmir iline ait optimum eğim açısı için yıllık ortalama 38°, Kış ortalama 53°, Yaz ortalama 23° değerlerini önermiştir. Bu durum en yüksek güneş ışınım değerini elde etmek için

ölçümlerle karşılaştırıldığında; Yaz ayları için 5-15°, Kış ayları için 50-60° geçiş ayları olan Nisan ve Eylül için 20-30° aralığı hesaplanmıştır [43]. Fıratoglu ve Yeşilata yaptıkları çalışmada her bir ay için düzlemsel

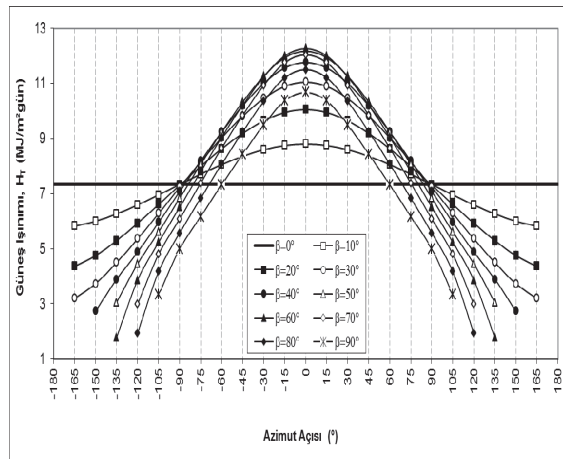
PV panellerin optimum eğim açısı değerlerini Ocak ayından başlayarak sırasıyla; 55°, 48°, 34°, 19°, 5°, 0°, 0°, 14°, 31°, 46°, 55°, 57° olarak seçmiş ve uygulamalarında kullanmışlardır [44]. Bu çalışma ile ilgili çalışmalar karşılaştırıldığında; Ref [43]'te Kış ve Yaz dönemi için bu çalışmadaki değerler ile çok yakın değerler elde edilmiş ancak yıllık ortalama değerlerdeki farklılık mevsim geçiş dönemlerinin farklılığından kaynaklanmıştır [43]. Ref [44]'te kullanılan aylık optimum değerler bu çalışmada elde edilen değerler ile çok yüksek benzerlik göstermektedir.

3.2. Farklı eğim ve azimut açlarındaki aylık güneş ışınım değerleri

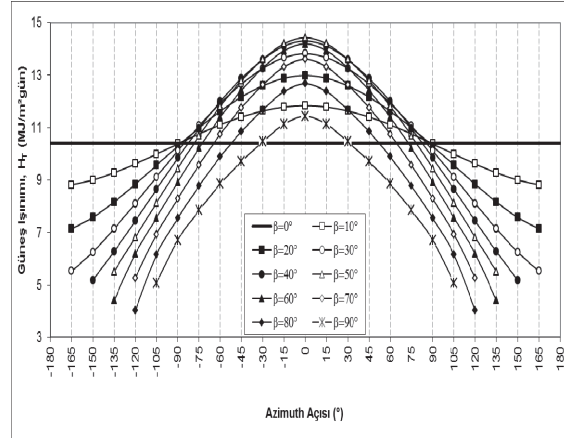
(Monthly solar radiation for different tilt and azimuth angle values)

Bu çalışmanın temel hedeflerinden biri de güneş ışınım değerlerinin, farklı eğim açlarındaki yüzey azimut açısı değişimine göre gösterdiği davranışı incelemektir. Şekil 1 aylık ortalama günlük toplam güneş ışınım değerlerinin yüzey azimut açısına göre değişimini göstermektedir. Şekil 1, yılın bütün aylarında, aylık optimum eğim açısına konumlandırılmış eğimli yüzeyler için optimum yüzey azimut açısı değerinin 0° olduğunu ortaya koymaktadır.

