



## Vakumlanmış Silindirik Güneş Kollektör Tüplerinde Geometrik Uyumluluğun Sayısal Analizi

### A Numerical Analysis For Geometrical Compatibility Of Cylindrical Evacuated Tubes

Ömer Resuloğlu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, TÜRKİYE

*Başvuru/Received:* 27/06/2023

*Kabul / Accepted:* 21/08/2023

*Çevrimiçi Basım / Published Online:* 31/12/2023

*Son Versiyon/Final Version:* 31/12/2023

#### Öz

Bu çalışmada , silindirik geometriye sahip ve vakumlanmış güneş kollektör sistemlerinin optik verimleri ZEMAX optik tasarım programı aracılığıyla sayısal olarak incelenmiştir. Kollektör sistemlerinin verimlerine etki eden faktörlerden ; dış cam, toplayıcı tüp, yansıtıcı yüzeyin birbirlerine göre konumları değişken olarak alınmış olup , kollektör sisteminin olası bir takip sistemiyle ve takip sistemi olmaksızın en iyi çalışma şartları belirlenmiştir. Yutucu yüzey merkezinin dış cam borunun alt yüzeyine en yakın olduğu konumunda toplanan ortalama ışınımın maksimum olduğu belirlenmiş, dış cam boru üst yüzeyi ile yutucu yüzey merkezinin en yakın olduğu konumuna göre % 2.15 daha fazla ışınım toplandığı saptanmıştır. Optimum geliş açısının yutucu yüzeyin her konumu için 48 – 51 ° aralığında olduğu görülmüştür.Yansıtıcılı modellerde yansıtıcı ile dış cam mesafesinin azalmasıyla toplanan ışınımın yaklaşık % 5 arttığı görüşlmüş ve tüm yansıtıcı konumlarında optimum geliş açısının 15 – 18 ° aralığında olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada , silindirik geometriye sahip ve vakumlanmış güneş kollektör sistemlerinin optik verimleri ZEMAX optik tasarım programı aracılığıyla sayısal olarak incelenmiştir. Kollektör sistemlerinin verimlerine etki eden faktörlerden ; dış cam, toplayıcı tüp, yansıtıcı yüzeyin birbirlerine göre konumları değişken olarak alınmış olup , kollektör sisteminin olası bir takip sistemiyle ve takip sistemi olmaksızın en iyi çalışma şartları belirlenmiştir. Yutucu yüzey merkezinin dış cam borunun alt yüzeyine en yakın olduğu konumunda toplanan ortalama ışınımın maksimum olduğu belirlenmiş, dış cam boru üst yüzeyi ile yutucu yüzey merkezinin en yakın olduğu konumuna göre % 2.15 daha fazla ışınım toplandığı saptanmıştır. Optimum geliş açısının yutucu yüzeyin her konumu için 48 – 51 ° aralığında olduğu görülmüştür.Yansıtıcılı modellerde yansıtıcı ile dış cam mesafesinin azalmasıyla toplanan ışınımın yaklaşık % 5 arttığı görüşlmüş ve tüm yansıtıcı konumlarında optimum geliş açısının 15 – 18 ° aralığında olduğu görülmüştür.

#### Anahtar Kelimeler

*“Güneş enerji sistemleri , optik verim, boşaltılmış tüp, geometrik uyum, sayısal analiz”*

#### Abstract

In this study , the optical efficiency of evacuated solar collector systems has been numerically investigated through ZEMAX optical design program . The factors that affected the optical efficiency of the collector system; the position of reflective surface, the position of absorber plate is taken as a variables, the collector system are defined the optimal operating conditions for a possible tracking system and without a tracking system. It was determined that the average radiation collected at the position where the center of the absorber surface is closest to the rear dimensions of the outer glass tube – 15.5 mm, was determined to be maximum, 2.15% larger than the 15.5 indicator of the outer glass absorber width. The optimum angle of incidence is in the range of 48 – 51 ° for each position of the absorber surface.

