

## GÜNEŞ BACASI GÜÇ SANTRALLERİNDE TOPLAYICI EĞİMİNİN ÇIKIŞ GÜCÜNE VE SİSTEM VERİMİNE ETKİSİ

Erdem CUCE \*

Alınma: 05.05.2020; düzeltme: 23.07.2020; kabul: 30.07.2020

**Öz:** Bu çalışmada toplayıcı eğiminin sisteme etkisi Manzanares prototipi esas alınarak geliştirilen 3 boyutlu CFD modeli ile analiz edilmektedir. Nümerik modelde güneş yükü için DO (discrete ordinates) ışınım modeli ve sistem içerisindeki hava hareketi için RNG k-ε türbülans modeli birleştirilerek uygulanmaktadır. 1000 W/m<sup>2</sup> güneş ışınımında sistemdeki maksimum hız 14.3 m/s olarak bulunurken bu değer deneysel veri olan 15 m/s ile uyum içerisinde. Manzanares prototipinde toplayıcı giriş yüksekliği 1.85 m olarak verilmektedir. Bu çalışma kapsamında toplayıcı giriş yüksekliği sabit tutularak, toplayıcı çıkış yüksekliği sırası ile 2.91, 3.97, 5.04, 6.12 ve 7.17 m olarak tasarlanmakta ve bu sayede toplayıcı eğiminin 0.5, 1, 1.5, 2 ve 2.5° olduğu durumlarda sistemin performansındaki değişim değerlendirilmektedir. Elde edilen sonuçlar toplayıcı eğimindeki artışın sistemdeki hava hareketinin kütleli debisini artırdığını ve bu artışın sistemin güç çıkışını iyileştirdiğini göstermektedir. Referans durumu temsil eden eğimsiz toplayıcı için toplayıcı verimi %38.7 iken toplayıcı eğimi 1° olduğunda verimin %41.5'e iyileştiği gözlenmektedir. Sistemin çıkış gücü referans durumunda 54.5 kW iken toplayıcı eğimi 2.5° olduğunda 57.1 kW olarak belirlenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş bacası güç santralleri, toplayıcı eğimi, çıkış gücü, sistem verimi

### Impact of Collector Slope on Power Output and System Efficiency in Solar Chimney Power Plants

**Abstract:** In this study, impact of collector slope on the system is analysed with 3D CFD model developed based on Manzanares prototype. In the numerical model, DO (discrete ordinates) radiation model for solar load and RNG k-ε turbulence model for turbulent air flow in the system are simultaneously utilised. Maximum air velocity within the system for incoming solar radiation of 1000 W/m<sup>2</sup> is determined to be 14.3 m/s, which agrees with experimental data of 15 m/s. In the Manzanares prototype, collector inlet height is given as 1.85 m. Here, collector inlet height is kept constant and the collector outlet height is configured as 2.91, 3.97, 5.04, 6.12 and 7.17 m, so the change in system performance is evaluated in cases where the collector slope is 0.5, 1, 1.5, 2 and 2.5°. Findings show that the increase in collector slope rises mass flow rate of air in the system and this improves power output of the system. Collector efficiency is 38.7% for the horizontal collector which represents the reference case, whereas it is enhanced to 41.5% when collector slope is 1°. Power output of the system at reference case is 54.5 kW, while it is 57.1 kW when collector slope is 2.5°.

**Keywords:** Solar chimney power plants, collector slope, power output, system efficiency

\* Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Zihni Derin Yerleşkesi, 53100 Rize, Türkiye  
İletişim Yazarı: Erdem CÜCE (erdem.cuce@erdogan.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Güneş bacası güç santralleri, güneşten elektrik üretmek amacı ile kurulan yenilenebilir enerji teknolojilerinden biridir. Temel olarak toplayıcı, baca ve türbin olmak üzere üç ana kısımdan oluşurlar (Sen ve Cuce, 2020). Güneş ışınımını sisteme aktarmaya yarayan toplayıcı, menfezlerle sisteme alınan havayı ısıtan ve altında oluşturduğu sera etkisi ile zemin malzemesinde duyulur ya da gizli ısı depolanmasına olanak sağlayan saydam örtüdür (Cuce ve diğ., 2020). Baca dikey konumda toplayıcının merkezinde bulunan ve hatırı sayılır yüksekliğinden ötürü giriş ve çıkışında belirgin bir basınç farkı temin eden sistem elemanıdır. Toplayıcı altında oluşan sera etkisiyle sıcaklığı artan hava, yoğunluk farkı ve sistem havasından daha yüksek sıcaklıktaki zeminden beslenen kaldırma kuvvetleri sayesinde yukarı yönlü harekete zorlanır (Schlaich, 1995). Yukarı yönlü harekete zorlanan hava, sistemin merkezinde bulunan bacanın oluşturduğu yüksek basınç farkı sebebiyle baca içerisinde yukarı doğru hızlanır. Baca içerisinde belirli bir yüksekliğe yerleştirilen türbinde, hızlanan havanın kinetik enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür. Güneş bacalarının teorik olarak geçmişi çok eskiye dayansa da ilk uygulaması 1980'lerin başında İspanya'nın Manzanares bölgesinde gerçekleştirilmiştir (Haaf ve diğ., 1983, Haaf, 1984). Manzanares prototipi üzerindeki ilk teorik ve deneysel çalışmalar, sonraki yıllarda yürütülen araştırmalar için önemli bir kılavuz kaynak özelliği göstermiştir. Güneş bacası güç santrallerinde baca yüksekliği, sistemin çıkış gücü ve verimi açısından önemli bir parametredir. Yapılan ilk teorik çalışmalar 1000 m baca yüksekliğinde sistemin genel veriminin %1'e ulaşacağını göstermiştir (Mullett, 1987). Öte yandan kurulacak büyük ölçekli sistemler ile 1000 MW'a kadar çıkış gücü alınabileceği iddia edilmiştir. Güneş bacası güç santralleri için korunum eşitliklerinin başarılı bir şekilde ortaya konmasını takiben, farklı iklim bölgelerinde kurulması muhtemel sistemlerin performans fizibiliteleri oluşturulmuştur (Larbi ve diğ., 2010, Al Alawin ve diğ., 2012). Başta baca boyu ve toplayıcı yarıçapı olmak üzere geometrik parametrelerin sistem performansı üzerine etkileri birçok araştırmacı tarafından sayısal olarak çalışılmıştır. MATLAB ortamında geliştirilen bir sayısal optimizasyon çalışmasında, toplayıcı yarıçapı ve baca yüksekliğindeki artış ile sistemin çıkış gücünün arttığı, öte yandan artan çevre havası sıcaklığı ile sistem performansının düştüğü görülmüştür (Khelifi ve diğ., 2016). 300 m toplayıcı yarıçapı ve 1000 m baca yüksekliğine sahip sistemin 1000 W/m<sup>2</sup> güneş ışınımında 0.92 MW çıkış gücüne sahip olacağı belirtilmiştir. Benzer şekilde, Manzanares prototipinin geometrik ölçülerini esas alan CFD modelleri geliştirilerek geometrik parametrelerin sistemin verimi ve çıkış gücüne etkileri sayısal olarak incelenmiştir (Esfinadi ve diğ., 2015). Toplayıcı yarıçapındaki artışın sistemin verimini azalttığı güç çıkışını ise artırdığı ifade edilmiştir. Baca yüksekliği için optimum değer 700 m olduğu, referans durumda 265 kW olan çıkış gücünün bu yükseklikte %62.2 artarak yaklaşık 423 kW olacağı, baca yüksekliğinin bu noktadan sonra artmasının çıkış gücünü azaltacağı iddia edilmiştir. Baca boyu ve toplayıcı yarıçapını bağımsız değişken kabul edip sisteme ait performans parametrelerini belirlemeye yönelik çeşitli çalışmalar ele alınmıştır (Zhou ve diğ., 2009, Toghraie ve diğ., 2018).