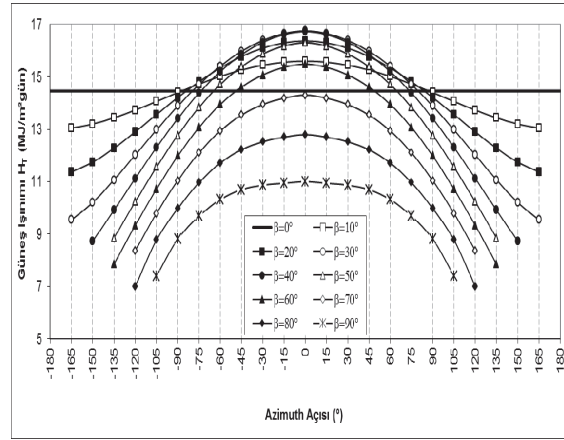
Bütün yıl boyunca kullanımda olan düzlemsel toplayıcılar için optimum eğim ve yüzey azimut açısı değerleri yukarıda verilmiştir. Ancak güneş toplayıcıları çok değişik amaçlarla kullanılmakta (kurutma, ısıtma, soğutma, elektrik üretimi v.b), bu amaç kullanım zamanını, uygulama yerini ve şeklini belirlemektedir.



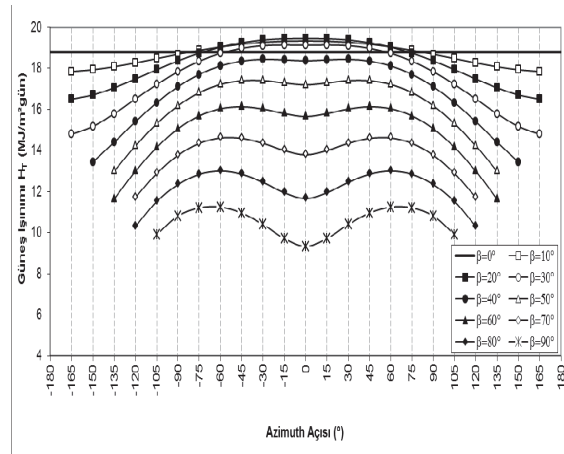
(a) Ocak (January)



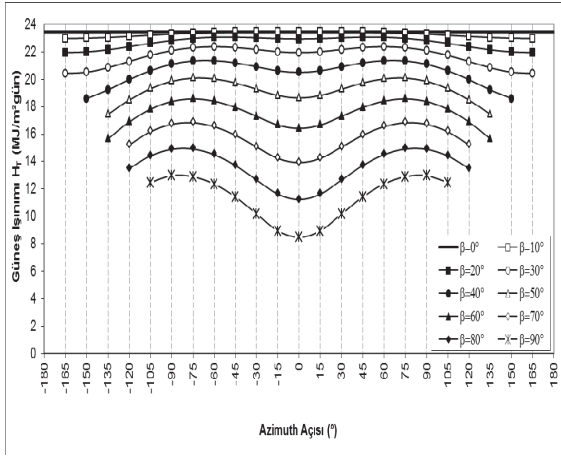
(b) Şubat (February)



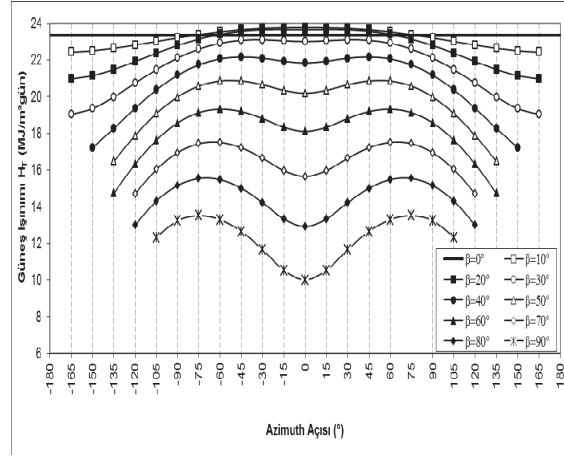
(c) Mart (March)