#### Key Words

*“Solar energy,optical efficiency,evacuated tubes,geometrical compatibility,numerical analysis”*

## 1. Giriş

Yeryüzündeki en yaygın yenilenebilir enerji kaynağı güneş enerjisidir, güneşten saçılan ışınının dünyamıza ulaşan kısmı 1367 W/m<sup>2</sup> değerindedir. Gelen güneş ışınınının bir kısmı gün ışığı ve fotosentez şeklinde kullanılırken diğer kısımları kara ve suda depolanarak rüzgar oluşumuna ve buharlaşma sayesinde hidroelektrik potansiyel oluşturmaktadır. Gelen ışınının üçte biri uzaya geri yansıtılır. Bu nedenle, güneş enerjisini toplamak ve onu verimli bir şekilde elektrik enerjisi dönüşümü, ısıtma ve soğutma amaçlı tüketmek için sistem tasarımları enerji sistemlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Zararlı kirleticiler üretmediğinden dolayı güneş enerji sistemleri çevre dostudur. Ve geleneksel enerji kaynaklarının azalması ile enerji talebinin nüfus ve modernleşmeyle beraber artıyor olması güneş enerjisi çalışmalarının önemini artırmaktadır. Güneş enerji sistemleri temelde elektrik ve ısı üretimine göre ayrılmakta olup; ısıl güneş enerji sistemleri görece düşük teknoloji ve yerel üretim imkanları dolayısıyla daha yaygın kullanımdadır. Güneşten gelen ışınının yutucu bir yüzeyde emilerek akışkana aktarıldığı bu sistemlerde verim artırmak için çevreye ısı kaybını minimize eden boşaltılmış tüplü güneş enerji sistemleri yüksek verimli bir çözüm olmakla beraber; bu sistem elemanlarının her an en yüksek optik uyumlulukta olması sistemin verimliliği açısından elzemdir. Bu konuda literatürde rastlanan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

L. Ayompe ve ark. (2011), kullanım suyu ısıtma sistemi için bir düzlemsel güneş enerji sistemi ile bir ısı borulu boşaltılmış tüplü güneş enerji sisteminin performansını karşılaştırmak için bir saha çalışması yürütmüştür. Benzer çevre koşullarında kolektör verimleri düzlemsel güneş enerji sistemi ve ısı borulu boşaltılmış tüplü güneş enerji sistemi için sırasıyla %46,1 ve %60,7 ve sistem verimleri %37,9 ve %50,3 olarak bulunmuştur.

R. Tang ve ark. (2011) camdan üretilmiş boşaltılmış tüplü güneş enerji sisteminin su akışkanı için farklı eğim açılarının sistem performansına etkisini incelediği çalışmasında biri 22° ve diğerı ufuktan 46° eğimli iki farklı eğim açısına sahip, birbirinin aynısı olan iki set cam tüp içi tahliyeli borulu güneş enerjili su ısıtıcı yapılmıştır. Alınan ölçümlerde gün ortasına kadar 46° eğimli sistem sonrasında ise 22° eğimli sistem çıkış sıcaklıklarının daha yüksek olduğunu göstermiştir.

I. Budihardjo ve ark. [2009] camdan üretilmiş boşaltılmış tüplü güneş enerjili su ısıtıcıdaki suyun uzun vadeli performansını hem deneysel hem de sayısal olarak incelediler. Boşaltılmış borulardan geçen doğal sirkülasyon debisini, tank ısı kayıp katsayısını ve güneş enerjili su ısıtıcısının kolektör verimini araştırdılar. Cam tüplerle doğrudan temas halinde sıvı bulunan toplayıcıda 21 adet boşaltılmış tüp kullandılar. Kolektörden gelen faydalı enerjiyi belirlemek için kararlı durum koşullarında giriş ve çıkış sıcaklıkları sabit ışınım altında bir güneş izleme sistemine entegre edildi. Lineer regresyon kullanılarak optik verim 0.58 olarak bulundu. Ayrıca tüp en boy oranı, reflektör eğriliği, kolektör eğimi, kolektörün çalışma sıcaklığı ve radyasyon yoğunluğunu içeren kolektör tasarımının doğal sirkülasyon hızı üzerinde etkileri olduğunu bildirmişlerdir. Her bir bileşen göz önüne alındığında, sonuçlar, boşaltılmış kolektörlü ön ısıtıcı sisteminin Sidney'de yıllık %45 tasarruf sağlayabildiğini ortaya koydu.