Baca boyu ve toplayıcı yarıçapının yanında baca yapısı ve toplayıcı eğimi de güneş bacası güç santrallerinin temel performans parametreleri açısından önemlidir. Ancak bu hususta literatürde sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Manzanares prototipi referans alınarak geliştirilen 3 boyutlu bir CFD model ile toplayıcı eğiminin çıkış gücüne etkisi araştırılmıştır (Ahirwar ve Sharma, 2019). 500 W/m<sup>2</sup> ışınım akısı altında sistem performansının önemli ölçüde toplayıcı eğiminin bir fonksiyonu olduğu belirlenmiştir. Toplayıcı eğimi 4° yapıldığında çıkış gücünün eğimsiz toplayıcıya göre yaklaşık %34 artarak 49.96 kW olacağı iddia edilmiştir. Öte yandan 6°'lik bir toplayıcı eğiminde çıkış gücü 72.34 kW olarak tahmin edilmiştir. Başka bir çalışmada, 120 m toplayıcı yarıçapı, 1.802 m toplayıcı yüksekliği, 5.08 m baca yarıçapı ve 194.6 m baca yüksekliğinde yakınsak ve ıraksak toplayıcıların çıkış gücüne etkileri sayısal olarak analiz edilmiştir (Hoseini ve Mehdipour, 2018). Aynı ışınım akısı altında, ıraksak tip toplayıcının hem sabit toplayıcı giriş yüksekliğinde hem de sabit toplayıcı çıkış yüksekliğinde daha fazla çıkış gücü

sağlayacağı belirlenmiştir. Başka bir çalışmada, Manzanares prototipinin geometrik ölçülerinden hareketle geliştirilen 3 boyutlu CFD modelde, toplayıcı eğim açısının ve baca ayrılma açısının güneş bacalarının çıkış gücüne etkileri incelenmiştir (Hassan ve diğ., 2018). Toplayıcı açısındaki artışın kütsel debiyi ve hava akış hızını arttıracığı vurgulanmıştır. Referans durumunda 33.7 kW olan güç çıkışının baca ayrılma açısı 1° yapıldığında %107 artarak yaklaşık 70 kW olacağı belirtilmiştir.

Bu çalışmada Manzanares prototipinin geometrik özellikleri referans alınarak toplayıcı eğiminin, güneş bacası güç santrallerinde kütsel debi, basınç farkı, çıkış gücü ve sistem verimi gibi temel performans parametrelerine olan etkisi 3 boyutlu eksenel simetrik bir CFD model ile analiz edilmiştir. Nümerik modelde DO ışınım modeli ve RNG k-ε türbülans yaklaşımı eş zamanlı olarak uygulanmıştır. Tüm CFD analizleri ağ bağımsız çözümün elde edilmesini ve prototip üzerindeki farklı ışınım akıllarında yapılan testlerle sonuçların doğrulanmasını takiben, standart test koşullarını ifade eden 1000 W/m<sup>2</sup> ışınım akısı ve 293.15 K çevre havası sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

## 2. KORUNUM DENKLEMLERİ

Toplayıcı eğiminin güneş bacası güç santrallerinin temel performans parametrelerine etkisini incelemek amacıyla, dünyadaki ilk uygulama olan İspanya'nın Manzanares bölgesindeki güç santrali bu çalışmada referans alınmış ve CFD model bütünüyle ilgili santralin geometrik özellikleri göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Bu maksatla Manzanares prototipindeki toplayıcı giriş yüksekliği sabit tutulmak şartıyla toplayıcı çıkış yüksekliği değiştirilerek, 5 farklı ıraksak tip toplayıcı eğimi için (0.5, 1, 1.5, 2 ve 2.5°) süreklilik, momentum, enerji ve türbülans denklemleri eş zamanlı olarak çözdürülmüştür. Bu sayede farklı toplayıcı eğimlerine karşılık gelen kütsel debi, çıkış gücü ve sistem verimi değerleri parametrik olarak elde edilmiştir. CFD modelde kolaylık sağlamak amacıyla aşağıdaki varsayımlar öngörülmüştür:

- Sayısal analizler sürekli rejim koşulları için yapılmaktadır.
- Sistem havası sıkıştırılmaz kabul edilmektedir.
- Akış rejimi sabit, 3 boyutlu ve türbülanslıdır.
- Çevresel koşullar tüm simülasyonlarda sabit kabul edilir.
- Sayısal modelde hava yoğunluğundaki değişimi hesaplayabilmek için Boussinesq yaklaşımı tercih edilmektedir.
- Baca cidarından olan ısı kayıpları ihmal edilmektedir.
- Sistem çalışırken sabit ve üniform bir ışınım akısı etkisindedir.

a. Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

b. Momentum denklemi

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

(4)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

c. Enerji denklemi

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

Güneş bacası güç santrallerinde toplayıcı altındaki hava akımında doğal taşınım ile ısı transferi söz konusudur. Söz konusu doğal taşınım için boyutsuz Rayleigh eşitliği şu şekilde tanımlanır:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TH_c^3}{\alpha\nu} \quad (6)$$

