

## Farklı Derece-Gün Bölgelerindeki Şehirler İçin Optimum Eğim Açısının Belirlenmesi

Ahmet ÇAĞLAR\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 07058, Antalya

(Alınış / Received: 22.04.2017, Kabul / Accepted: 17.10.2017, Online Yayınlanma / Published Online: 26.12.2017)

### Anahtar Kelimeler

Güneş kolektörü,  
Eğim açısı,  
Güneş ışınımı,  
Teorik hesaplama,  
Derece-gün bölgeleri

**Özet:** Güneş enerjili sistemlerin tasarımı yapılırken, güneş ışınlarından en iyi şekilde yararlanabilmek için güneş kolektörleri güneşe karşı doğru açıda yerleştirilmelidir. Bu şekilde daha fazla güneş ışınımının güneş kolektörü yüzeyine dik gelmesi sağlanmaktadır. Güneş geliş açıları, bölgenin coğrafik yapısına ve zamana bağlı olarak değişmektedir. Bu değişimlerin etkisini minimize etmek için güneş kolektörü belirli bir dönem boyunca o döneme uygun olacak şekilde optimum bir açıyla yerleştirilmelidir. Bu çalışmada güneş enerjili sistemlerde kolektörlerden yıl boyunca en iyi şekilde yararlanabilmesi için kolektörün eğim açılarının çeşitli derece-gün bölgeleri için optimum değerleri hesaplanmıştır. Bunun için farklı derece-gün bölgelerinden dört şehir (İstanbul, Ankara, Erzurum, Adana) seçilmiştir ve her bir şehir için yılın her ayında kullanılabilecek optimum eğim açıları, teorik hesaplama ve Hottel & Woertz metotları ile ayrı ayrı belirlenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, teorik hesaplama metodu ile bulunan en yüksek optimum eğim açısının 56° ile Aralık ayında Erzurum ilinde, en düşük açının ise 12° ile Haziran ayında Adana ilinde gerçekleştiği görülmektedir. İki ayrı metotla hesaplanan optimum eğim açıları arasında en büyük fark İstanbul ilinde Ocak ayında %19.3 olarak gerçekleşirken, en düşük fark Ankara ve Erzurum illerinde Temmuz ayında %4 olarak gerçekleşmiştir. Tüm şehirler ve tüm aylar hesaba katıldığında, iki yöntem arasındaki ortalama farkın %12.64 olduğu görülmüştür.

## Determination of Optimum Tilt Angle for Cities in Different Degree-Day Regions

### Keywords

Solar collector,  
Tilt angle,  
Solar radiation,  
Theoretical calculation,  
Degree-day regions

**Abstract:** Solar collectors should be oriented with the right tilt angles in order to get the maximum solar radiation in the application of solar energy systems. Thus more solar irradiation falls onto the solar collector by a straight angle. The right tilt angle varies depending on time and the geographical position of the specified zone. To minimize the effect of these parameters, solar collectors should be oriented with the optimum tilt angle for the corresponding zone and time period. In this study, optimum tilt angles are determined for four cities in Turkey at different degree-day regions in order to obtain maximum performance from the solar collector. For this purpose, the cities İstanbul, Ankara, Erzurum, Adana are selected as representative samples for four different degree-day regions in Turkey. Optimum tilt angle for each city and each month during the year is calculated separately using theoretical calculation and Hottel & Woertz methods and the results from both methods are compared with each other. According to the results of the theoretical calculation method, the maximum optimum tilt angle is obtained as 56° for Erzurum in December, while the minimum angle is obtained as 12° for Adana in June. The maximum difference between the optimum tilt angles calculated by the two different methods is obtained as 19.3% for İstanbul in January, while the minimum difference is obtained as 4% for both Ankara and Erzurum in July. Mean difference between two methods is 12.64% when taken all cities and months into consideration.