R. Tang ve ark. (2009) vakum cam borulu boşaltılmış tüpler için en iyi yönelme açısı tespiti için yaptıkları çalışmada; boşaltılmış tüp içerisinde toplanan ışınım değerinin, kolektör türü, tüpler arası mesafe, yansıtıcı kullanımı ve ışık demetinin geliş açısına bağlı olduğunu belirlemişlerdir. T-tip (yönlendirilmiş) kolektörlerin H-tip (yönlendirilmemiş yatay boru demetli) kolektörlere göre daha etkin olduklarını bulmuşlardır. T- tip kolektörler için optimum yönelme açısının enlem derecesinden 10° küçük olması gerektiğini saptamışlardır.

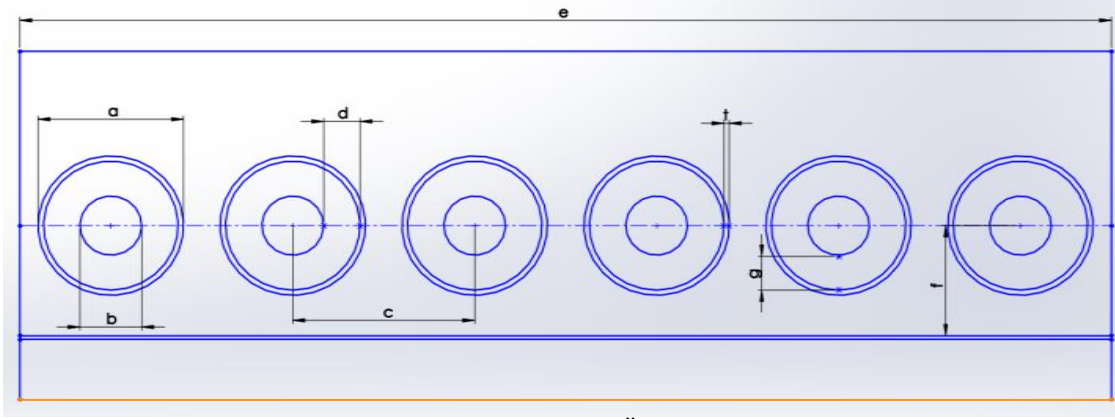
Budihardjo ve Morrison (2009) tarafından yapılan bir araştırmada, 45° eğime sahip cam su ısıtıcı sistemlerinin yıllık güneş enerji toplama verimliliğinin, standart 22° eğime sahip sistemlere göre sadece %1.5 daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Y. Kim ve ark. (2007) boşaltılmış cam tüplü kolektörlerin ısıl davranışlarını sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Hava'nın akışkan olarak kullanıldığı deneylerde tüpler 1200 - 37 mm (uzunluk – çap) ebatlarında seçilmişlerdir. Dört farklı yutucu şeklinden ışık geliş yönüne dik olarak merkezden kaçıklığa sahip tüpleri barındıran model ile en iyi sonuçlara varmışlardır. Kolektörde toplanan ışınının; yutucu yüzey şekli, güneş ışınlarının geliş açısı, kolektörde tüp konumu ve oluşan gölge noktalarından etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmada; optimum çalışma şartları belirlenmek istenen; dış cam tüp, yutucu yüzey ve yansıtıcıdan oluşan boşaltılmış tüplü güneş enerji sistemlerinin optik verimlerine sistem elemanlarının birbirlerine göre konumlarının etkisi gün boyu güneşten gelen değişik açılarda, sayısal olarak ZEMAX programıyla belirlenmiş ve sistemin bir takip sistemiyle veya takip sistemi kullanılmadan en yüksek optik verim şartları incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma kapsamında, Şekil 1'de şeması verilen vakum tüplü IGES (ısıl güneş enerji sistemi) için Optik Analiz Programı kullanılarak sistem katmanlarında geçirilen ve yutulan enerji miktarları bulunmuş, elde edilen veriler Tablo 1'de verilen şartlar için tekrarlanarak tüm geliş açıları için sistem geometrisinin toplanan ışınımına etkisi belirlenmiştir.