Eşitlikte  $H_c$  toplayıcı yüksekliği,  $\alpha$  termal difüzyon katsayısı ve  $\nu$  kinematik viskozitedir. Bu çalışmada  $Ra$  sayısı kritik değer olan  $10^9$ 'dan büyük olduğundan sistem türbülanslı olarak kabul edilmiştir (Zandian ve Ashjaee, 2013). Mevcut literatürde güneş bacası güç santrallerinin CFD analizlerinde sıklıkla ANSYS FLUENT yazılımının tercih edildiği ve bu yazılımda 3 farklı k- $\epsilon$  türbülans modelinin kullanıldığı görülmektedir. Bazı araştırmacılar tarafından çözümlenelerde ekonomiklik sağlayan, çoğu akışta doğru sonuç veren, akış rejimi ve geometriden bağımsız olan standart k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır (Bayareh, 2017, Hu ve diğ., 2017). Birtakım spesifik CFD modelleme çalışmalarında Realizable k- $\epsilon$  türbülans modeli tercih edilmiştir (Kalantar ve Zare, 2011, Ming ve diğ., 2013). Bu çalışma kapsamında dönen akışlarda daha iyi sonuçlar veren RNG k- $\epsilon$  türbülans modeli benimsenmiştir. İlgili yaklaşıma ait türbülans modeli eşitlikleri şu şekildedir:

d. RNG k- $\epsilon$  türbülans modeli denklemi

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (8)$$

Güneş bacası güç santrallerinde toplayıcı boyunca sıcaklığı yükselen havanın yoğunluğunu hesaplamak için farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bu çalışma kapsamında, Manzanares prototipinde toplayıcı boyunca sınırlı sıcaklık artışlarında en iyi sonucu verdiği önceki çalışmalarla teyit edilmiş olan Boussinesq modeli kullanılmıştır (Bayareh, 2017, Hu ve diğ., 2017). İlgili yaklaşımda yoğunluk hesabı aşağıdaki şekilde yapılmaktadır:

$$(\rho - \rho_\alpha)g \approx -\rho_\alpha \beta (T - T_\alpha)g \quad (9)$$

İlgili eşitlikte  $\beta$  termal genleşme katsayısı,  $\rho_\alpha$  ve  $T_\alpha$  ise sistemin giriş havasının yoğunluğu ve sıcaklığıdır. Daha önce de ifade edildiği gibi, güneş bacası güç santrallerinde sisteme ısı enerjisi

girişi yarı geçirgen özellikteki toplayıcı kısmından gerçekleşir. Söz konusu toplam enerji ( $\dot{Q}$ ) şekilde hesaplanabilir:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T \quad (10)$$

Eşitlikte  $\Delta T$  toplayıcı boyunca havanın giriş ve çıkış sıcaklığı arasındaki farkı ifade etmektedir. Toplayıcı doğrudan güneşten gelen ışınlam akısına maruzdur. Buradan hareketle, toplayıcı alanı  $A_{coll}$  ve ışınlam akısı  $G$  için, toplayıcı verimi aşağıdaki eşitlikten belirlenebilir:

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}}{A_{coll}G} \quad (11)$$

Güneş bacası güç santrallerinde sistemin çıkış gücünü belirlemeye yönelik literatürde çeşitli yöntemler bulunmakla birlikte, en yaygın kullanılan tekniklerden biri türbindeki basınç düşüşünden hareketle çıkış gücünün tespitidir (Kalantar ve Zare, 2011). İlgili yöntem aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$P_o = \eta_t \Delta P_t Q_v \quad (12)$$

İlgili eşitlikte  $\eta_t$  türbin-jeneratör verimidir ve çalışmalarda yaygın olarak 0.8 olarak alınmaktadır.  $\Delta P_t$  ve  $Q_v$  sırasıyla türbin basınç düşüşü ve hacimsel debidir (Ming ve diğ., 2013). Literatürde  $\Delta P_t$  için farklı yaklaşımlar mevcuttur. Yürütülen çalışmada türbin basınç düşüşü, CFD sonuçlarından hareketle türbinin konumlandırıldığı yerdeki ortalama basınç kullanılarak ( $P_t$ ) elde edilir ve şu şekilde hesaplanır:

$$\Delta P_t = r_t P_t \quad (13)$$

Bu eşitlikte  $r_t$  türbin basınç düşüş oranı olup 2/3 alınmıştır (Li ve diğ., 2016). Güneş bacası güç santrallerinin performans analizlerinde yaygın olarak kullanılan performans kriterlerinden biri de sistem verimidir ve aşağıdaki eşitlikten belirlenir:

$$\eta = \frac{P_o}{A_{coll}G} \quad (14)$$

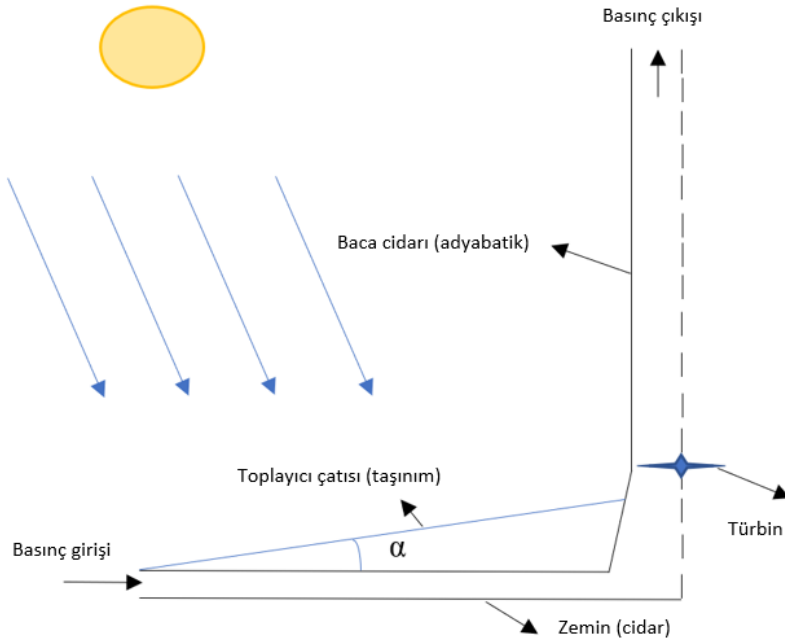
### 3. FİZİKSEL YAPILANDIRMA VE CFD MODELİ

Bu çalışma kapsamında toplayıcı eğiminin güneş bacası güç santrallerinin performans parametrelerine etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analizler, 3 boyutlu ekstenel simetrik bir CFD model ile dünyadaki ilk uygulama olan İspanya'daki Manzanares prototipi referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Söz konusu prototipe ait geometrik veriler Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1. Manzanares güneş bacası güç santraline ait geometrik veriler** (Cuce ve diğ., 2020)

Geometrik parametre	Değer
Baca yüksekliği	194.6 m
Ortalama toplayıcı yüksekliği	1.85 m
Baca yarıçapı	5.08 m
Ortalama toplayıcı yarıçapı	122.0 m
Zemin kalınlığı	0.5 m