### 1. Giriş

Dünya'nın Güneş etrafındaki elips şeklindeki yörüngede ve kendi eksenini etrafındaki dönüşü

sebebiyle Güneş ışınları Dünya üzerindeki herhangi bir noktaya zamana bağlı olarak farklı açılarda gelmektedir [1]. Dünya'nın Güneş etrafındaki bir tam turu 365 gün 6 saat sürmektedir. Bu süre içerisinde

Dünya’da belirli bir nokta için güneş ışınımı değerleri sürekli değişmektedir. Güneş enerjili sistemlerde kullanılan güneş kolektörleri yerleştirilirken yıl boyunca gerçekleşen bu değişim göz önünde bulundurulmalıdır. Güneş kolektörünün performansından en iyi şekilde yararlanabilmek için bölgenin coğrafi yapısına da dikkat edilmelidir. Bu sebeplerden dolayı güneş kolektörünün eğim açısı kolektörün etkin bir şekilde kullanılacağı döneme uygun bir şekilde belirlenmelidir. Güneş kolektörleri yıl boyunca aynı eğim açısıyla kullanılacak ise bu eğim açısı tüm yıla uygun optimum bir açı olmalıdır. Böylece güneş kolektörlerinden en verimli şekilde yararlanılacaktır.

Literatürde optimum eğim açısını belirlemek için hem teorik hem de deneysel olarak yapılmış farklı çalışmalar bulunmaktadır. Deneysel çalışmalarda genellikle en yüksek güneş ışınım şiddetinin ölçüldüğü eğim açısı değeri optimum eğim açısı olarak belirlenmektedir. Teorik çalışmalarda ise güneş ışınımı hesaplama metodlarının kullanılmasının dışında daha pratik sonuçlar elde eden farklı yöntemler üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Güneş kolektörleri ve fotovoltaik paneller mevsimlere ve bölgenin coğrafik konumuna göre değişen belirli bir eğimde güneye bakacak şekilde yerleştirilir. Uygulamaların çoğunluğunda kış şartları dikkate alınarak optimum kolektör eğim açısının mahallin enlem değerine göre değiştiği ve Türkiye için 45-60° arasında olduğu tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda Duffie ve Beckman [2] bütün bir yıl için optimum eğim açısını mahallin enlemine eşit ( $\beta_{opt}=\Phi$ ) alırken, Heywood [3] ve Doğan [4] yalnız yaz sezonu için enlem derecesinden 15° daha düşük, yalnız kış sezonu için ise enlem derecesinden 15° daha büyük ( $\beta_{opt}=\Phi\pm 15^\circ$ ) alınmasını tavsiye etmişlerdir. Günlük toplam güneş ışınımı tahmininde kullanılmak üzere Tiris ve diğerleri [5] Gebze için ve Bakırcı [6] Türkiye için korelasyonlar geliştirmişlerdir. Ulgen ve Hepbaslı [7] İzmir ili için günlük ve aylık toplam güneş ışınımı için, Bakırcı [8] ise atmosfer içinde yatay yüzeye düşen anlık güneş ışınımının tahmini için çalışma yapmışlardır. Runsheng ve Tong [9] bir kolektörün optimum eğim açısını yatay yüzeye gelen aylık güneş ışınımına göre tahmin eden basit bir hesaplama yöntemi geliştirmiştir. Bakırcı [10] Erzurum için, Bulut [11] Adana için, Şenpınar [1] ise yedi farklı il için güneş kolektörlü sistemlerde kolektörün optimum eğim açısını belirlemek için çalışmalar yapmışlardır. Bulut çalışmasında Adana ilinde optimum eğim açısının yaz aylarında 5°-15°, kış aylarında 50°-60° ve geçiş aylarında (Nisan ve Eylül) 30°-35° seçilmesinin uygun olacağını belirlemiştir.

TS 825 Standardına göre Türkiye’de bölgeler, güneş enerjisi potansiyeli bakımından dört farklı kategoriye ayrılmış ve ısı kaybı hesaplamaları yapılırken dış ortam sıcaklığı ile ışınım şiddeti bakımından bölgenin hangi derece-gün kategorisinde olduğu dikkate

alınmıştır. Bu çalışmada aylık optimum eğim açıları, farklı derece-gün bölgelerinde bulunan dört şehir için (İstanbul, Ankara, Erzurum, Adana) iki farklı metotla ayrı ayrı hesaplanmıştır. İlk metotta eğik düzleme düşen güneş ışınımı değerleri farklı eğim açıları için hesaplanıp elde edilen verilerden maksimum güneş ışınımı değerini veren eğim açısı optimum eğim açısı olarak belirlenmiştir. İkinci metotta ise Hottel & Woertz modeli olarak adlandırılan, optimum eğim açısının belirlenmesinde kullanılan en basit yöntem kullanılmıştır [12,13]. Böylece ısı kayıplarının hesaplanmasında, güneş kazancının belirlenmesinde ve kurulacak olası bir güneş ısıtma sisteminin büyüklüğünün tayininde anlamlı bir kriter olan tipik derece-gün bölgeleri için optimum kolektör açıları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Literatürde tipik bölgelerin optimum kolektör açıları ile ilgili bir çalışma daha önce yapılmamıştır. Ayrıca optimum kolektör açısını etkileyen diğer parametreler olan enlem ve rakım değerlerinin farklı olduğu bölgelerin seçilerek bu parametrelerin etkisinin incelenmesi bakımından da bu çalışma literatüre önemli katkılar sağlamaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

