



**Bu bir MMO  
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

## **ÇAKIL TAŞI YATAĞI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN MODELLENMESİ**

**HALİL ATALAY**  
BOZOK ÜNİVERSİTESİ

**M. TURHAN ÇOBAN**  
EGE ÜNİVERSİTESİ

**OLCAY KINCA**  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ





# ÇAKIL TAŞI YATAĞI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN MODELENMESİ

Halil ATALAY  
M. Turhan ÇOBAN  
Olcay KINCAI

## ÖZET

Çakıl taşı yatağı, akışkan olarak havayı kullanan güneş enerjili ısıtıcılar için yaygın olarak tercih edilen bir ısı enerji depolama sistemidir. Çakıl taşı yatağı enerji depolama sisteminin tasarımında en çok dikkat edilmesi gereken husus minimum basınç düşümü ve pompa gücü ile yüksek ısı transfer hızını elde etmektir. İşletme koşulları altında, ısı transfer hızı ve basınç düşümü sistem parametrelerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu çalışmada java programında dilinde geliştirdiğimiz modelleme yazılımı ile çakıl taşı yatağı enerji depolama sisteminde güneş kolektöründen gelen havanın sıcaklığı ve çakıl taşı yatağı içindeki ortalama sıcaklık değişimleri incelenmiş ve buna bağlı olarak yatak içerisinde depolanan termal enerji miktarı ve kullanılabilir enerji miktarı değişimleri hesaplanarak yatak içerisinde gerçekleşen basınç düşümü belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş enerjisi depolama sistemleri, termal enerji depolama sistemi, çakıl taşı yatağı, termal enerji, sıcaklık dağılımı, ısı transfer hızı, basınç düşümü.

## ABSTRACT

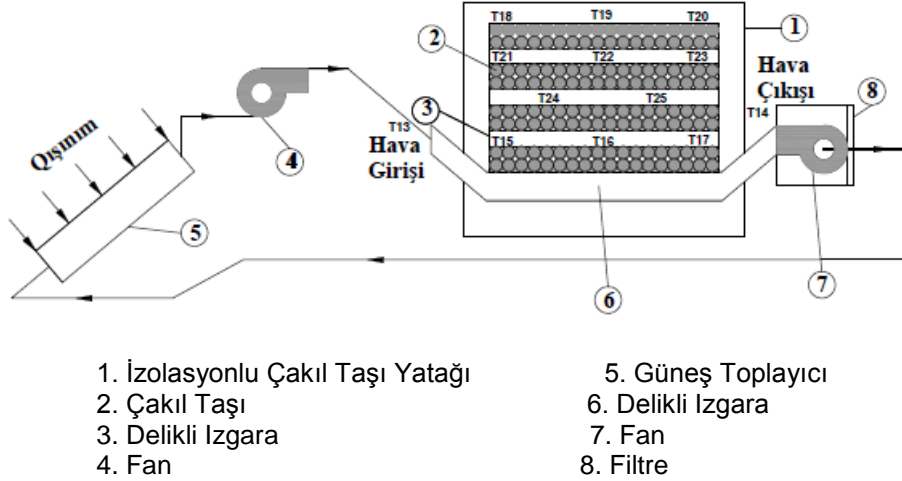
Packed bed or rock bed is very commonly known thermal energy storage system component for solar air heaters. The major concern for design packed bed energy storage system is to superior the heat transfer with minimum pressure drop or pumping power. Under the given operating conditions, system parameters could effect heat transfer and pressure drop in the bed considerably. In this paper, a simulation model was improved for evaluating based on temperature distribution(air temperature & mean bed temperature), thermal energy stored and available energy stored in the bed and determining pressure drop in bed using java programming language.

**Key Words:** Solar energy thermal systems, thermal energy storage system, packed bed, rock bed, thermal energy, temperature distribution, heat transfer speed, pressure drop.

## 1. GİRİŞ

Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında oldukça büyük bir öneme sahiptir. İnsanlar bu enerji kaynağını ısıtma, soğutma, elektrik üretimi vb. birçok amaç için kullanabilmektedir. Çakıl taşı enerji depolama sistemi çeşitli mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Özellikle, sıcak havanın termal enerji olarak depolanması gereken güneş enerjili ısıtma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Termal enerji depolama sistemi olarak tercih edilen bu sistem güneş ışınımının olmadığı veya zayıf olduğu durumlarda ek enerji kaynağı olarak oldukça önemli bir rol üstlenmektedir.