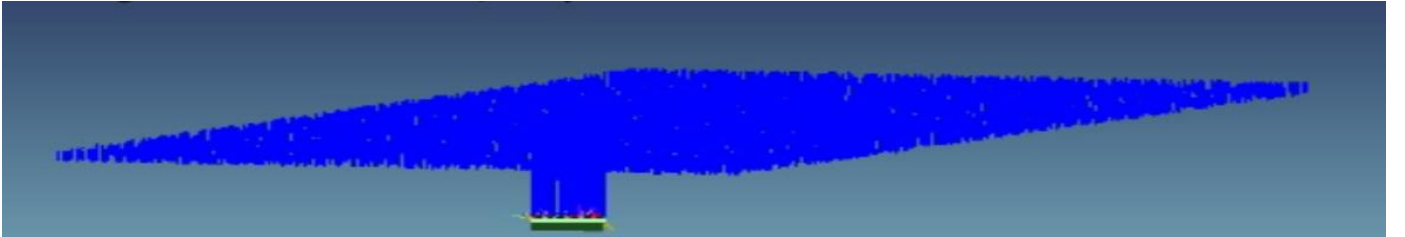


Şekil 1. Kolektör Sisteminin Önden Görünümü

Tablo 1 Kolektör Sisteminin Değişkenleri

Simge	Tanım	Değer
a	Dış cam dış çapı	40 mm
b	Yutucu plaka çapı	17 mm
t	Dış cam et kalınlığı	3 mm
g	Yutucu plaka ile dış cam arasındaki mesafe	Değişken
f	Yansıtıcı yüzey konumu	Değişken

Analizler Zemax yazılımında non-sequential modülünde 400.000.000 ışınla yapıлып (bu geometri için %0,11' ün altında sapmayla) güneş yerine 14x6 m ölçülerinde dikdörtgensel ışın kaynağı kullanılmıştır. Bu büyüklükte bir kaynak 1.4 x0.6 m dış yüzeyindeki bir boşaltılmış silindirik tüplü kolektör sisteminde kaçak ışına izin vermeyeceği için seçilmiştir. Kaynaktan çıkan ışınların kolektör sistemi üzerindeki görüntüsü Şekil 2'de gösterildiği gibi olmaktadır.



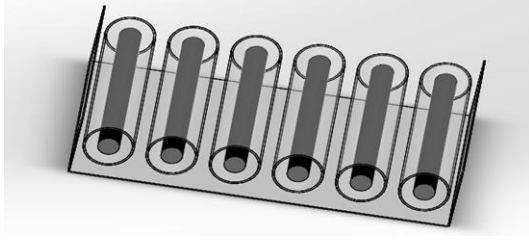
Şekil 2. 14 x6 m Ebatındaki Dikdörtgensel Kaynak İle Kolektör Sisteminin Zemax Ekran Görüntüsü

Zemax ray-tracking metoduyla tasarlanan optik sistemlerde system elemanlarının ışınım etkisinin incelendiği bir sayısal analiz programı olup; programda tasarım; ışın kaynağı, dedektör ve diğer yüzeylerin tanımlanmasıyla yapılmaktadır. Kaynak tasarımı; kaynak geometrisi, kaynaktan çıkan ışınım yoğunluğu ve çıkan ışınların doğrultu tanımlanmalarını kapsamaktadır. Tanımlanmış kaynaktan çıkan ışınlar non-sequential modülünde rastlayacakları herhangi bir yüzede yüzeyin malzeme ve geometrik özelliklerine bağlı olarak yansıma, kırılma, saçılma gibi optik fonksiyonları yerine getirip dedektör konulan ( ilgilenilen ) yüzeydeki özellikleri saptanabilmektedir.

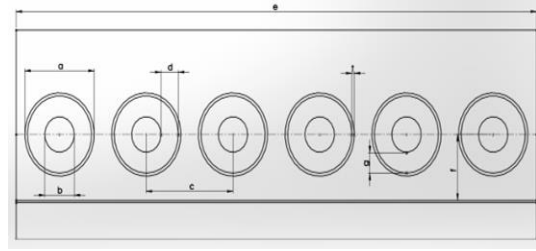
Kaynaktan ayrılan ışınım hüzmelerinin homojen ve paralel ışık demetleriyle güneşten gelen ışın demetleri sembolize edilmiştir. Güneşten gelen ışınımın toplayıcı yüzeye farklı enlem saat ve deklinasyon açılarındaki geliş açılarının tamamı kaynağın 'x' ekseninde -90° - 0° - 90° dönmesiyle simüle edilip, taranan 180°' ler 600 açı aralığında her bir aralık 0.30° olmak üzere boşaltılmış tüplü kolektörlerin toplayıcı yüzeylerine çarpan anlık ışınım miktarları hesaplanmıştır.