Güneş kolektörlerinin kullanıldığı sistemlerde kolektörler için eğim açısı önemli bir parametredir. Bu çalışmada farklı derece gün bölgelerdeki dört şehir için (İstanbul, Ankara, Erzurum, Adana) yılın her ayında bu parametrenin optimum değerleri çeşitli hesaplamalar yapılarak belirlenmiştir. Güneş kolektörünün her ay için optimum eğim açısı iki farklı metotla hesaplanmıştır. Birinci hesaplama yönteminde teorik metot kullanılmıştır. Bu metotta eğik düzleme düşen aylık ortalama anlık toplam güneş ışınımı değerleri her ay için farklı eğim açısı değerleri girilerek ampirik ifadelerle hesaplanmıştır. Diğer tüm parametreler sabit tutularak sadece eğim açısı değiştirilmiştir. Dikkate alınan her ay için bu hesaplamalar tekrarlanarak en büyük güneş ışınımı şiddeti belirlenmiştir. En büyük güneş ışınımı değeri bulunurken o ayın ortası dikkate alınarak ayı temsil eden gün için ortalama hesaplamalar yapılmıştır. Bulunan maksimum eğik düzleme düşen aylık ortalama anlık güneş ışınımı şiddetine karşılık gelen eğim açısı o ay için optimum eğim açısı olarak belirlenmiştir. İkinci hesaplama yönteminde ise Hottel & Woertz metodundan yararlanılmıştır. Bu metotta bölgenin enlem açısından ayın referans alınan gününe göre belirlenen deklinasyon açısı değeri çıkarılarak optimum eğim açısı belirlenmiştir. İki farklı hesaplama metoduyla bulunan optimum eğim açısı değerleri birbirleriyle kıyaslanmıştır. Böylece metodların kullanılabilirliği açısından çıkarımlar yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak daha hassas sonuçlar veren teorik hesaplama metodu ile daha pratik kullanımlar için uygun olan Hottel & Woertz metodu kıyaslanmıştır. İki metot arasındaki farklar hesaplanarak hassas yöntemin basit yöntemle üstünlükleri ve basit yöntemin

kullanılabileceği durumlar hakkında çıkarımlar yapılmıştır. Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan yine farklı olarak, optimum eğim açısının belirlenmesinde etkili olan parametreler belirlenerek farklı derece-gün bölgelerindeki iller için optimum eğim açısının değişimi incelenmiştir. Böylece güneş enerjili sistemlerin kurulumunda dikkate alınması gereken parametreler tespit edilmiştir.

## 2.1. Teorik hesaplama metodu

Bu metotta optimum eğim açısını bulabilmek için eğik düzleme düşen aylık ortalama anlık güneş ışınımı şiddetine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple eğik düzleme düşen aylık ortalama anlık toplam güneş ışınımı şiddetini hesaplamak için ampirik ifadelerden yararlanılmaktadır [2,14].

Atmosfer içinde eğik düzleme düşen aylık ortalama anlık güneş ışınımı değeri ( $I_T$ ) şu şekilde hesaplanmaktadır [2]:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (1)$$

Burada  $I_b$  yatay düzleme gelen anlık direkt güneş ışınımı şiddeti,  $I_d$  yatay düzleme gelen anlık yayılı güneş ışınımı değerleridir.  $\beta$  kolektör eğim açısı ve  $\rho$  yerin yansıtma oranıdır. Geometrik faktör  $R_b$  değeri aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir [14]:

$$R_b = \left( \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ &+ \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ &+ \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (3)$$

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \quad (4)$$

Denklem 3 ve 4'te  $\theta$  direkt ışınım geliş açısı,  $\theta_z$  zenit açısı,  $\delta$  deklinasyon açısı,  $\phi$  enlem açısı,  $\gamma$  yüzey azimut açısı ve  $\omega$  saat açısıdır. Geometrik faktör  $R_b$  boyutsuz bir ifadedir.