Çakıl taşı enerji depolama sisteminin şematik resmi şekil 1'de gösterilmektedir. Böyle bir sistemin oluşturulabilmesi için çakıl taşlarının toplanıp depo edilebileceği ve çakıl taşı yatağı olarak adlandıracağımız bir depo temin edilerek hava giriş- çıkış bağlantılarının oluşturulması gerekmektedir. Bu deponun iç kısmı şekilde de görüldüğü üzere çakıl taşları ve bu taşların hava ile daha kolay ve hızlı bir şekilde ısı transferini sağlayacak olan delikli izgaradan meydana gelmektedir. Kolektörlerden gelen sıcak hava yatağın tüm yüzeylerine yayılarak sahip olduğu termal enerjiyi doldurma süresi boyunca çakıl taşlarına transfer etmektedir.



1. İzolasyonlu Çakıl Taşı Yatağı
2. Çakıl Taşı
3. Delikli Izgara
4. Fan
5. Güneş Toplayıcı
6. Delikli Izgara
7. Fan
8. Filtre

**Şekil 1.** Çakıl taşı enerji depolama sisteminin şematik gösterimi

Çeşitli mühendislik uygulamaları için, çakıl taşı ile hava arasında gerçekleşen ısı transferine yönelik pek çok teorik ve deneysel çalışma yapılmıştır. Schmidt ve Willmot[1] gerçekleştirmiş oldukları çalışmada çakıl taşı enerji depolama sisteminde önemli bir dezavantaj olan basınç düşümünün yüksek olması durumunda çakıl taşı yatağına sıcak havayı ileten fan sisteminin daha fazla enerji tüketimine neden olacağından bahsetmişlerdir.

Çakıl taşı enerji depolama sisteminin dizaynı ile ilgili daha önce gerçekleştirilmiş olan çalışmalarda bu sistemin termal enerji depolama sistemi olarak etkili bir şekilde kullanılması için çakıl taşı yatağı içindeki basınç düşümünün azaltılmasına yönelik geliştirilen metotları ön plana çıkarmaktadır. Sagara ve Nakahara[2] yapmış olduğu çalışmada çakıl taşı yatağı içindeki basınç düşümünü azaltmak için kullanılan çakıl taşı boyutlarının daha geniş olması gerektiğini vurgulamışlardır. Singh[3], işletme koşulları altında çakıl taşı yatağı içindeki boşluk oranı ve kullanılan çakıl taşlarının boyutlarının genişliğinin etkilerini analiz etmek için deneysel çalışmalar yapmıştır. Çakıl taşı enerji depolama sisteminin performans etkilerini önceden belirleyebilmek için Nusselt sayısı ve sürtünme faktörüne bağlı olarak çeşitli korelasyonlar geliştirilmiştir. Singh ve Saini [4] çakıl taşı enerji depolama sisteminin performansını belirleyen simülasyon çalışmasında sistem parametrelerinin çakıl taşı yatağı içerisindeki ısı transferi ve akışkanın akış karakteristiği üzerinde önemli bir role sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada, Singh[3] tarafından verilen Nusselt Sayısı ve sürtünme faktörü korelasyonları kullanılarak java programında dilinde geliştirdiğimiz modelleme yazılımı ile çakıl taşı yatağı enerji depolama sisteminde güneş kolektöründen gelen havanın sıcaklığı ve çakıl taşı yatağı içindeki ortalama sıcaklık değişimleri incelenmiş ve buna bağlı olarak yatak içerisinde depolanan termal enerji miktarı ve kullanılabilir enerji miktarı değişimleri hesaplanarak yatak içerisinde gerçekleşen basınç düşümü belirlenmiştir.

## 2.ÇAKIL TAŞI GÜNEŞ ENERJİSİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN ISIL ANALİZİ VE MODELLENMESİ

Çakıl taşı güneş enerjisi depolama sisteminin kapalı bir çevrim halindeki şematik gösterimi şekil 1'de verilmiştir.