Kaynaktan çıkan ışınların enerji yoğunluğu 1200 W/m<sup>2</sup> olarak alınmış olup bu değer orta kuşak için 1000 m yüksekte açık havada (bulutsuz) okunan 1000 - 1300 W/m<sup>2</sup> değerlerinin arasında bir değerdir. Yine gün boyunca havanın tam açık (bulutsuz) olduğu kabul edilerek analizde direkt ışınımın tek başına etkili olduğu kabul edilmiştir. Saçılmış (Difusive) ışınımın açık havada %10 altında etkinlikte olduğu bilinmektedir.

Analizlerde kolektör sistemleri temelde dış cam, yutucu yüzey ve yansıtıcı plakadan oluşmakta olup; kolektör sisteminin genel görünümü Şekil 2'de, yine kolektör sisteminin önden görünüşü Şekil 3'te verilmiştir.



**Şekil 2.** Analizlerde Kullanılan Kollektör Sisteminin Genel Görünümü



**Şekil 3.** Analizlerde Kullanılan Yansıtıcı Kollektör Sisteminin Önden Görünümü

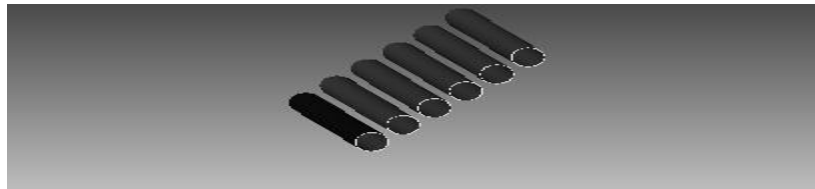
Analizlerde kullanılan referans geometride; dış camın, yutucu plakanın ve yansıtıcı yüzeyin konumlarındaki değişimler Tablo 1 de gösterildiği dış cam çapı, yutucu plaka çapı ve dış cam et kalınlığı sabit olmak üzere yapılmıştır.

**Tablo 1.** Kollektör Sistemindeki Bazı Ölçüler

Simge	Açıklama	Değer
a	Dış cam dış çapı	40 mm
b	Yutucu plaka çapı	17 mm
t	Dış cam et kalınlığı	3 mm
g	Yutucu plaka ile dış cam arasındaki mesafe	Değişken
f	Yansıtıcı yüzey konumu	Değişken

Dış cam tüm analizlerde bor-silis karışımından kırılma indisi  $n=1.46$  olan cam olarak kullanılmış ve cam kalınlığı olarak 3 mm seçilmiştir. Bu değer, mukavemet, ısıl stabilite ve ısıl şok özellikleri açısından tavsiye edildiğinden seçilmiştir. Dış camla ilgili özellikler Tablo 2 'de verilmiştir.

Analizlerde dış camlar oluşturulurken 40 mm yarıçaplı, 1.4 m uzunluğundaki cam kütükten 37 mm yarıçaplı, 1.4 m uzunluğundaki cam kütük çıkarılarak elde edilen silindirik cam tüp kullanılmıştır. 6 adet borudan oluşan kollektörün Zemax görseli Şekil 4 'te verilmiştir.



**Şekil 4.** Analizlerde Kullanılan Silindirik Cam Tüplerin Zemax Görseli

**Tablo 2.** Dış Cam İle İlgili Özellikler

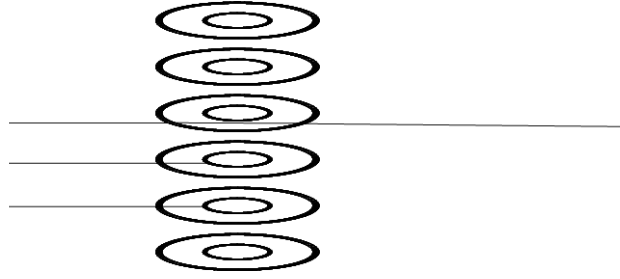
Özellik	Değer
Geçirgenlik ( $\tau$ )	0.92
Kırıcılık indisi (n)	1.46 - 1.47
Dış Çap	a= 40 mm
Uzunluk	l=1.4 m