Diğer taraftan yataya gelen anlık güneş ışınımı  $I_d$  ve berraklık indeksi  $k_T$  değerleri ise aşağıdaki formüllerle hesaplanmaktadır [14]:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.249k_T & k_T < 0.35 \\ 1.557 - 1.84k_T & 0.35 < k_T < 0.75 \\ 0.177 & k_T > 0.75 \end{cases} \quad (5)$$

$$k_T = \frac{I}{I_o} \quad (6)$$

$G_{sc}$ , güneş sabiti olarak tanımlanır ve bu değer kullanılması hesaplamalarda kolaylık sağlamaktadır. Bu hesaplamalarda  $G_{sc}$  değeri %1 hata ile  $1367 \text{ W/m}^2$

olarak kabul edilmektedir. Ayrıca  $GS$  güneş saati olarak tanımlanır. Gün uzunluğu ( $N$ ), güneş batış açısı ( $\omega_s$ ), saat açısı ( $\omega$ ), yatay düzleme düşen anlık toplam güneş ışınımı değeri ( $I$ ) ve atmosfer dışında yatay düzleme gelen anlık güneş ışınımı değeri ( $I_o$ ) şu şekilde hesaplanır [14]:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) = \frac{2}{15} \omega_s \quad (7)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (8)$$

$$\omega = 15(GS - 12) \quad (9)$$

$$\psi = \exp \left\{ -4 \left( 1 - \frac{|W|}{W_s} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} I_o &= \frac{12 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] \\ &\times \left[ \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \phi \sin \delta \right] \end{aligned} \quad (11)$$

$$I = \frac{H\pi}{4N} \left[ \cos \left( \frac{180W}{2W_s} \right) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} (1 - \psi) \right] \quad (12)$$

Atmosfer dışında yatay düzleme gelen günlük güneş ışınımı değeri ( $H_o$ ) ve atmosfer içinde yatay yüzeye düşen günlük toplam güneş ışınımı değeri ( $H$ ) aşağıdaki formüller ile hesaplanır [14]:

$$\begin{aligned} H_o &= \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] \\ &\times \left[ \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right] \end{aligned} \quad (13)$$

$$H = H_o \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad (14)$$

Burada  $n$  değeri 1 Ocak'tan itibaren yıl içindeki gün sayısı iken ( $n/N$ ) izafi güneşlenme süresidir.  $Z$  metre cinsinden bölgenin deniz seviyesinden yüksekliğidir. Ampirik ifadeler  $a$  ve  $b$  değerleri ise aşağıdaki formüllerle hesaplanır [14]:

$$a = 0.103 + 0.000017Z + 0.198 \cos(\phi - \delta) \quad (15)$$

$$b = 0.533 - 0.165 \cos(\phi - \delta) \quad (16)$$

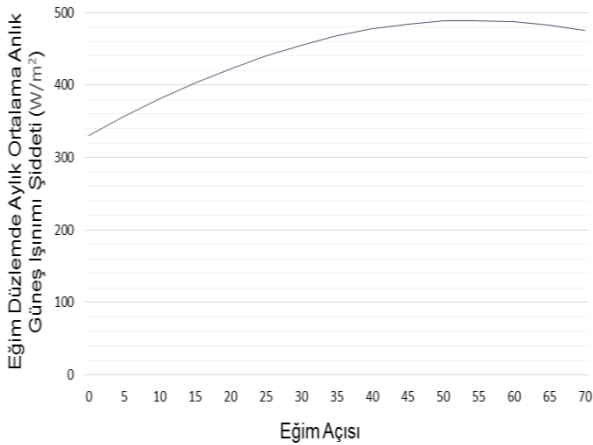
Yatay düzleme gelen anlık direkt güneş ışınımı şiddeti  $I_b$  ise şu şekilde hesaplanmaktadır [14]:

$$I_b = I - I_d \quad (17)$$

Atmosfer içinde eğik düzleme düşen aylık ortalama anlık güneş ışınımı şiddeti yukarıda belirtilen formüllerle hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada farklı eğim açısı değerleri kullanılarak yukarıda