Bu çalışmada, şematik resimde de görüldüğü üzere enerji deposunun şarj süresi boyunca, kolektör çıkışındaki hava bir fan yardımıyla çakıl taşı enerji deposuna iletilecek ve bu durumda kolektör çıkışındaki hava sıcaklığı ile çakıl taşı yatağı girişindeki hava sıcaklığı yaklaşık olarak eş sıcaklık değerlerine sahip olacaktır. Çakıl taşı yatağının çıkışı da kolektöre bağlı olacağından havanın çakıl taşı yatağından çıkış sıcaklığı ile kolektöre giriş sıcaklığı da birbirine eşit olacaktır. Ayrıca, çakıl taşlarını muhafaza edeceğimiz çakıl taşı yatağı izolasyonlu bir yapıya sahip olduğundan bulunduğu çevre ortama ısı geçişi ve dolayısıyla herhangi bir ısı kaybı söz konusu olmamaktadır. Bu çalışmada, kullandığımız çakıl taşı enerji depolama sistemi ile ilgili parametre ve değerler tablo 1'de verilmektedir. Çakıl taşı yatağı için, güneşli bir günde ortalama 8 saatlik bir şarj süresi göz önünde bulundurularak hem çakıl taşı yatağı hem de havalı kolektör sistemi için java programlama dilinde bir simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir

**Tablo 1.** Çakıl Taşı Enerji Depolama Sistemi ile İşletme Parametre ve Değerleri:

S.No:	Parametre:	Değeri:
1	Çakıl Taşı Yatağı Hacmi( $V_b$ )	2 m <sup>3</sup>
2	Çakıl Taşı Yatağı Uzunluğu(L)	2 m
3	Çakıl Taşı Yatağı Başlangıç Sıcaklığı (T <sub>bi</sub> )	25 °C
4	Çakıl Taşı Çapı(De)	80 mm
5	Yuvarlatma Oranı ( $\varphi$ )	0.55-1.00
6	Kayma Oranı ( $\varepsilon$ )	0.31-0.63
7	Çakıl Taşı Yoğunluğu( $\rho$ )	1920 kg/m <sup>3</sup>
8	Hava Yoğunluğu( $\rho_{hava}$ )	1.20 kg/m <sup>3</sup>
9	Çakıl Taşı Özgül Isı Değeri(C <sub>ps</sub> )	835 J/kgK
10	Havanın Özgül Isı Değeri(C <sub>p</sub> )	1008 J/kgK
11	Havanın Dinamik Viskozitesi( $\mu$ )	18.5x10 <sup>-5</sup> kg/s*m
12	Çevre Sıcaklığı (T <sub>amb</sub> )	25 °C
13	Hava Giriş Sıcaklığı(T <sub>ai</sub> )	55 °C
14	Kolektör Alanı(A <sub>c</sub> )	6.9 m <sup>2</sup>
15	Kolektör İçindeki Hava Sıcaklığı(T <sub>i</sub> )	25 °C
16	Zaman Aralığı ( $\Delta t$ )	15 Dakika

### 2.1. Çakıl Taşı Yatağının Boyutlandırılması:

Genellikle istenilen sıcaklıkta depolanan enerji miktarına karşılık gelen çakıl taşı yatağı boyutlarının belirlenmesi gerekmektedir. Doldurma aşamasında, hava akışı tarafından taşınan absorbe edilmiş enerji miktarının çakıl taşı yatağı boyutu ile uyumlu olması gerekmekte ve çakıl taşı yatağı içindeki ortalama sıcaklık değeri doldurma süresi sonunda hemen hemen iç hava sıcaklığına eşit olmalıdır. Bu yüzden, çakıl taşı yatağı boyutlarını belirlemek için, aşağıdaki enerji dengesini yazmak mümkündür:

$$(m * C_p)_a * (T_{ai} - T_{bi}) * tch = (\rho * C_p)_s * (1 - \varepsilon) * V_b * (T_{bm} - T_{bi}) \quad (1)$$

Bu çalışmada, çakıl taşı yatağı içindeki hava sıcaklığı (T<sub>ai</sub>) ve yatak içindeki ortalama sıcaklık (T<sub>bi</sub>) sırasıyla 55 °C ve 25 °C olarak alınmıştır. tch ise çakıl taşı yatağının saniye zaman birimi cinsinden doldurma (şarj) süresidir. Çakıl taşı yatağı boyutlandırılması esnasında, doldurma süresi boyunca, havanın yataktan çıkış sıcaklığının yatak içindeki ortalama sıcaklığa(T<sub>bi</sub>) ve yatak içindeki hava sıcaklığının (T<sub>ai</sub>) ise kolektörden çıkan havanın sıcaklığına(T<sub>o</sub>) eşit olduğu kabul edilmiştir.