Sitemin önceki çalışmalardaki deneysel verileri incelendiğinde, zeminin 0.5 m altından itibaren sıcaklığın zamanla değişimi söz konusu olmadığından, zemin kalınlığı bu çalışma kapsamında 0.5 m alınmıştır (Haaf, 1984). Çözümlenelerde başlangıç durumunda yatay yerleştirilen eğimsiz toplayıcının giriş yüksekliği sabit tutulmak şartıyla çıkış yüksekliği değiştirilmiş ve farklı açı değerlerinde simülasyonlar tekrarlanmıştır. CFD model güvenilir bir ticari yazılım olan ANSYS FLUENT kullanılarak oluşturulmuştur. Geliştirilen 3 boyutlu CFD yaklaşım, hesaplamalarda ekonomiklik sağlamak amacıyla iki adet düzlem simetrisi içeren (XZ ve YZ düzlemleri) 90°'lik bir sayısal modele dönüştürülmüştür. Sistemin şematik görünümü ve çalışmada kullanılan sınır koşulları Şekil 1'de gösterilmiştir. Baca giriş ve çıkışında herhangi bir basınç farkı oluşmadığı ve toplayıcı girişinde sıcaklığının çevre havası sıcaklığına eşit olduğu varsayılmıştır. Zeminde ve baca cidarında adyabatik sınır koşulundan hareketle ısı taşınım katsayısı,  $h = 0 \text{ W/m}^2\text{K}$  iken, toplayıcı ile sistem havası arasındaki ısı taşınım katsayısı,  $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak alınmıştır.



**Şekil 1:**

*Değişken toplayıcı eğimine sahip güneş bacası güç santrali modeli ve modele ait sınır koşulları*

Güneş bacası güç santrallerinin sayısal modellenmesinde baca, toplayıcı ve zemin malzemelerinin fiziksel özellikleri oldukça önemlidir ve simülasyon sonuçlarına doğrudan etki etmektedir. İlgili kısımlara ait model parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Bununla birlikte, iklimsel parametreler ve modellemede kullanılan havaya ait termofiziksel özellikler Tablo 3'te detaylı olarak sunulmuştur. Çalışmanın boyutsal karakteristikleri sebebiyle sayısal modelleme oldukça yoğun bir hücre sayısında gerçekleştirilmekte bu da her bir parametrik çalışma için iterasyon süresini 36 saate kadar uzatabilmektedir. İterasyon süresinde ekonomiklik sağlamak amacıyla tüm geometri yerine dörtte bir aksel simetrik model tercih edilmiştir. Korunum denklemlerinin ayrıklaştırılmasında sonlu hacim yöntemini kullanan ANSYS FLUENT paket programı ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Momentum denkleminin çözümünde RNG k-ε türbülans modeli tercih edilmiştir. Hava hızı ve basıncı arasındaki ilişkiyi saptayabilmek için SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Basınç interpolasyonu için PRESTO yaklaşımı tercih edilmiştir. Korunum denklemleri ikinci dereceden UPWIND metodu ile ayrıklaştırılmıştır. DO ışıınım modeli, güneş ışıınımı izleme tekniği ile birlikte uygulanmıştır. Hava yoğunluğundaki

değişimi hesaplayabilmek için Boussinesq metodu tercih edilmiştir. Çözümlemelerde yakınsama kriteri olarak  $10^{-6}$  uygun görülmüştür.

**Tablo 2. CFD modelde kullanılan malzemelere ait fiziksel özellikler** (Cuce ve diğ., 2020)

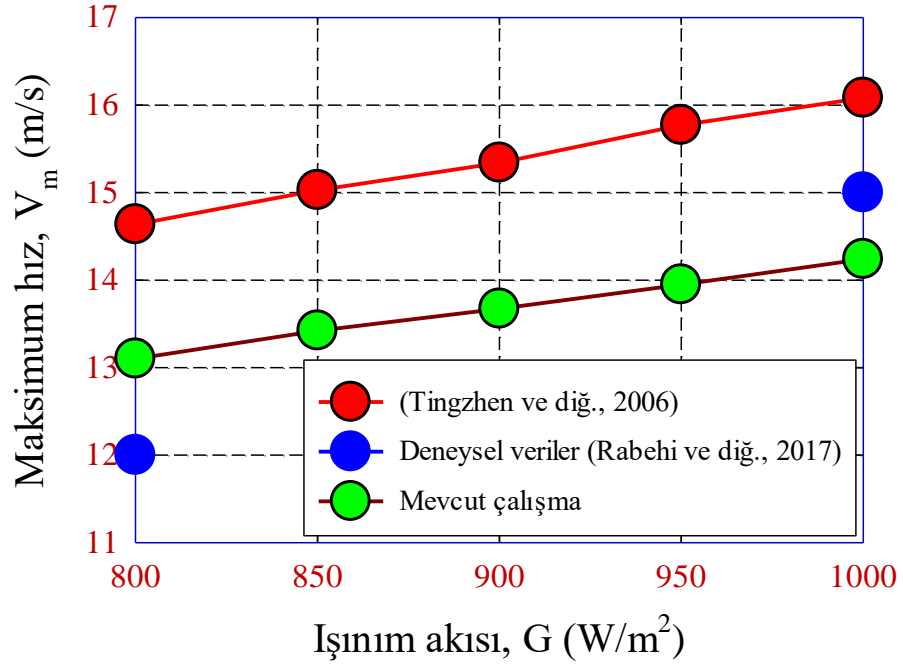
Fiziksel özellik (birim)	Toplayıcı camı	Zemin	Baca
Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	2500	2160	2719
Özgül ısı kapasite ( $\text{J/kgK}$ )	750	710	871
Isı iletim katsayısı ( $\text{W/mK}$ )	1.15	1.83	202.4
Soğurma katsayısı	0.03	0.9	0
Işıma oranı	0.1	0.9	1
Geçirimsizlik oranı	0.9	Opak	Opak
Kalınlık (m)	0.004	0.5	0.00125
Kırılma indisi	1.526	1	1

**Tablo 3. Modele ait çevresel parametreler ve termofiziksel özellikler** (Cuce ve diğ., 2020)

Parametre (birim)	Değer
Ortam sıcaklığı (K)	293.15
Işınım akısı ( $\text{W/m}^2$ )	1000
Ortam basıncı (Pa)	101325
Çevre havasının yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )	1.2046
Yerçekimi ivmesi ( $\text{m/s}^2$ )	9.81
İdeal gaz sabiti ( $\text{J/kgK}$ )	287
Havanın kinematik viskozitesi ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$1.48 \times 10^{-5}$
Havanın ısı iletim katsayısı ( $\text{W/mK}$ )	0.0259
Havanın özgül ısı kapasitesi ( $\text{J/kgK}$ )	1006.43
Türbin basınç düşüş oranı	2/3
Stefan-Boltzmann sabiti ( $\text{W/m}^2\text{K}^4$ )	$5.667 \times 10^{-8}$