belirtilen ampirik ifadeler hesaplanmıştır. Daha sonra her ay için en yüksek güneş ışınım değeri belirlenmiştir. Bu maksimum güneş ışınımı değerinin hesaplanmasında kullanılan eğim açısı optimum eğim açısı olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu metot ile yapılan hesaplamalar güneşe dönük yüzeyler için yapılmıştır. Yüzeylerin güneşe dönük olması hesaplamalarda yüzey azimut açısının ( $\gamma$ ) sıfır alınmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Örnek olarak Adana ilimiz için Aralık ayında farklı eğim açılarındaki atmosfer içinde eğik düzleme düşen aylık ortalama anlık güneş ışınımı değerleri bulunmuştur (Şekil 1). Adana ili için farklı eğim açısı değerlerinde Aralık ayında teorik hesaplama metodu ile güneş ışınım değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerden  $54^\circ$  eğim açısı için en yüksek güneş ışınımı değeri ( $489.383 \text{ W/m}^2$ ) elde edilmiştir. En yüksek güneş ışınımının elde edildiği bu eğim açısı Adana ili için Aralık ayına ait optimum eğim açısı olarak belirlenmiştir. Hesaplamalar yapılırken yüzeylerin güneşe dönük olduğu ve yüzey azimut açısı değerinin sıfır alındığı unutulmamalıdır.



Şekil 1. Adana ili için Aralık ayında optimum eğim açısının belirlenmesi

### 2.1. Hottel & Woertz metodu

Güneş enerjili sistemlerde kullanılan güneş kolektörlerinin eğim açısının belirlenmesinde kullanılabilir bir başka yöntem de ele alınan bölgenin enlem açısından ( $\phi$ ) deklinasyon açısının ( $\delta$ ) çıkarılmasıdır. Deklinasyon açısı, hesaplama yapılan ayı temsil eden günün yıl içindeki gün numarasına ( $n$ ) bağlı olarak değişen bir parametredir ve aşağıdaki gibi hesaplanır [14]:

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (18)$$

Bu metot ile optimum eğim açısı ( $\beta_{opt}$ ) şu şekilde hesaplanır [12,13]:

$$\beta_{opt} = \phi - \delta \quad (19)$$

### 3. Bulgular

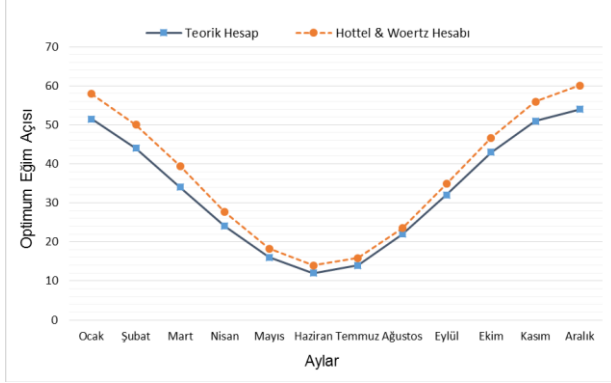
TS 825 Standardına göre Türkiye'de dört farklı iklim tipi mevcuttur ve tüm şehirler güneş ışınımı, ortam sıcaklığı, nem oranı gibi sahip oldukları meteorolojik özelliklere ve ısıtma/soğutma yüklerine göre bu dört iklim sınıfından biriyle derece-gün bölgesi adıyla numaralandırılmıştır. Bu çalışmada iki farklı metot ile farklı bölgelerden dört şehir için aylık optimum eğim açısı değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Aylık optimum eğim açısı değerleri Adana, Ankara, İstanbul ve Erzurum şehirleri için her iki metotla belirlenmiş olup yıl boyunca değişimi aşağıdaki grafiklerle verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan şehirlere ait karakteristik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Şehirler için karakteristik değerler