Yutucu yüzey tasarımında; özellikle yansıtıcı kullanılan toplayıcı sistemlerde, siyah krom veya siyah nikel kaplamalı boruların kullanımı yaygındır. Seçilen borular, düşük ısı yayılımlarından dolayı, bakır, alüminyum, paslanmaz çelik olabilir. Yutucu yüzeyle ilgili özellikler Tablo 3 'de verilmiş olup silindirik dış cam içindeki görünüşleri de Şekil 5 'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Yutucu Yüzeyle İlgili Seçilen Özellikler

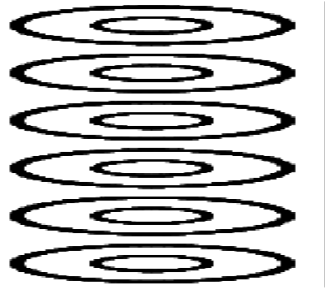
Özellik	Değer
Yutuculuk ( $\epsilon$ )	0.945*
Yayılm ( $\alpha$ )	0.09
Dış Çap	b= 17 mm
Uzunluk	l=1.4 m
Konum	g=(-19)- (19) mm

\*Bu değer analizde kullanılan 0,3-2  $\mu$ m dalgaboylu ışınım için ağırlıklandırılmış ortalama değeridir.

**Şekil 5.** Silindirik Yutucu Yüzeyin Silindirik Dış Cam İle Görünümü

Güneş enerji sistemlerinde yansıtma ile odaklama sistemlerine sıkça rastlanırken; boşaltılmış tüplerde vakum teknolojisinin gelişmesiyle tüp maliyetleri azalmış ve sistemlerde maliyet azaltıcı olarak kullanılan yansıtıcı yüzey elemanlarının kullanımı azalmış ise de yaptığımız analizlerde yansıtıcı yüzeyin konumunun sisteme etkisi incelenmiştir.

Analizlerde Şekil 6'da görünen düzlemsel bir yansıtıcı kullanılmış , yansıtıcı yüzeyin konumu  $f = 41-130$  mm aralığında değiştirilmiştir.

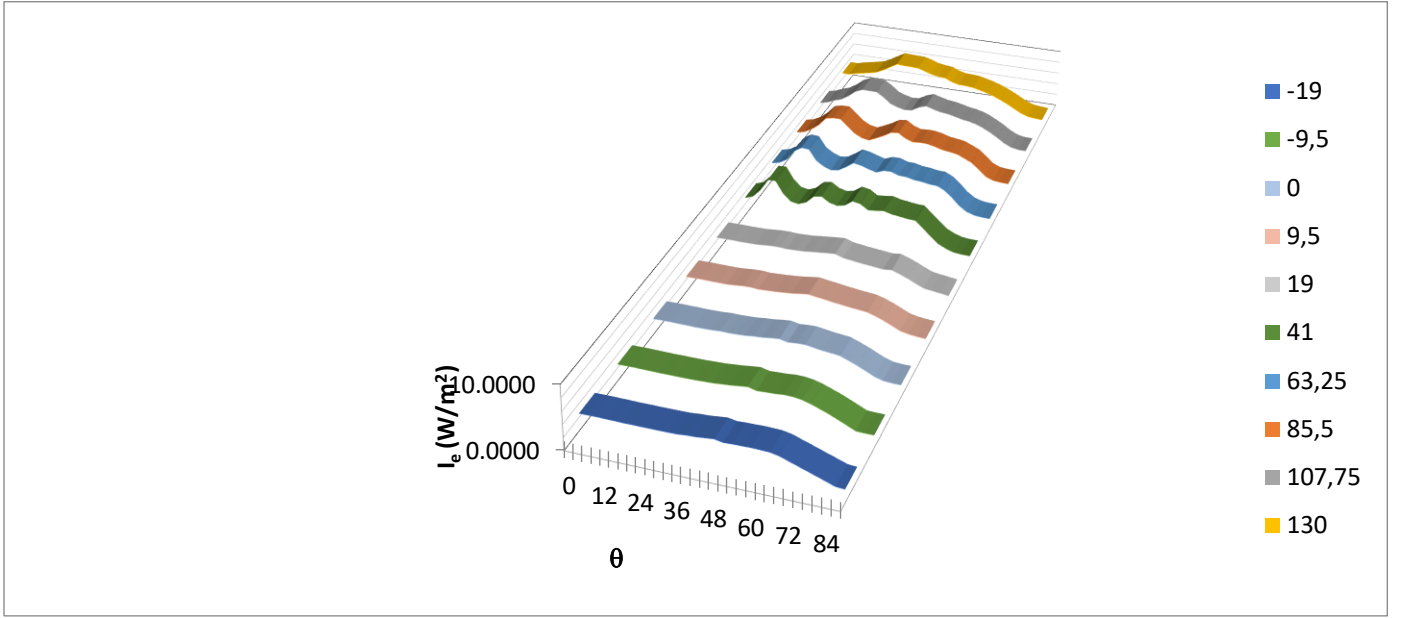
**Şekil 6.** Düzlem Yansıtıcı Yüzeyli Sistemlerin Görünümü