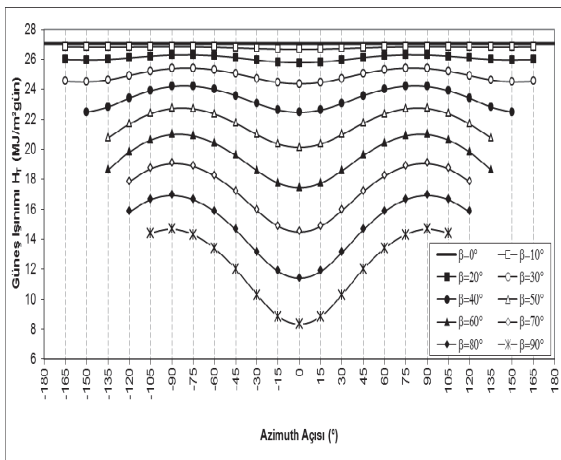
(d) Nisan (April)



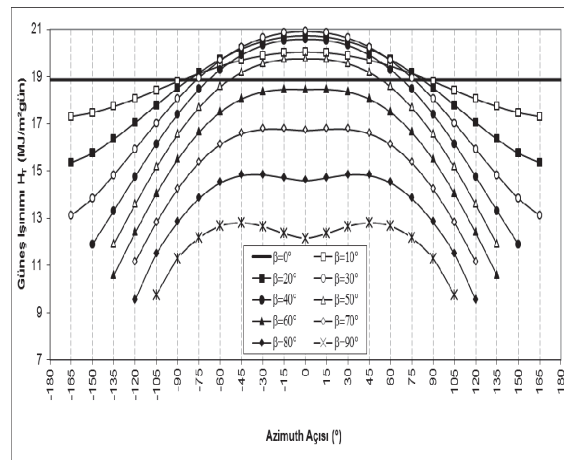
(e) Mayıs (May)



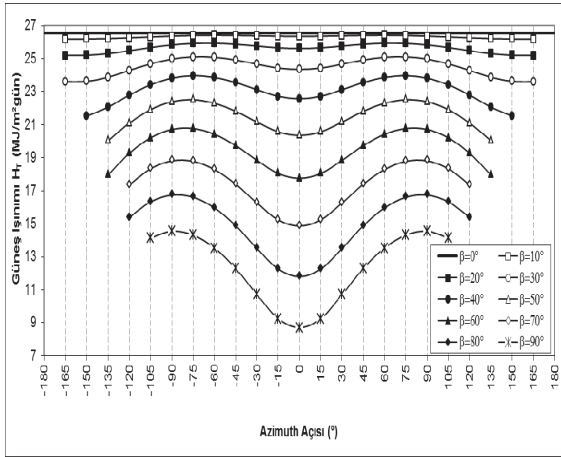
(h) Ağustos (August)



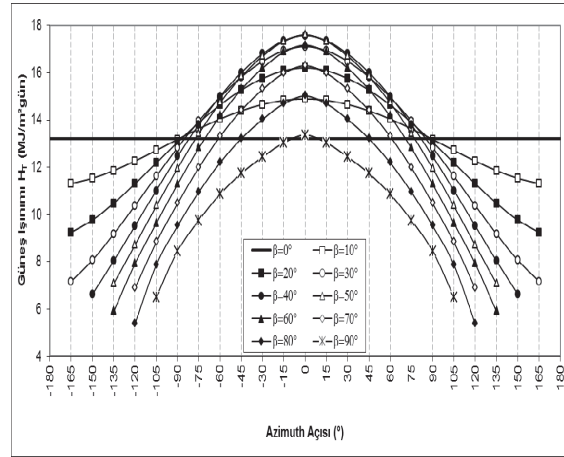
(f) Haziran (June)