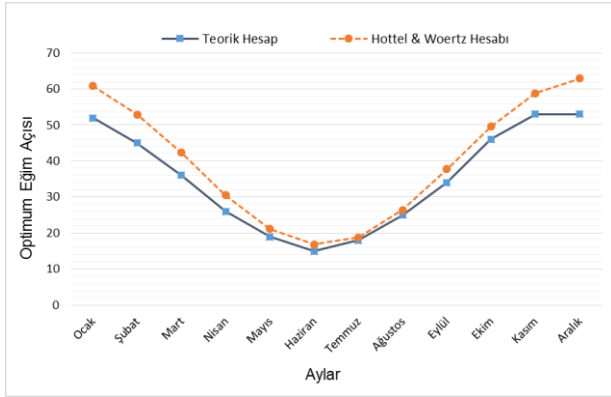
Şehir	Enlem ( $^\circ$ )	Rakım (m)	Derece Gün Bölgesi
Adana	37.04	27	I. Bölge
İstanbul	41.14	33	II. Bölge
Ankara	39.94	891	III. Bölge
Erzurum	39.94	1758	IV. Bölge

Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilere göre dört farklı şehir için ayrı ayrı bulunan grafikler aşağıda verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı gibi her iki metotla bulunan optimum eğim açısı değerleri aynı şehir için yılın yaz aylarında (Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos) birbirlerine oldukça yakın değerlerdedir. İki farklı metottan elde edilen optimum eğim açıları yılın diğer ayları için incelendiğinde ise aralarındaki farkın biraz daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun en önemli sebebi, teorik hesaplama yönteminde daha hassas ampirik ifadeler kullanılırken, Hottel & Woertz yönteminde ise havanın açık ve etrafta engellerin veya yansıtıcıların olmadığı ideal koşullar kabul edilerek eğim açısının daha basit ve çabuk bir şekilde hesaplanmasıdır. Teorik hesaplama yönteminde kullanılan ampirik ifadeler daha hassas sonuçlar vermekte ve yapılacak ciddi bir yatırım için gerekli kollektör alanı ve maliyetlerin hesaplanmasında daha sağlıklı bulgular vermektedir. Hottel & Woertz metodu ise genel olarak sistem tasarımlarında daha çok ön analiz yapılırken kullanılan hassasiyeti daha düşük, basit bir yöntemdir. Fakat Hottel & Woertz metodunun Mayıs, Haziran, Temmuz ve Ağustos gibi yaz ayları için kullanılmasının, optimum eğim açısının bu aylarda düşük olmasından ve böylece iki yöntem arasındaki farkın küçük olmasından dolayı büyük hatalara sebep olmayacağı grafiklerden de anlaşılmaktadır. Her ay için iki farklı metot ile bulunan sonuçlar arasındaki farklar, iki yöntemi karşılaştırmak için ayrıca hesaplanmıştır. İki ayrı metotla hesaplanan optimum eğim açıları karşılaştırıldığında en büyük farkın  $10.04^\circ$  (%19.3) ile İstanbul ili için Ocak ayında, en düşük farkın ise  $0.74^\circ$  (%4) ile Ankara ve Erzurum illeri için Temmuz ayında gerçekleştiği görülmüştür. Tüm şehirler için ortalama farkın ise  $4.53^\circ$  olduğu ve Hottel & Woertz metoduyla bulunan optimum eğim açısı değerleri ile

hassas teorik hesaplama ile bulunan değerler arasında ortalama %12.64 fark olduğu görülmüştür. Hesaplamalar sadece Mayıs, Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için yapıldığında ise iki yöntem arasında optimum eğim açısında  $1.87^\circ$  bir fark oluşurken bu fark %10.55'lik bir orana denk gelmektedir.