## 2.2. Havalı Güneş Kolektörünün Modellenmesi:

Kolektör tarafından iletilen enerji miktarı kolektör alanına, gelen ışınım değerine, hava akış oranına ve çevre koşullarına bağlıdır. Bu çalışmada havalı güneş kolektör modeli çakıl taşı enerji modeline adapte edilmiştir. Kolektör çıkış sıcaklığı değişimi, sabit gelen ışınım değeri ve sabit çevre sıcaklığı şartları altında kolektör iç sıcaklığı değişimi ile belirlenebilir. Yine de, kolektör çıkış sıcaklığı hava akış oranı değişimi tarafından sabit şekilde korunabilir. Hava akış oranı, Duffie ve Beckman [5] tarafından verilen kolektörde yararlı enerji kazanımı bağıntısı ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$Qu = Ac [I * F_R * (\tau\alpha) - F_R * U_l * (T_i - T_{amb})] \quad (2)$$

Yararlı enerji kazanımı ( $Q_u$ ) aynı zamanda aşağıdaki bağıntı ile de hesaplanabilmektedir:

$$Qu = (m * Cp)_a * (T_0 - T_i) \quad (3)$$

Eşitlik 2 ve 3 birleştirilerek hava akış oranı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

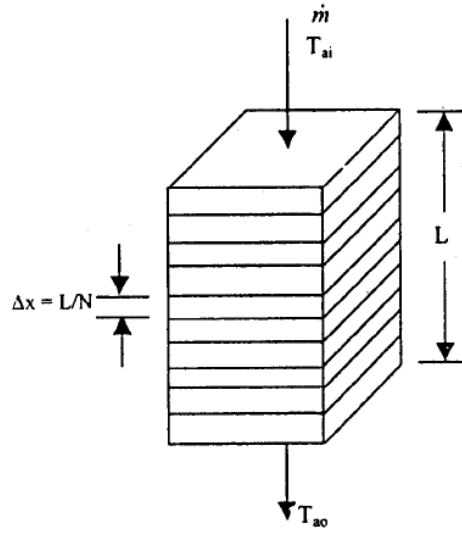
$$m_a = \frac{Ac * [I * F_R * (\tau\alpha) - F_R * U_l * (T_i - T_{amb})]}{Cp_a * (T_0 - T_i)} \quad (4)$$

Burada  $T_i$  kolektör içindeki hava sıcaklığı olup çakıl taşı yatağının ortalama sıcaklığı ( $T_{bi}$ ) ile eş değerde olduğu kabul edilebilir. Benzer şekilde,  $T_0$ , kolektördeki havanın çıkış sıcaklığı olup bu değer de yaklaşık olarak çakıl taşı yatağı içindeki havanın sıcaklığına ( $T_{ai}$ ) eşit olarak alınabilir.

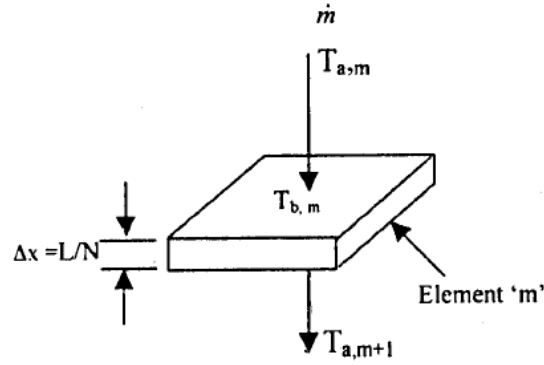
## 2.3. Çakıl Taşı Yatağı Modeli:

Güneş enerjisi destekli kapalı bir çevrime sahip çakıl taşı enerji depolama sisteminde, kolektörden ayrılan sıcak hava çakıl taşı yatağına girmektedir. Bu yüzden, kolektör çıkışındaki hava sıcaklığı ile çakıl taşı yatağına giriş sıcaklığı aynı olacaktır. Doldurma süresince, çakıl taşı yatağı içindeki sıcaklık yavaş yavaş artmaya başlayacağından kolektör çıkışındaki hava sıcaklığı değişebilmektedir. Abbud ve arkadaşları [6] yapmış olduğu çalışmada, çakıl taşı yatağı içinde kolektörden gelen sıcak havanın değişen hava akış oranına göre sabit bir sıcaklıkta kalmasını sağlamak için çakıl taşı yatağının iç kısmını katmanlara bölmeyi önermiştir. Bu çalışmada, çakıl taşı yatağı içindeki hava sıcaklığını sabit tutmak için doldurma süresi boyunca, hava akış oranının değişimine izin verilmiştir.

Bir çakıl taşı yatağında termal performansı önceden belirleyebilmek için, literatürde birçok matematiksel model geliştirilmiştir. Yine de, çoğu araştırmacı Mumma ve Marvin [7] tarafından geliştirilen modeli kullanmışlardır. Bu çalışmada, şekil 3a ve şekil 3b'de gösterilen, Mumma ve Marvin tarafından geliştirilen model kullanılarak 2 metre uzunluğundaki çakıl taşı yatağı 10 cm aralıklarla toplam 20 eşit parçaya bölünmüş ve yatak içindeki hava sıcaklığının ve ortalama yatak sıcaklığının değişimleri incelenmiştir.



Şekil 3a. Çakıl taşı yatağında N tane elementin şematik gösterimi



Şekil 3b. Çakıl taşı yatağında "m." elementin şematik gösterimi

Çakıl taşı yatağı içindeki hava sıcaklığının dağılımını aşağıdaki bağıntıyı kullanarak elde edebiliriz:

$$T_{a,m+1} = T_{b,m} + (T_{a,m} - T_{b,m}) * \exp(-\phi_1) \quad (5)$$

Burada,

$$\phi_1 = \frac{h_v AL}{N(mCp)_a} = \frac{NTU}{N} \quad (6)$$

$$N = \frac{L}{\Delta X} \quad (7)$$

$\Delta t$  zaman aralığında çakıl taşı yatağı içindeki ortalama sıcaklık değişimi aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir:

$$T_{b,m(t+\Delta t)} = T_{b,m(t)} + \left[ \begin{array}{l} \phi_2(T_{a,m} - T_{a,m+1}) \\ -\phi_3(T_{b,m} - T_{amb}) \end{array} \right] \Delta t \quad (8)$$

Bu bağıntıda,

$$\phi_2 = \frac{(mCp)_a N}{\rho_s AL(1-\varepsilon)Cps} \quad (9.a)$$

$$\phi_3 = \frac{(U\Delta A)_m}{(mCp)_a} \phi_2 \text{ 'dir.} \quad (9.b)$$

Nusselt Sayısı ile ilgili korelasyon Singh tarafından ifade edilmiş olup hacimsel ısı transferi katsayısını değerlendirmek için kullanılmıştır.

$$Nu = 0.437(Re)^{0.75}(\varphi)^{3.35}(\varepsilon)^{-1.62} \left[ \exp(29.03(\log \varphi)^2) \right] \quad (10)$$

Bu bağıntıda:

$$Nu = \frac{h_v De^2}{K} \quad (11.a)$$

$$Re = \frac{GDe}{\mu_a} \text{ 'dir.} \quad (11.b)$$

Çakıl taşı yatağında depolanan termal enerji miktarını aşağıdaki genel eşitliği kullanarak hesaplayabiliriz:

$$Q_t = \int_0^L (\rho Cp)_s (1-\varepsilon) A (T_{mm} - T_{im}) dx \quad (12)$$

Denklem 12'nin çözümünü sonlu farklar metodunu kullanarak aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz:

$$Q_t = (\rho Cp)_s (1-\varepsilon) A \frac{L}{N} \left( \sum_{n=1}^N T_{nm} - NT_{bi} \right) \quad (13)$$