### 3. Bulgular ve Tartışma

Silindirik yutucu yüzey geometrisi için dış cam yutucu yüzey mesafesinin toplanan ışınma etkisini görmek için değiken yutucu yüzey konumları ve yansıtıcı yüzey dış cam mesafesinin toplanan ışınımdaki etkisini görmek için tanımlanan değişkenler Tablo 4'te verilmiştir. Bu durumlarındaki; toplanan ışınım akısı değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir.

**Tablo 4.** Yansıtıcı Yüzey ve Yutucu Yüzey Konumları

Yansıtıcısız	Düzlem Yansıtıcılı
g-20=19	f=41
g-20=9,5	f=63,25
g-20=0	f=85,5
g-20=-9,5	f=107,75
g-20=-19	f=130



Şekil 7. Silindirik Dış Silindirik İç Geometrisinde Anlık Toplanan Işınım Değerleri

### 3.Sonuçlar

Boşaltılmış tüplü güneş enerji sistemlerinde verimliliğin esas parametrelerinden olan optik uyumluluğun sistem elemanları konumlandırmaları için belirlenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada; Yansıtıcı kullanılmayan boşaltılmış tüp sistemlerinde yutucu yüzey merkez konumunun dış cam merkezinden arka yüzeye doğru tam kaçıklığının günlük toplanan ortalama ışınım değerini % 2 'ye kadar iyileştirdiği saptanmıştır. Analizlerde kullanılan düzlem aynasal yansıtıcı yüzeylerin dış cam merkez konumuna yaklaştırıldıkça toplanan günlük ışınım değerinin arttığı saptanmıştır. Takip sistemi kullanılmayacak yansıtıcı boşaltılmış tüplü kollektör sistemlerinin geliş açısı  $47^\circ$  olacak şekilde yapılacak konumlandırma sisteminin yapılması ışınım yoğunluğu değerini maksimize eder. Takip sistemi kullanılmayacak düzlem yansıtıcı boşaltılmış tüplü kollektör sistemlerinin geliş açısı  $16^\circ$  olacak şekilde yapılacak konumlandırma sisteminin toplayabileceği ışınım değerini maksimize eder. Analizlerde elde edilen tüm sonuçlar benzer bir optik sisteme sahip Solyndra tüplerinin elektriksel güç çıktıları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Boşaltılmış tüplü kollektör sistemleriyle ilgili saptanan iyileştirmeler üretici firmalarla paylaşarak yeni ürünlerin ekonomik uygunluk ve üretilebilirlik analizleri yapılmalıdır.

### Referanslar

L.M. Ayompe, A. Duffy, M. Mc Keever, M. Conlon, S.J. McCormack, Comparative field performance study of flat plate and heat pipe evacuated tube collectors (ETCs) for domestic water heating systems in a temperate climate, *Energy*, 36-5, 2011, 3370-3378, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.034>.

Runsheng Tang, Wenfeng Gao, Yamei Yu, Hua Chen, Optimal tilt-angles of all-glass evacuated tube solar collectors, *Energy*, 34-9, 2009, 1387-1395, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.014>.

Runsheng Tang, Yuqin Yang, Wenfeng Gao, Comparative studies on thermal performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters with different collector tilt-angles, *Solar Energy*, 85- 7, 2011, 1381-1389, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.019>.

BUDIHARDJO, I.; MORRISON, G. L.; BEHNIA, M. Development of TRNSYS models for predicting the performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters in Australia. In: Proceedings of ANSZES Annual Conference. 2003.

Yong Kim, Taebeom Seo, Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube, *Renewable Energy*, 32 -5, 2007, 772-795, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.03.016>.

I. Budihardjo, G.L. Morrison, Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters, *Solar Energy*, 83- 1, 2009, 49-56, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.06.010>.