Şekil 2. Adana için elde edilen optimum eğim açısı değerleri

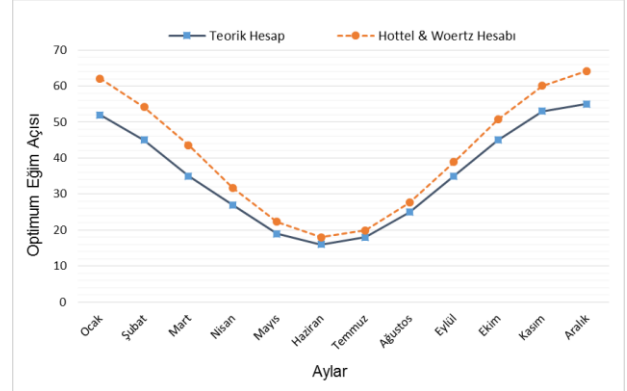


Şekil 3. Ankara için elde edilen optimum eğim açısı değerleri

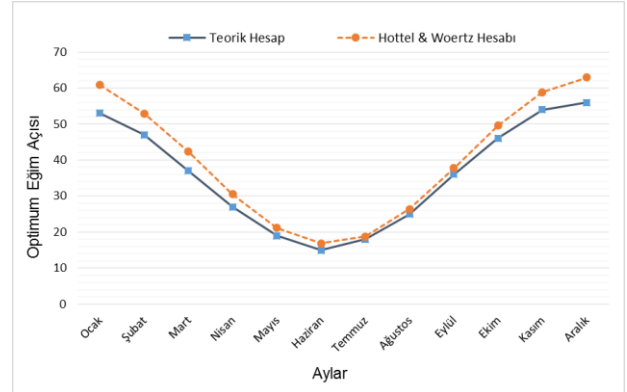
Optimum eğim açısı değerleri yıl boyunca Adana için  $51.5^\circ$  ile  $12^\circ$  arasında değişmektedir. Bu değer aralığı Ankara için  $53^\circ$  ile  $15^\circ$ , İstanbul için  $55^\circ$  ile  $16^\circ$  ve Erzurum için  $56^\circ$  ile  $15^\circ$  olarak belirlenmiştir. Tüm şehirler için optimum eğim açısı değerleri Ocak ayından Haziran ayına kadar azalmakta olup Haziran ayından Aralık ayına kadar tekrar artmaktadır. Bu davranış yıl içerisindeki ışınım değerinin değişimine tam ters bir davranıştır. Yıl içerisindeki optimum eğim açısındaki bu azalma ve artmanın en büyük sebebi deklinasyon açısının Haziran ayına kadar artıp Haziran ayından sonra azalmasıdır. Deklinasyon açısının artmasıyla optimum eğim açısı düşerken, buna bağlı olarak iki yöntem arasındaki fark da azalmaktadır.

Adana için optimum eğim açısı değerleri aynı ay için diğer şehirlerdeki optimum eğim açılarından  $1-3^\circ$  daha düşüktür. Bunun en büyük sebeplerinden biri Adana için enlem değerinin diğer şehirlerin enlem değerlerinden daha düşük olmasıdır. Yani Adana'nın ekvatora daha yakın olması, Adana'nın güneş ışınlarından daha dik yararlanmasına neden

olmaktadır. Bu durumda güneş kollektörü yatayla daha az bir eğimde açıyla kullanılmaktadır. Farklı derece-gün bölgelerindeki şehirler için yapılan teorik hesaplamalarda sonuçlar yaklaşık benzer olsa da tamamen aynı değildir. Bunun sebebi teorik analizde ilin enlemi dışında rakım değerlerinin de hesaba katılıyor olmasıdır. Özetle, hesaplama yapılan bölgenin enlem açısının, dolayısı ile bölgenin coğrafik konumunun hesaplamaların yapıldığı döneme bağlı olarak optimum eğim açısını etkileyen en önemli parametre olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte bölgenin rakımı da bu hesaplamalar yapılırken dikkat edilmesi gereken diğer bir önemli parametredir.



Şekil 4. İstanbul için elde edilen optimum eğim açısı değerleri



Şekil 5. Erzurum için elde edilen optimum eğim açısı değerleri

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada iki farklı yöntem kullanılarak güneş kollektörleri ve panelleri için optimum eğim açıları incelenmiştir. Teorik hesaplama metodu olarak isimlendirilen hassas birinci metotta güneş ışınımını değerleri eğim açısı değiştirilerek hesaplanmakta, maksimum güneş ışınımını veren eğim açısı optimum açı olarak tespit edilmektedir. İkinci metot ise optimum eğim açısının sadece deklinasyon açısına ve ilgili şehrin enlemine bağlı olarak bulunduğu kaba fakat kolay uygulanabilir Hottel & Woertz metodudur. Bu iki yöntem Türkiye'de yer alan farklı derece-gün bölgesine sahip dört şehir için uygulanmış ve aylık optimum eğim açıları hesaplanmıştır. Sonuçlar gerek optimum eğim açısının yıl içindeki değişimi ve gerekse iki yöntemin