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

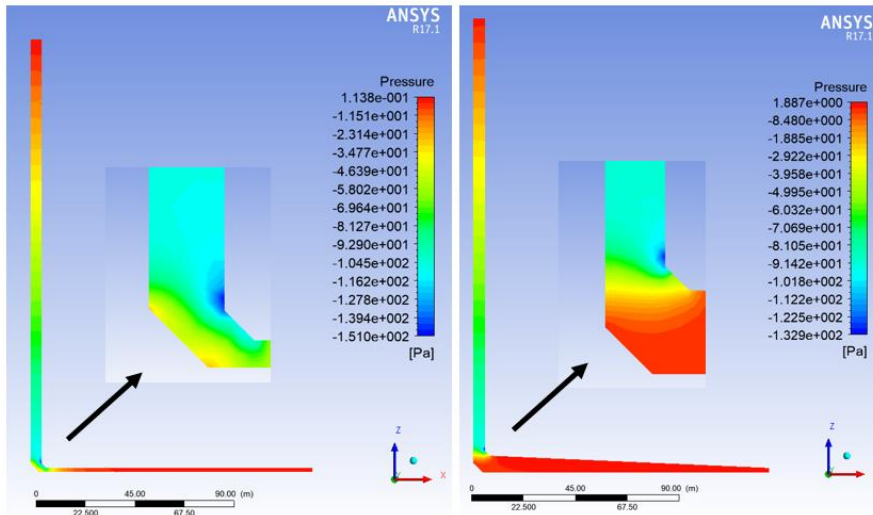
Sayısal sonuçlarının sunumundan önce ağ bağımsız çözüm ile ilgili detayların verilmesi uygun olacaktır. Bu bağlamda sistem içerisindeki maksimum hız ( $V_m$ ) referans alınarak üç farklı hücre sayısında ağ kalitesi ve ağdan bağımsızlık kontrol edilmiştir. 259800 hücre sayısında  $V_m$  14.420 m/s olarak belirlenmiş, 305619 ve 386041 hücre sayılarında ise ilgili değer 13.996 ve 14.242 m/s olarak hesaplanmıştır. 305619 ve 386041 hücre sayıları arasında  $V_m$ 'nin değerindeki değişim % 1.75 olarak hesaplanmıştır. Bu değer ağ bağımsız çözüm için kâfi bulunmuş ve bundan sonraki tüm çözümler 386041 hücre sayısında gerçekleştirilmiştir. CFD sonuçlarının güvenilirliği, Manzanares prototipi üzerinde farklı ışınım akılarında yapılmış deneyler (Rabehi ve diğ., 2017) ve daha önceki çalışmalarda  $V_m$  üzerinden yürütülmüş sayısal çalışmalar (Tingzhen ve diğ., 2006) ile sağlanmıştır. Şekil 2'den anlaşılacağı üzere, CFD sonuçları deneysel verilerle uyum içerisindedir. Daha önceki sayısal çalışmalarda uygun olmayan ağ yapısı, türbülans ve ışınım modelleri sebebiyle karşılaşılmış tutarsız performans verileri bu çalışma sayesinde ortadan kaldırılmış ve Manzanares prototipi yüksek hassasiyetle simülasyon testlerine tabi tutulmuştur.



Şekil 2:

CFD sonuçlarının maksimum hız değerleri üzerinden ( $V_m$ ) doğrulanması

Güneş bacası güç santrallerinin sayısal modellenmesinde sistem içerisindeki basınç ve hız gradyanlarının doğru ve hassas bir şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu anlamda, toplayıcı eğiminin Manzanares prototipinin temel performans parametrelerine etkisi araştırılırken söz konusu hız ve basınç dağılımları tüm sistem boyunca detaylı olarak analiz edilmiştir. Yatay (eğimsiz) toplayıcı ve 2.5° eğime sahip toplayıcı durumlarında Manzanares prototipindeki basınç dağılımı Şekil 3'te verilmiştir.

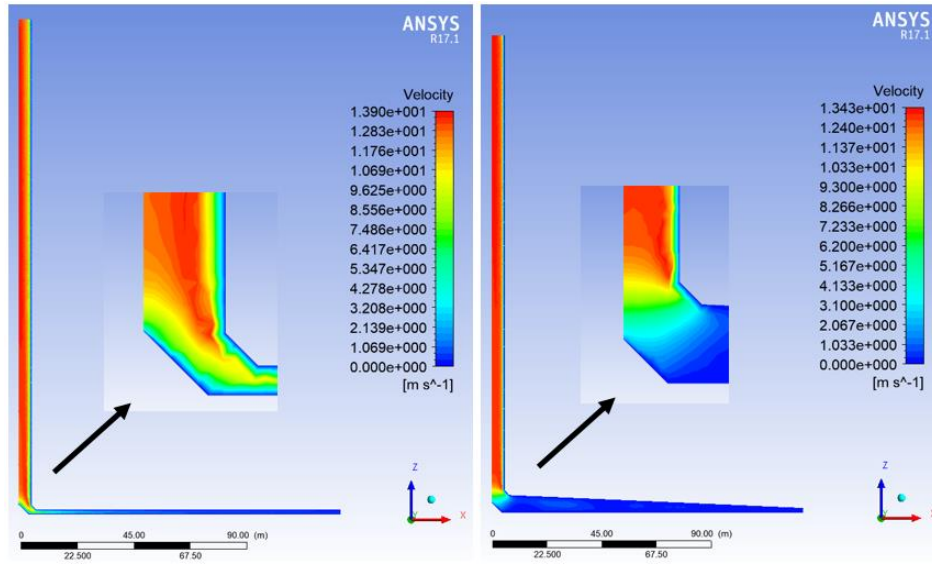


Şekil 3:

Yatay (eğimsiz) toplayıcı ve toplayıcı eğimi 2.5° için sistem içerisindeki basınç dağılımı



Sistem içerisindeki basınç gradyanları incelendiğinde, eğimsiz toplayıcıda hava basıncındaki değişimlerin özellikle toplayıcı çıkışına doğru iyice belirginleştiği anlaşılmıştır. Toplayıcı çıkışı ile baca girişi arasındaki boğaz bölgesinde basıncın ziyadesiyle düştüğü ve baca içerisinde belirli bir yükseklikte basıncın minimum olduğu belirlenmiştir. Manzanares prototipinden alınan veriler türbinin zeminden itibaren 9 m yükseğe yerleştirildiğini göstermiştir. Basınç değerlerinin çok düşük olduğu bu mesafede yukarı yönlü dominant hız vektörleri mevcuttur ve ilgili kesitteki hız dağılımları sistemin enerji üretim performansını doğrudan etkilemektedir. Toplayıcı eğiminin  $2.5^\circ$  olduğu durumda atmosferik etkilerinin toplayıcı boyunca hâkim olduğu görülmüştür. Elbette bu durum toplayıcıya eğim kazandırıldığında kütleli debi değerindeki hissedilir artışın bir sonucudur. Eğimli toplayıcıda minimum basınç değerlerinin eğimsiz toplayıcıyla hemen hemen benzer karakter sergilediği ancak minimum basınç değerlerine karşılık gelen yaklaşık türbin pozisyonunun baca içerisinde daha yüksek bir noktaya karşılık geldiği tespit edilmiştir.