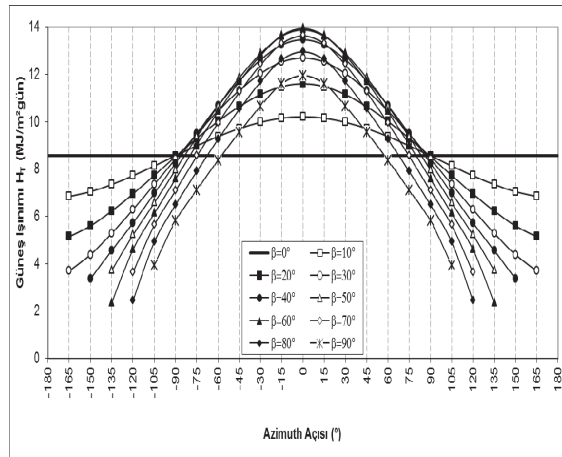
(i) Eylül (September)



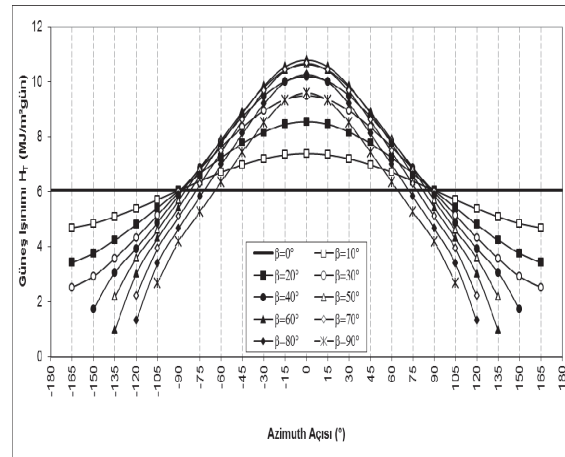
(g) Temmuz (July)



(j) Ekim (October)



(k) Kasım (November)



(l) Aralık (December)

Şekil 1. Farklı eğim açıları için, yüzey azimut açısına bağlı aylık ortalama günlük toplam güneş ışınım değişimi
(Change of Monthly Mean Daily Total Solar Radiation Depends on Azimuth Angle for Different Tilt Angles)

Buna göre toplayıcının kullanım zamanına, uygulama yerine ve şekline bağlı olarak optimum eğim ve yüzey azimut açıları aşağıdaki gibi seçilmelidir;

- Nisan ayında eğim açısı ($\beta \geq 60^\circ$) olarak konumlandırılmış toplayıcıların yüzey azimut açısı ($\gamma = \pm 60^\circ$) (Şekil 1d),
- Maksimum faydalanma için Mayıs ve Ağustos aylarında eğim açısı ($\beta \geq 40^\circ$) olarak konumlandırılmış toplayıcıların yüzey azimut açısı ($\gamma = \pm 75^\circ$) (Şekil 1e ve h),
- Haziran ve Temmuz aylarında eğim açısı ($\beta \geq 30^\circ$) olarak konumlandırılmış toplayıcıların yüzey azimut açısı ($\gamma = \pm 90^\circ$),
- Eylül ayında eğim açısı ($\beta \geq 70^\circ$) olarak konumlandırılmış toplayıcıların yüzey azimut açısı ($\gamma = \pm 45^\circ$) olarak seçilmelidir.

3.3 Optimum eğim açısı değerlerinin eşitliklerle karşılaştırılması (Comparison of optimum tilt angle values with the correlations)

Tırıs ve Tırıs [13] ile Ertekin ve arkadaşları [34] çalışmalarında optimum eğim açısının hesaplanması

için eşitlikler geliştirmiştir. Tırıs ve Tırıs [13] 40,75°K enlemindeki Gebze bölgesi için (H_d/H), (K_T) ve (δ) parametrelerine bağlı 11 eşitlik geliştirmiş, bunlardan dört tanesi Eş. (19-22) seçilerek karşılaştırmalarda kullanılmıştır. Ayrıca Ertekin ve arkadaşlarının [34] Türkiye geneli için, (ϕ), (n) parametrelerine bağlı geliştirdikleri Eş. (23) de karşılaştırmalarda kullanılmıştır;

$$\beta_{opt.} = 33,24 - 1,31(\delta) \quad (19)$$

$$\beta_{opt.} = 35,15 - 1,37(\delta) - 0,007(\delta)^2 \quad (20)$$

$$\beta_{opt.} = 35,15 - 1,39(\delta) - 0,007(\delta)^2 - 4,26 \times 10^{-5}(\delta)^3 \quad (21)$$