Çakıl taşı yatağı içindeki kullanılabilir enerji miktarının dönüşümünü ise denklem 14'te verilen genel ifade ile elde edebiliriz:

$$Q_a = \int_0^L (\rho Cp)_s (1-\varepsilon) A \left[ (T_{mm} - T_{mi}) - T_{mi} \ln \left( \frac{T_{mm}}{T_{mi}} \right) \right] dx \quad (14)$$



Denklem 15'in çözümünü sonlu farklar yöntemini kullanarak çözdüğümüzde;

$$Q_a = (\rho C p)_s (1 - \varepsilon) A \frac{L}{N} \left[ \frac{\left( \sum_{n=1}^N T_{mn} - NT_{bi} \right) - T_{bi}}{\ln \left( \frac{T_{1m} T_{2m} T_{3m} \dots T_{Nm}}{T_{bi}^N} \right)} \right] \quad (15)$$

Çakıl taşı enerji depolama sistemi ile ilgili en önemli kavramlardan bir olan basınç düşümünü aşağıdaki bağıntı ile hesaplamak mümkündür:

$$\Delta P = \frac{f G^2}{\rho_a D e} \quad (16)$$

Sürtünme faktörünü (f) Singh [3] tarafından verilen eşitlik ile belirleyebiliriz:

$$f = 4.466(\text{Re})^{-0.2} (\varphi)^{0.696} (\varepsilon)^{-2.945} \left[ \exp(11.85(\log \varphi)^2) \right] \quad (17)$$

Burada,

$$G = \rho_a V = m/A \quad (18)$$

Basınç düşümünü karşılamak için kullanılacak olan fan ünitesinin enerji tüketimini hesaplamak için ise denklem (19) kullanılabilir.

$$W_{fan} = \frac{m_a \Delta P t_{ch}}{\rho_a} \quad (19)$$

Kolektörün ısı verimi ise aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{A_c I} 100 \quad (20)$$

Bu çalışmada, daha önce de tablo 1'de belirtildiği üzere, çakıl taşları arasındaki boşluk oranı ve yuvarlaklık oranları olarak aşağıda yer alan ve Singh [4] tarafından deneysel olarak elde edilen veriler kullanılmıştır.

Yuvarlaklık Oranı ( $\varphi$ ): 0.55, 0.63, 0.72, 0.80 ve 1.0

Boşluk Oranı ( $\varepsilon$ ): 0.31, 0.40, 0.45, 0.54 ve 0.63

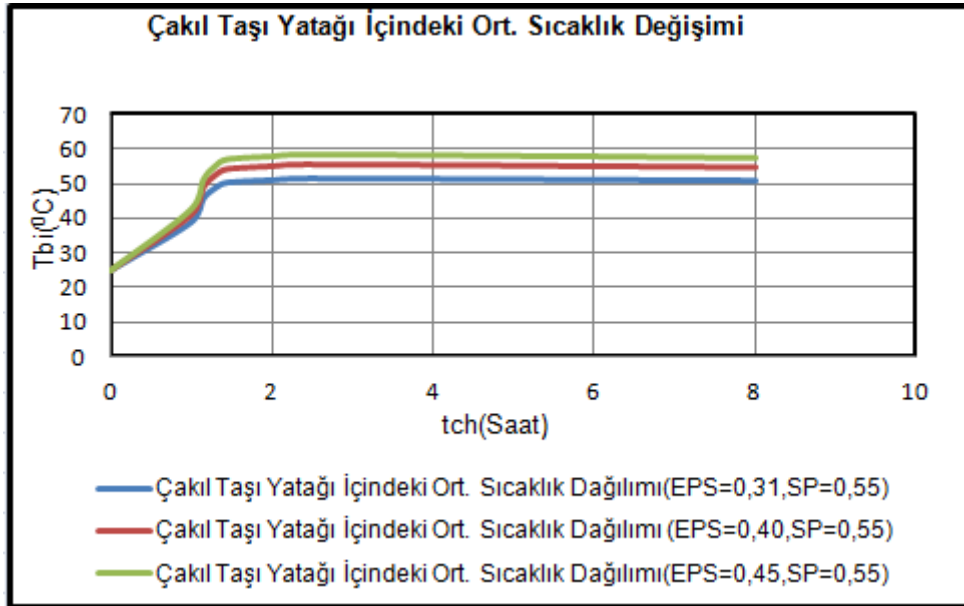
Yuvarlaklık oranı ve boşluk oranı değerleri geliştirmiş olduğumuz simülasyon programında geliş güzel bir şekilde kullanılmıştır. Fakat bu değerler birbirine karşılık gelecek şekilde de kullanılabilir.