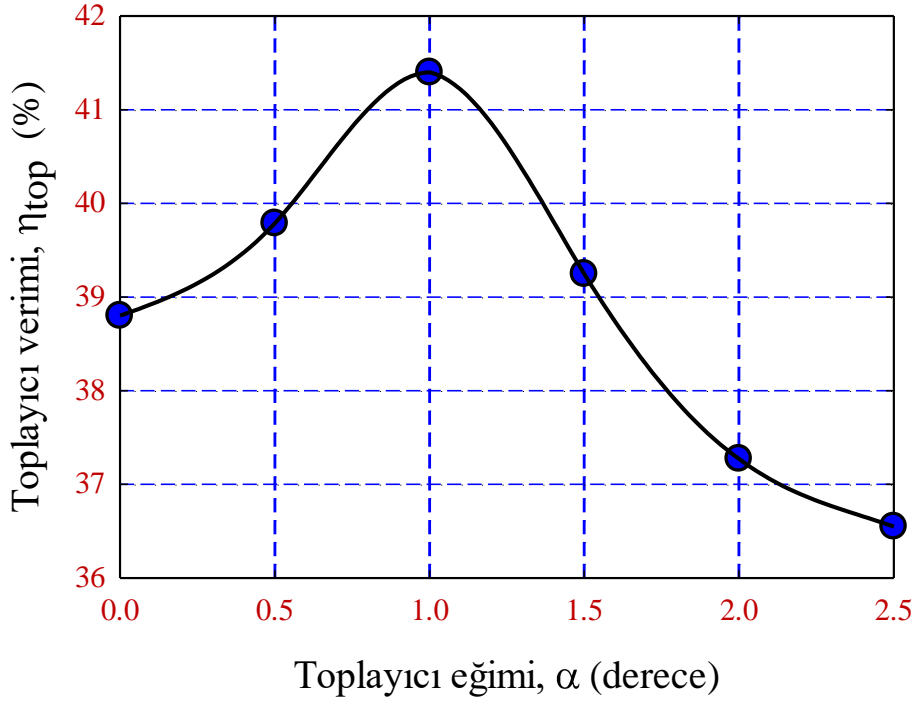


**Şekil 4:**

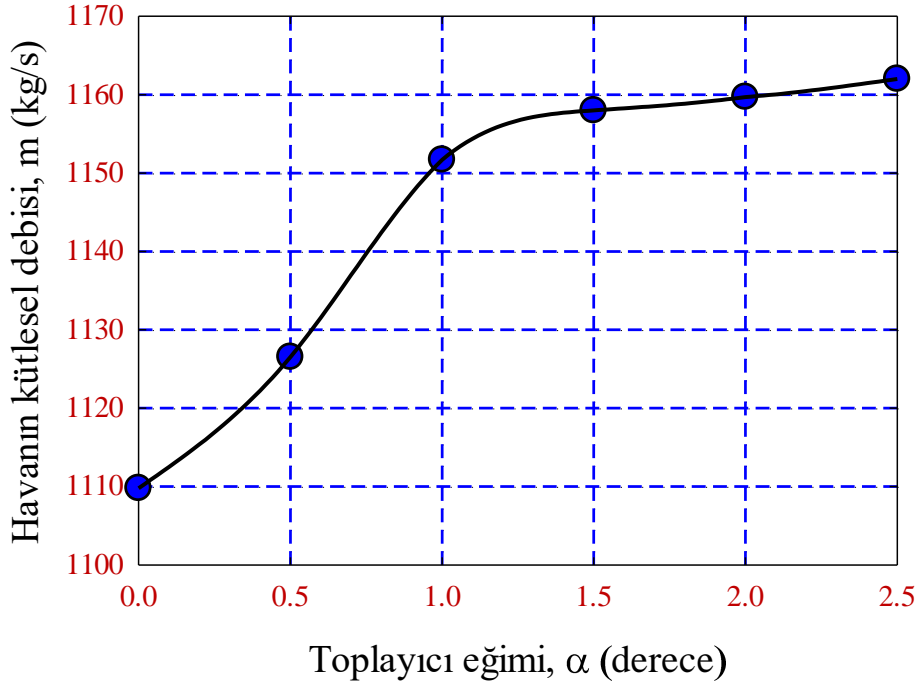
*Yatay (eğimsiz) toplayıcı ve toplayıcı eğimi  $2.5^\circ$  için sistem içerisindeki hız dağılımı*

Basınç görsellerinde ifade edilen bulguları doğrular nitelikte sistem içerisindeki hız gradyanları yatay ve eğimli toplayıcı geometrisi için Şekil 4'te verilmiştir. Eğimsiz toplayıcıda, toplayıcı çıkışına doğru hız vektörlerinin iyice belirginleştiği, boğaz bölgesinde momentum etkilerinin arttığı ve baca girişinden itibaren maksimum hız değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Daha önce de ifade edildiği gibi, Manzanares prototipinde  $1000 \text{ W/m}^2$  ışıma akısı ve  $293.15 \text{ K}$  çevre havası sıcaklığında  $V_m$  yaklaşık  $14 \text{ m/s}$  olarak hesaplanmıştır ve bu değer literatür verileriyle uyum içerisindedir. Öte yandan toplayıcı eğiminin  $2.5^\circ$  olduğu durumda momentum etkilerinin daha geç belirginleştiği ve baca girişinden itibaren hız gradyanlarının enerji üretimi açısından anlamlı değerler kazandığı anlaşılmıştır. Ancak maksimum hız değerleri açısından sistemin eğimsiz toplayıcı ile karşılaştırılabilir bir performans sergilediği bunun da benzer basınç gradyanlarının bir sonucu olduğu kanısına varılmıştır.