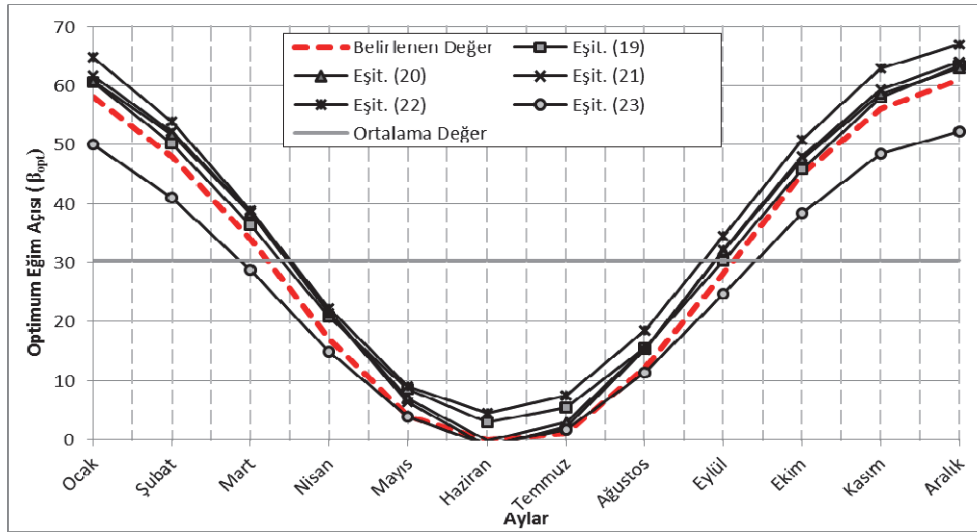
$$\beta_{opt.} = 22,09 + 25,79(K_T) - 1,49(\delta) \quad (22)$$

$$\beta_{opt.} = 25,521438 + 26,838291 \cos(-0,017844\phi + 1,013901n + 7,527742) \quad (23)$$

Yukarıdaki eşitliklerle elde edilen optimum eğim açısı değerleri ile belirlenen değerler arasında küçük farklılıklar vardır (Tablo 3). Şekil 2.'de belirlenen ve hesaplanan optimum eğim açısı değerleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 3. Optimum eğim açısı için belirlenen ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması (Comparison of Measured Tilt Angles with Calculated Values)

Aylar	Belirlenen değerler	Hesaplanan Değerler									
		Denk.(19)	Sapma	Denk.(20)	Sapma	Denk.(21)	Sapma	Denk.(22)	Sapma	Denk.(23)	Sapma
		($^\circ$)	($^\circ$)	($^\circ$)	($^\circ$)	($^\circ$)	($^\circ$)	($^\circ$)	($^\circ$)	($^\circ$)	($^\circ$)
Ocak	58	61	3	61	3	62	4	65	7	50	8
Şubat	48	50	2	52	4	52	4	54	6	41	7
Mart	34	36	2	38	4	39	5	39	5	29	5
Nisan	17	21	4	22	5	22	5	22	5	15	2
Mayıs	4	9	5	7	3	6	2	9	5	4	0
Haziran	0	3	3	0	0	-1	-1	4	4	-1	1
Temmuz	1	5	4	3	2	2	1	8	7	2	-1
Ağustos	12	16	4	15	3	15	3	19	7	11	1
Eylül	28	30	2	32	4	32	4	35	7	25	3
Ekim	45	46	1	48	3	48	3	51	6	38	7
Kasım	56	58	2	59	3	59	3	63	7	49	7
Aralık	61	63	2	63	2	64	3	67	6	52	9
Ortalama	30,33	33,21	2,87	33,25	2,91	33,35	3,01	36,24	5,90	26,25	4,09



Şekil 2. Belirlenen ve hesaplanan optimum eğim açısı değişimleri (Behaviors of Measured and Calculated Optimum Tilt Angles)