### 3. BİLGİSAYAR PROGRAMININ GELİŞTİRİLMESİ:

Çakıl taşı enerji depolama sisteminde her bir elementteki sıcaklık dağılımı, termal enerji değişimi, kullanılabilir enerjinin değişimi, kolektöre gelen enerji miktarı, kolektörün ısı verimi, çakıl taşı yatağında meydana gelen basınç düşümü ve bu basınç düşümünü karşılayan fan tarafından tüketilen enerji miktarının hesaplanması sağlamak amacıyla java programlama dili kullanılarak bir model geliştirilmiştir. Bu çalışmada ihtiyaç duyulan veriler 15 dakikada bir ölçüm yapılacak şekilde göz önüne alınarak oluşturulmuş (Yapılan simülasyon programında veri alma süresi değiştirilebilmektedir.) ve sistemin tamamen şarj edildiği süreye kadar tekrarlanmıştır.

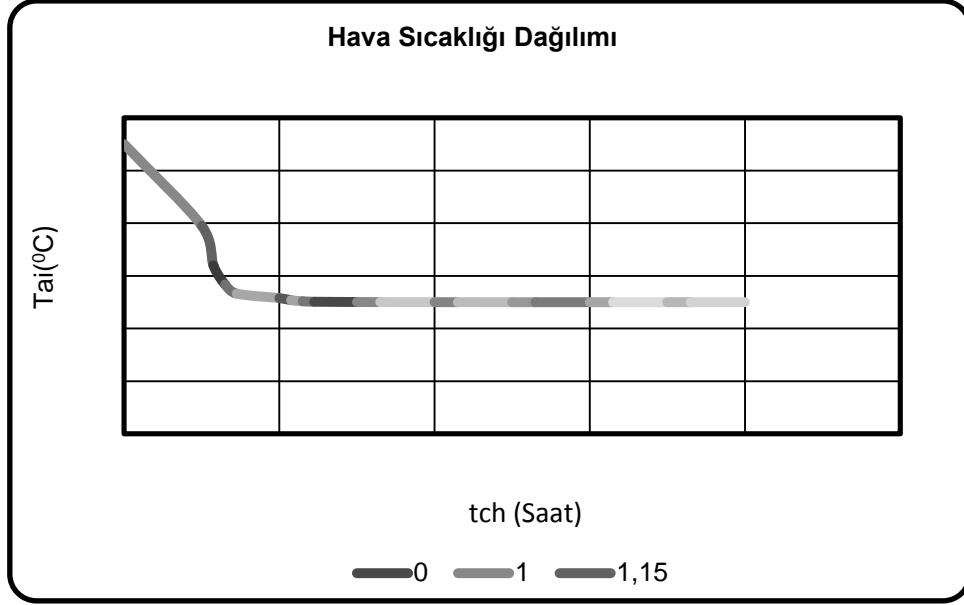
Bir örnek problem üzerinden model hesaplarını incelediğimizde; İzmir ili verilerine göre çakıl taşı enerji depolama sistemine kolektörden gelen havanın sıcaklığının  $55^{\circ}\text{C}$  ve çakıl taşı yatağının ortalama sıcaklığının  $25^{\circ}\text{C}$  olduğunu ve çakıl taşları arasındaki boşluk oranlarını sırasıyla 0.31, 0.40, 0.45, 0.54 ve 0.63, yuvarlaklık oranlarını ise sırasıyla 0.55, 0.63, 0.72, 0.80 ve 1.0 aldığımızda elde ettiğimiz veriler bir yaz günü için (08.00-16.00 saatleri arasında) aşağıda grafikler halinde gösterilmiştir:

Çakıl taşı yatağı içindeki ortalama sıcaklık dağılımının doldurma süresine göre değişimi şekil 4'te verilmiştir.