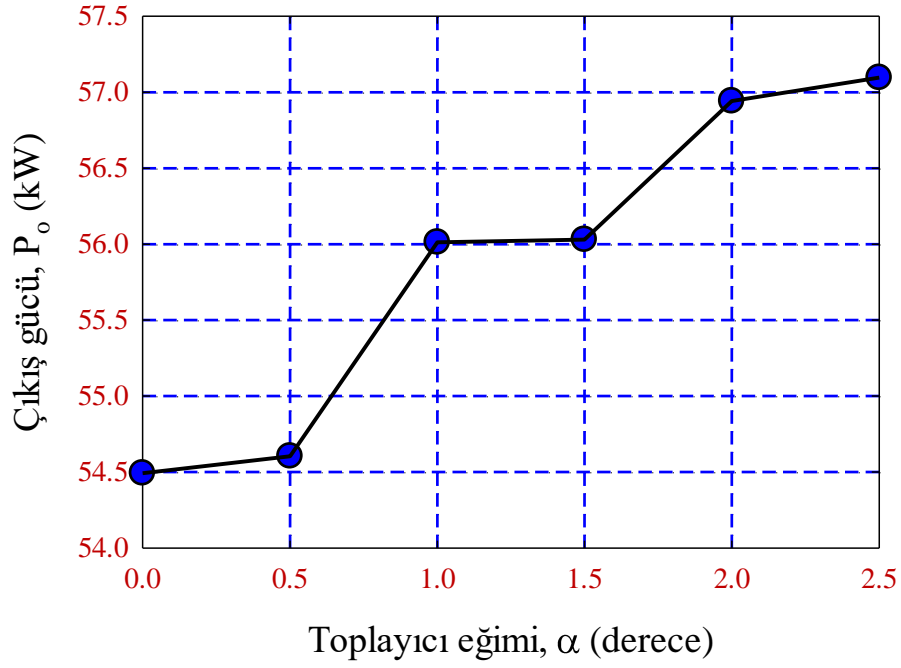
Toplayıcı verimi güneş bacası güç santrallerinin performans değerlendirilmesinde kullanılan temel kriterlerden biridir. Bu anlamda Şekil 5'te gösterildiği gibi farklı toplayıcı eğimlerinde Manzanares prototipinin toplayıcı verimi hesaplanmıştır. Yatay toplayıcı konumunda toplayıcı verimi % 38.8 olarak belirlenmiştir. Çalışılan eğim aralığında toplayıcı veriminin eğimin  $1^\circ$  olduğu durumda maksimum olduğu (% 41.4) görülmüştür. Daha yüksek eğim değerlerinde verimin üstel olarak azaldığı gözlenmiştir.  $\alpha = 2.5^\circ$  için  $\eta_{top}$  % 36.5 olarak tespit edilmiştir.



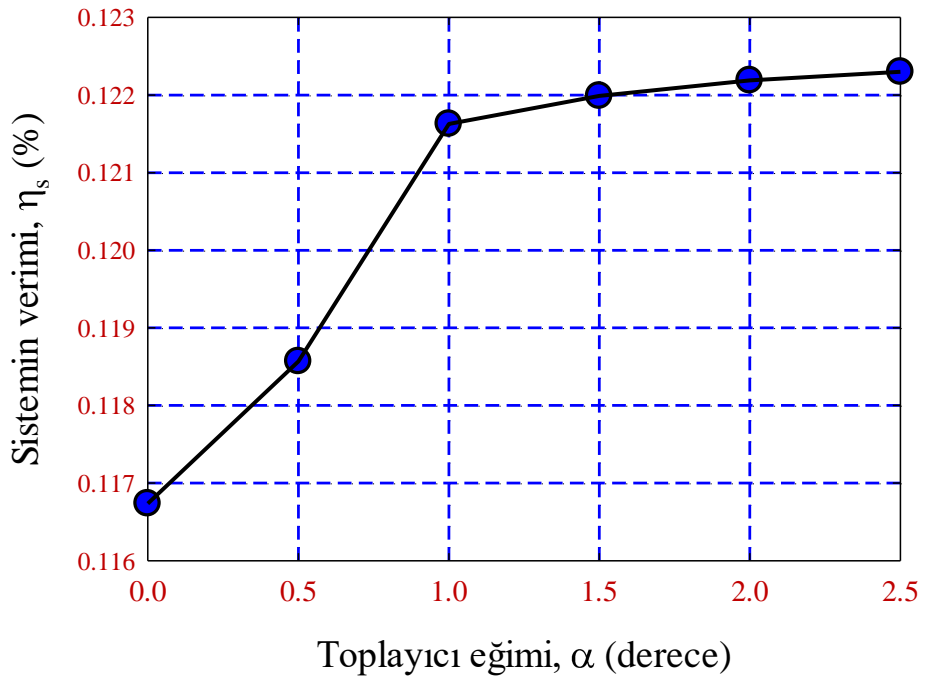
**Şekil 5:**  
Manzanares prototipinde toplayıcı eğiminin toplayıcı verimine etkisi



**Şekil 6:**  
Manzanares prototipinde toplayıcı eğiminin sistem havasının kütleli debisine etkisi



**Şekil 7:**  
Manzanares prototipinde toplayıcı eğiminin sistem çıkış gücüne etkisi



**Şekil 8:**  
Manzanares prototipinde toplayıcı eğiminin sistemin genel verimine etkisi

Sistemdeki havanın kütleli debisi ( $\dot{m}$ ) güneş bacalarının enerji üretim potansiyeline direkt olarak etki etmektedir. Bu sebeple kütleli debinin toplayıcı eğimine bağımlılığı Şekil 6'da gösterilmiştir. Yatay konumda Manzanares prototipi içerisinde hareket eden havanın kütleli debisi 1109.8 kg/s olarak belirlenmiştir. Artan toplayıcı eğimi ile kütleli debinin üstel olarak arttığı gözlenmiştir. Toplayıcı eğimi  $1^\circ$  iken  $\dot{m}$  1151.7 kg/s,  $2.5^\circ$  iken 1162.1 kg/s bulunmuştur. Bir diğer ifadeyle, toplayıcı eğiminin  $2.5^\circ$  olduğu durumda eğimsiz toplayıcıya göre kütleli debide % 4.7 iyileşme sağlanmıştır. Belirli bir eğim değerinden sonra kütleli debideki artışın bir maksimum değere yakınsadığı görülmektedir. Buradan hareketle, toplayıcı eğimi arttıkça bacanın doğal etkiler altındaki izin verebileceği maksimum kütle transferi potansiyeline ulaştığı anlaşılmaktadır. Eğimli toplayıcıda atmosferik etkiler toplayıcı boyunca baskın olsa da, baca kısmı maksimum kütle transferi potansiyeline ulaştığından kütleli debi doyuma ulaşmakta ve boğaz bölgesinde eğimsiz toplayıcıda hız dağılımı daha yaygın olurken, eğimli toplayıcıda daha ani bir hızlanma eğilimi görülmektedir. Toplayıcı eğiminin  $2.5^\circ$ 'den daha yüksek olduğu durumlarda toplayıcı veriminin azalacağı, ancak kütleli debideki sınırlı artışın bir sonucu olarak sisteme ait çıkış gücü ve verim değerlerinin kısmen de olsa artış sergileyeceği beklenmektedir. Kütleli debideki iyileşmenin sistemin çıkış gücüne olan direkt etkisi Şekil 7'de sunulmuştur. Eğimsiz toplayıcıya sahip Manzanares prototipinde çıkış gücü standart koşullarda 54492 W ( $\approx 54.5$  kW) olarak hesaplanmıştır. Toplayıcı eğimli olarak tasarlandığında çıkış gücünün ( $P_o$ ) üstel önemli ölçüde artış gösterdiği tespit edilmiştir. Toplayıcı eğimi  $1^\circ$  iken  $P_o$  56012 W,  $2.5^\circ$  iken 57097 W ( $\approx 57.1$  kW) bulunmuştur. Güneş bacası güç santrallerinde sistemin genel verimi oldukça düşüktür. Elbette bu durum verim eşitliğinde payda terimi olan gelen enerji miktarının, devasa toplayıcı alanlarından ötürü sistemin güç üretimine kıyasla oldukça yüksek olmasının bir sonucudur. Genel itibariyle artan toplayıcı eğimi ile sistemin genel veriminin üstel olarak arttığı Şekil 8'den anlaşılmıştır. Eğimsiz toplayıcı durumunda  $\eta_s$  % 0.1167 olarak tespit edilmiştir. Toplayıcı eğiminin  $2.5^\circ$  olduğu durumda  $\eta_s$  % 0.1223'e iyileşmiştir. Verimde yaklaşık % 4.8'lik bir iyileşmeye tekabül eden bu durum, esasen yatay ve eğimli toplayıcı tasarımlarında baca içerisinde bağıl basınç farklarının birbirine çok yakın olmasının bir sonucudur. Güneş bacası güç santrallerinde toplayıcının monte edildiği konstrüksiyon malzemesi, türbin tipi ve verimi sistemin genel performans parametreleri açısından önem arz etmektedir. Toplayıcılar sıklıkla paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımdan imal edilmiş profillere cıvata somun bağlantısı ile sabitlenir. Türbin olarak yaygın biçimde 4 kanatlı düşey eksenli türbinler tercih edilmektedir. İlgili 4 kanatlı düşey eksenli rüzgar türbinlerinde güç katsayıları ( $C_p$ ) uç-hız oranının ( $\lambda$ ) bir fonksiyonu olmakla birlikte maksimum durumda 0.40-0.50 aralığındadır.