4.SONUÇ ve ÖNERİLER (RESULTS AND RECOMENDATIONS)

Ortaya koyulan sonuçların ışığında aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir;

1. 0°'den 90°'ye kadar 1°'lik basamaklarla eğimi değiştirilen; azimut açısı "0°" olacak şekilde yönlendirilmiş yüzeylerde ortalama günlük toplam ışınım değerleri, yatay düzlemde ölçülen ışınım değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.
2. Optimum eğim açısının minimum değeri Haziran ayında 0° olmuş, bu değerde aylık ortalama günlük toplam ışınım değeri 27,07 MJ/m²gün olarak ölçülmüştür. Optimum eğim açısının maksimum değeri Aralık ayında 61° olmuş, bu değerde aylık ortalama günlük toplam ışınım değeri 10,81 MJ/m²gün olarak ölçülmüştür. Aylık optimum eğim ve yüzey azimut açısı konumlamasıyla 6,82 GJ/m²yıl güneş enerjisi toplanmıştır.
3. Ortalama optimum eğim açısı yaz aylarında 4,3° ($\approx \phi - 34^\circ$), kış aylarında ise 55,7° ($\approx \phi + 19^\circ$) değer almış, mevsimsel optimum eğim ve yüzey azimut

açısı konumlamasıyla 6,75 GJ/m²yıl güneş enerjisi toplanmıştır.

4. Yıllık ortalama optimum eğim açısı değeri 30,3° elde edilmiş, bu konumlama ile 6,4GJ/m²yıl güneş enerjisi toplanmıştır.
5. Optimum yönlendirme (yüzey azimut açısı) değeri eğim açısı ile değişim göstermektedir. Anlık optimum eğim açısına konumlandırılan yüzeylerin optimum yönlendirme açısı $\gamma=0$ elde edilmiş, eğimdeki değişimin yönlendirmeye etkisi belirtilmiştir.
6. Belirlenen ve hesaplanan optimum eğim açısı değerleri arasında yaklaşık 3,75°'lik sapmalar gözlenmiştir. En yüksek sapma 5,9° ile Eş. (22), en düşük sapma 2,87° ile Eş. (19)'da gözlenmiştir.

Sonuç olarak Eş. (19), (20) ve (21)'in İzmir'de güneşe yönlendirilmiş düzlemsel toplayıcıların optimum eğim açısının hesaplanmasında kullanılmasının uygun olduğu, yıllık optimum eğim açısının "30,3°" bu eğimde optimum yüzey azimut açısı değerinin "0°" olması gerektiği ifade edilmiştir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