birbirinden farkları bakımından kıyaslanarak yorumlanmıştır. Bu çalışmada, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak optimum kollektör açısını ve böylece kurulacak olası bir güneş ısıtma sisteminin tasarımını etkileyen faktörlerden derece-gün bölge sınıfı, enlem derecesi ve rakım değerlerinin farklı olduğu dört ayrı şehir İstanbul, Ankara, Erzurum ve Adana seçilerek bu tipik bölgelerin aylık optimum kollektör açıları arasındaki farklılıklar tartışılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde optimum eğim açısının kış aylarında deklinasyon açısının düşük olması nedeniyle daha büyük değerlere sahip olduğunu, yaz aylarında ise deklinasyon açısının artması ve buna bağlı olarak güneş ışınlarının yengeç dönencesine daha dik gelmesiyle birlikte düşük değerlere sahip olduğunu göstermektedir. İki yöntem kıyaslandığında ise, Hottel & Woertz metoduyla bulunan değerlerin dört şehir için de her zaman daha büyük çıktığı, aradaki farkın büyük optimum eğim açılarının söz konusu olduğu kış aylarında artarak %19.3 mertebesine ulaştığı, yaz aylarında ise eğim açısının düşmesiyle birlikte düşerek %4 seviyelerine indiği görülmektedir.

Diğer yandan şehirler (derece-gün bölgeleri) arasında bir kıyaslama yapılacak olursa, her şehrin aylar bazında yıl boyunca benzer bir davranış sergilediği, daha hassas olan teorik hesaplama metodu ile bulunan en yüksek optimum eğim açısının  $56^\circ$  ile Aralık ayında Erzurum şehrinde, en düşük açının ise  $12^\circ$  ile Haziran ayında Adana şehrinde gerçekleştiği görülmektedir. Şehirler arasındaki farkların enlem ve rakım değerlerindeki farklılıktan kaynaklandığı, bölgenin coğrafi özelliklerinin optimum eğim açılarının farklı olmasında önemli bir etken olduğu ortaya konulmuştur.

## Kaynakça

- [1] Şenpınar, A. 2006. Güneş Açılarına Bağlı Olarak Optimum Sabit Güneş Paneli Açısının Belirlenmesi. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları; 2006, 36-41.
- [2] Duffie, J. A., Beckman, W. A. 2013. Solar Engineering of Thermal Processes. Second edition. Jon Wiley and Sons New Jersey, 919s.
- [3] Heywood, H. 1971. Operational Experience with Solar Water Heating. J Inst Heat Vent Energy, 39, 63-9.
- [4] Doğan, İ. 1995. Optimum Tilt Angle for Solar Collectors Used in Cyprus. Renewable Energy, 6-7, 813-819.
- [5] Tiris, M., Tiris, C., Ture, I. E. 1996. Correlations of Monthly-Average Daily Global, Diffuse and Beam Radiations with Hours of Bright Sunshine in Gebze, Turkey. Energy Conversion and Management, 37(9), 1417-1421.

- [6] Bakırcı, K. 2009. Correlations for Estimation of Daily Global Solar Radiation with Hours of Bright Sunshine in Turkey. Energy, 34(4), 485-501.
- [7] Ulgen, K., Hepbasli, A. 2003. Comparison of The Diffuse Fraction of Daily and Monthly Global Radiation for İzmir, Turkey. Energy Sources, 25, 637-649.
- [8] Bakırcı, K. 2009. A Simple Calculation Method for Estimation of Instantaneous Global Solar Radiation on Horizontal Surface. Journal of Thermal Science and Technology, 29(2), 53-58.
- [9] Runsheng, T., Tong, W. 2004. Optimal Tilt-Angles for Solar Collectors Used in China. Applied Energy, 79, 239-248.
- [10] Bakırcı, K. 2006. Optimum Toplayıcı Eğim Açısının Aylara Göre Değişimi. Mühendis ve Makina Dergisi, 47(562), 26-30.
- [11] Bulut, H. 2008. Adana İlinde Eğik Yüzeyle Gelen Güneş Işınım Miktarının Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi 30.Yıl Sempozyumu, 16-17 Ekim, Adana, 1-6.
- [12] Camelia, S., Dorin, S. 2014. Optimum Tilt Angle for Flat Plate Collectors All Over The World – A Declination Dependence Formula and Comparisons of Three Solar Radiation Models. Energy Conversion and Management, 81, 133-143.
- [13] Soulayman, S., Hammoud, M. 2016. Optimum Tilt Angle of Solar Collectors for Building Applications in Mid-Latitude Zone. Energy Conversion and Management, 124, 20-28.
- [14] Yiğit, A., Atmaca, İ. 2010. Güneş Enerjisi, Alfa Aktüel Yayınları, 216s.