## KAYNAKLAR

1. Ahirwar, M.J. ve Sharma, P. (2019) Analyzing the Effect of Solar Chimney Power Plant by Varying Chimney Height, Collector Slope and Chimney Diverging Angle, *International Journal of Innovative Research in Technology*, 6(7), 213-219.
2. Al Alawin, A., Badran, O., Awad, A., Abdelhadi, Y. ve Al-Mofleh, A. (2012) Feasibility study of a solar chimney power plant in Jordan, *Applied Solar Energy*, 48(4), 260-265. doi: 10.3103/S0003701X12040020
3. Bayareh, M. (2017) Numerical simulation of a solar chimney power plant in the southern region of Iran, *Energy Equipment and Systems*, 5(4), 431-437. doi:10.22059/EES.2017.28979
4. Cuce, E., Sen, H., ve Cuce, P.M. (2020) Numerical performance modelling of solar chimney power plants: Influence of chimney height for a pilot plant in Manzanares, Spain, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39, 100704.
5. Esfinadi, M.T., Raveshi, S., Shahsavari, M. ve Sedaghat, A. (2015) Computational study on design parameters of a solar chimney, *International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology*, Kuwait, 1-5.

doi:10.1109/SMART.2015.7399268

6. Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G. ve Schlaich, J. (1983) Solar chimneys part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares, *International Journal of Solar Energy*, 2(1), 3-20. doi: 10.1080/01425918308909911
7. Haaf, W. (1984) Solar chimneys: part ii: preliminary test results from the Manzanares pilot plant, *International Journal of Sustainable Energy*, 2(2), 141-161. doi:10.1080/01425918408909921
8. Hassan, A., Ali, M. ve Waqas, A. (2018) Numerical investigation on performance of solar chimney power plant by varying collector slope and chimney diverging angle, *Energy*, 142, 411-425. doi:10.1016/j.energy.2017.10.047
9. Hoseini, H. ve Mehdipour, R. (2018) Evaluation of solar-chimney power plants with multiple-angle collectors, *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering*, 8(1), 85-96. doi:10.22061/JCARME.2017.2282.1213
10. Hu, S., Leung, D.Y.C. ve Chen MZQ. (2017) Effect of divergent chimneys on the performance of a solar chimney power plant, *Energy Procedia*, 105, 7-13. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.273
11. Kalantar, V. ve Zare, M. (2011) Simulation of flow and heat transfer in 3D solar chimney power plants-numerical analysis, *Jordan International Energy Conference*, Amman, Jordan.
12. Khelifi, C., Ferroudji, F. ve Ouali, M. (2016) Analytical modeling and optimization of a solar chimney power plant, *International Journal of Engineering Research in Africa*, 25, 78-88. doi:10.4028/www.scientific.net/JERA.25.78
13. Larbi, S., Bouhdjar, A. ve Chergui, T. (2010) Performance analysis of a solar chimney power plant in the southwestern region of Algeria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 470-477. doi:10.1016/j.rser.2009.07.031
14. Li, J., Guo, H. ve Huang, S. (2016) Power generation quality analysis and geometric optimization for solar chimney power plants, *Solar Energy*, 139, 228-237. doi:10.1016/j.solener.2016.09.033
15. Ming, T., Richter, R.K., Meng, F., Pan, T. ve Liu, W. (2013) Chimney shape numerical study for solar chimney power generating systems, *International Journal of Energy Research*, 37(4), 310-322. doi:10.1002/er.1910
16. Mullett, L.B. (1987) The solar chimney overall efficiency, design and performance, *International Journal of Ambient Energy*, 8(1), 35-40. doi:10.1080/01430750.1987.9675512
17. Rabehi, R., Chaker, A., Aouachria, Z. ve Tingzhen, M. (2017) CFD analysis on the performance of a solar chimney power plant system: Case study in Algeria, *International Journal of Green Energy*, 14(12), 971-982. doi.org/10.1080/15435075.2017.1339043
18. Schlaich, J. (1995) *The solar chimney: electricity from the sun*, Edition Axel Menges, Stuttgart, Germany.
19. Sen, H., ve Cuce, E. (2020) Dynamic pressure distributions in solar chimney power plants: A numerical research for the pilot plant in Manzanares, Spain, *WSSET Newsletter*, 12(1), 2-2.
20. Tingzhen, M., Wei, L. ve Guoliang, X. (2006) Analytical and numerical investigation of the solar chimney power plant systems, *International Journal of Energy Research*, 30, 861-873. doi.org/10.1002/er.1191
21. Toghraie, D., Karami, A., Afrand, M. ve Karimipour, A. (2018) Effects of geometric parameters on the performance of solar chimney power plants, *Energy*, 162, 1052-1061.

doi:10.1016/j.energy.2018.08.086

22. Zandian, A. ve Ashjaee, M. (2013) The thermal efficiency improvement of a steam Rankine cycle by innovative design of a hybrid cooling tower and a solar chimney concept, *Renewable Energy*, 51, 465-473. doi:10.1016/j.renene.2012.09.051
23. Zhou, X., Yang, J., Xiao, B., Hou, G. ve Xing, F. (2009) Analysis of chimney height for solar chimney power plant, *Applied Thermal Engineering*, 29, 178-185. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.02.014