G_{on}	Atmosfer dışı güneş ışınımı (W/m^2)	K_T	Aylık ortalama açıklık indeksi
G_{sc}	Güneş sabiti ($=1367 W/m^2$)	n	Yıl içindeki gün sayısı
H	Yatay yüzeyde aylık ortalama günlük toplam ışınım (MJ/m^2 gün)	R	Günlük ortalama yatay düzlemdeki ışınımın eğimli yüzeydeki ışınım oranı
H_B	Yatay yüzeyde aylık ortalama günlük direkt ışınım (MJ/m^2 gün)	R_b	Ortalama yatay düzlemdeki direkt ışınımın eğimli yüzeydeki ışınım oranı
H_D	Yatay yüzeyde aylık ortalama günlük yayılı ışınım (MJ/m^2 gün)	β	Eğim açısı ($^\circ$)
H_o	Yatay yüzeyde aylık ortalama günlük atmosfer dışı ışınım (MJ/m^2 gün)	δ	Deklinasyon açısı ($^\circ$)
H_R	Yatay yüzeyde aylık ortalama günlük yansıyan ışınım (MJ/m^2 gün)	ϕ	Enlem ($^\circ$)
H_T	Eğimli yüzeyde aylık ortalama günlük toplam ışınım (MJ/m^2 gün)	γ	Yüzey azimut açısı ($^\circ$)
I	Yatay yüzeyde bir saatlik ortalama günlük toplam ışınım (MJ/m^2 gün)	ρ	Yansıma katsayısı ($\approx 0,2$)
		ω	Saat açısı ($^\circ$)
		ω_s, ω_{sr}	Aylık güneş saat açıları ($^\circ$)
		ω_s, ω_{ss}	Eğimli yüzeyde güneş batış saat açısı ($^\circ$)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- EİE., "Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli", <http://www.eie.gov.tr>, 2007.
- Ulgen, K., "Optimum tilt angle for solar collectors", **Energy Source Part A**, Cilt 28, 1171-1180, 2006.
- Enerji ve Doğal Kaynaklar Bakanlığı, <http://www.energy.gov.tr>, 2007.
- İnan, D., "Time to initiate new steps for conversions of solar energy", **Standard**, 36-39, 2006.
- Heywood, H., "Operational experience with solar water heating", **J. Inst Heat Vent Energy**, Cilt 39, 63-69, 1971.
- Lund, P.J., **Solar Thermal Engineering**, New York, Wiley, 1980.
- Garg, H.P., "Treatise on Solar Energy, Volume 1: Fundamentals of Solar Energy". New York, Wiley, 1982.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., **Solar Engineering of Thermal Processes**, New York, Wiley, 1991.
- Kern, J., Harris, L., "On the optimum tilt of a solar collector", **Solar Energy**, Cilt 17, No 2, 97-102, 1975.
- Iqbal, M., "Optimum collector slope for residential heating in adverse climates" **Solar Energy**, Cilt 22, No 1, 77-79, 1979.
- Chiou, J.P., El-Naggar, M.M., "Optimum slope for solar insolation on flat surface tilted toward the equator in heating season", **Solar Energy**, Cilt 36, No 5, 471-478, 1986.
- Elsayed, M.M., "Optimum orientation of absorber plates", **Solar Energy**, Cilt 42, 89-102, 1989.
- Tiris, M., Tiris, C., "Optimum collector slope and model evaluation: case study for Gebze, Turkey", **Energy Conversation and Management**, Cilt 39, No 3, 167-172, 1998.
- Tiris, M., Tiris, C., "Effect of collector orientation on solar energy availability", **Energy Conversation and Management**, Cilt 39, No 8, 843-852, 1998.
- Bari, S., "Optimum slope angle and orientation of solar collectors for different periods of possible utilization", **Energy Conversation and Management**, Cilt 41, 855-860, 2000.
- Bari, S., "Optimum orientation of domestic solar water heaters for the low latitude countries", **Energy Conversation and Management**, Cilt 42, 1205-1214, 2001.
- Yakup, M.A., Malik, A.Q., "Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam", **Renewable Energy**, Cilt 24, No 2, 223-234, 2001.
- Lewis, G., "Optimum tilt of solar collectors", **Solar and Wind Technology**, Cilt 4, No 3, 407-410, 1987.
- Gueymard, C., "An isotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms", **Solar Energy**, Cilt 38, 367-86, 1987.
- El-Kassaby, M.M., "Monthly and daily optimum tilt model, experimental and empirical correlations", **Solar and Wind Technology**, Cilt 5, No 6, 589-596, 1988.
- Nijegorodov, N., Devan, K.R.S., Jain, P.K., "Atmospheric transmittance models and an analytical method to predict the optimum slope on an absorber plate, variously orientated at any latitude", **Renewable Energy**, Cilt 4, No 5, 529-543, 1994.
- Al-Dabbas, M.A., "An experimental, mathematical model & computer program developed for isotropic and anisotropic modeling of tilt and azimuth angles of solar radiation in Amman, Jordan", **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, Cilt 2, No 4, 1186-1203, 2008.

23. Muschavek, J., Spirkl, W., Timinger, A., Benz, N., Dörfler, M., Gut, M., Köse, E., "Optimized reflectors for non-tracking solar collectors with tubular absorbers", **Solar Energy**, Cilt 68, No 2, 151-159, 2000.
24. Hartley, L.E., Martinez-Lozano, J.A., Utrillas, M.P., Tena, F., Pedrós, R., "The optimization of the angle of inclination of a solar collector to maximize the incident solar radiation", **Renewable Energy**, Cilt 17, 291-309, 1999.
25. Shariah, A., Al-Akhras, M.A., Al-Omari, I.A., "Optimizing the tilt angle of solar collectors", **Renewable Energy**, Cilt 26, 587-598, 2002.
26. Chow, T.T., Chan, A.S., "Numerical study of desirable solar collector orientations for coastal region of South China", **Applied Energy**, Cilt 79, 249-260, 2004.
27. Hussein, H.M.S., Ahmad, G.E., El-Ghetany, H.H., "Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations", **Energy Conversation and Management**, Cilt 45, 2441-2452, 2004.
28. Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., Demirkol, S., "Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey", **Renewable Energy**, Cilt 29, 1265-1275, 2004.
29. Elminir, H.K., Ghitas, A.E., El-Hussainy, F., Hamid, R., Beheary, M.M., Abdel-M, K.M., "Optimum solar flat-plate collector slope: case study for Helwan, Egypt", **Energy Conversation and Management**, Cilt 47, 624-637, 2006.
30. Shu, N., Kameda, N., Kishida, Y., Sonoda, H., "Experimental and theoretical study on the optimal tilt angle of photovoltaic panels", **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, Cilt 5, 399-405, 2006.
31. Li, D.H.W., Lam, T.N.T., "Determining the optimum tilt angle and orientation for solar energy collection based on measured solar radiance data", **International Journal of Photoenergy**, Cilt 85, 402-9, 2007.
32. Gunerhan, H., Hepbasli A., "Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications", **Building and Environment**, Cilt 42, 779-83, 2007.
33. Mondol, J.D., Yohanis, Y.G., Norton, B., "The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system", **Renewable Energy**, Cilt 32, 118-140, 2007.
34. Ertekin, C., Evrendilek, F., Kulcu, R., "Modeling spatio-temporal dynamics of optimum tilt angles for solar collectors in Turkey", **Sensors**, Cilt 8, 2913-2931, 2008.
35. Chang, T.P., "The Sun's apparent position and the optimal tilt angle of a solar collector in the northern hemisphere", **Solar Energy**, Cilt 83, 1274-1284, 2009.
36. Chang, T.P., "Performance evaluation for solar collectors in Taiwan", **Energy**, Cilt 34, 32-40, 2009.
37. Skeiker, K., "Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Syria", **Energy Conversation and Management**, Cilt 50, 2439-2448, 2009.
38. Mehleri, E.D., Zervas, P.I., Sarimveis, H., Palivos, J.A., Markatos, N.C. "Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays", **Renewable Energy**, Cilt 35, 2468-2475, 2010.
39. Benganem, M., "Optimization of tilt angle for solar panel, Case study for Madinah, Saudi Arabia", **Applied Energy**, Cilt 88, 1427-1433, 2011.
40. Talebizadeh, P., Mehrabian, M.A., Abdolzadeh, M., "Prediction of optimum slope and surface azimuth angles using the generic algorithm", **Energy and Buildings**, Cilt 43, No 11, 2998-3005, 2011.
41. O. Turgut, "Yatay jaluzili, aktif güneş ısıtıcı, hava-tutuculu pencerenin ısı performansının deneysel olarak incelenmesi", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 17, No 4, 71-82, 2002.
42. Liu, B.H., Jordan, R.C., "The interrelationship, characteristics, and distribution of direct, diffuse and total solar radiation", **Solar Energy**, Cilt 4, 1-10, 1960.
43. Bulut, H., "Bina enerji analizi ve güneş enerji sistemleri için eğimli yüzeylere gelen toplam güneş ışınım değerlerinin hesaplanması", **Teskon 2009 IX.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı**, 435-448, Izmir, 2009.
44. Firatoglu, Z., Yesilata B., "New approaches on the optimization of directly coupled PV pumping systems", **Solar Energy**, Cilt 77, 81-93, 2004.