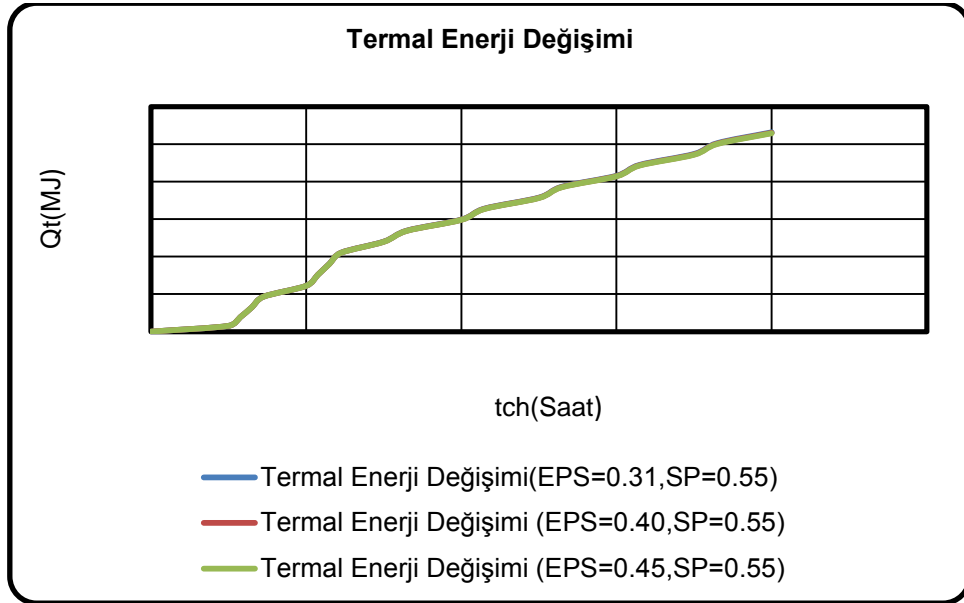
**Şekil 4.** Doldurma süresi boyunca çakıl taşı yatağı içindeki ortalama sıcaklık dağılımındaki değişim

Çakıl taşı yatağı içindeki hava sıcaklığının doldurma süresine göre değişimi şekil 5'te gösterilmiştir:



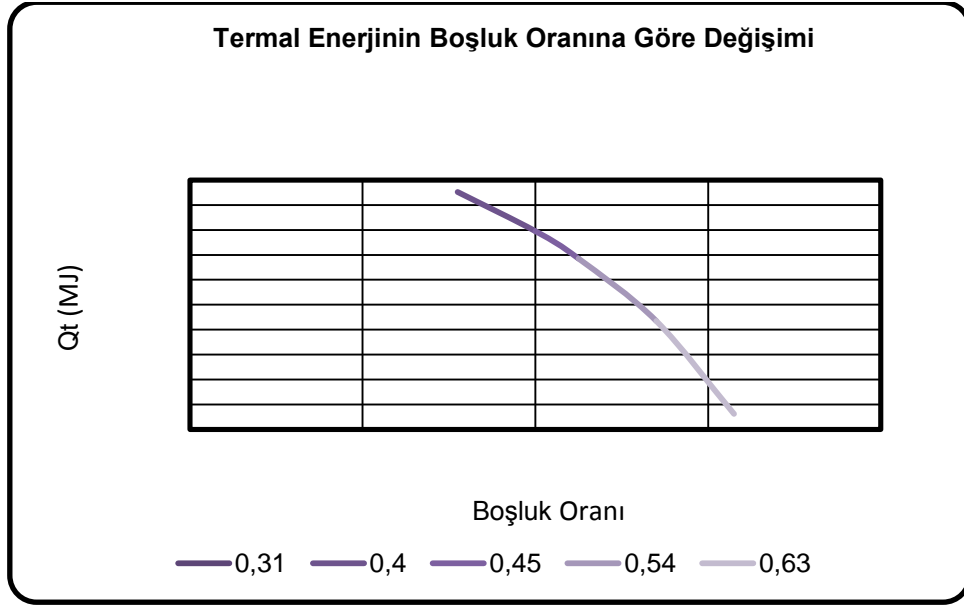
**Şekil 5.** Doldurma süresi boyunca çakıl taşı yatağı içindeki hava sıcaklığı dağılımındaki değişim

Doldurma süresi boyunca çakıl taşı yatağı içinde oluşan termal enerji miktarındaki değişim şekil 6'da verilmiştir:



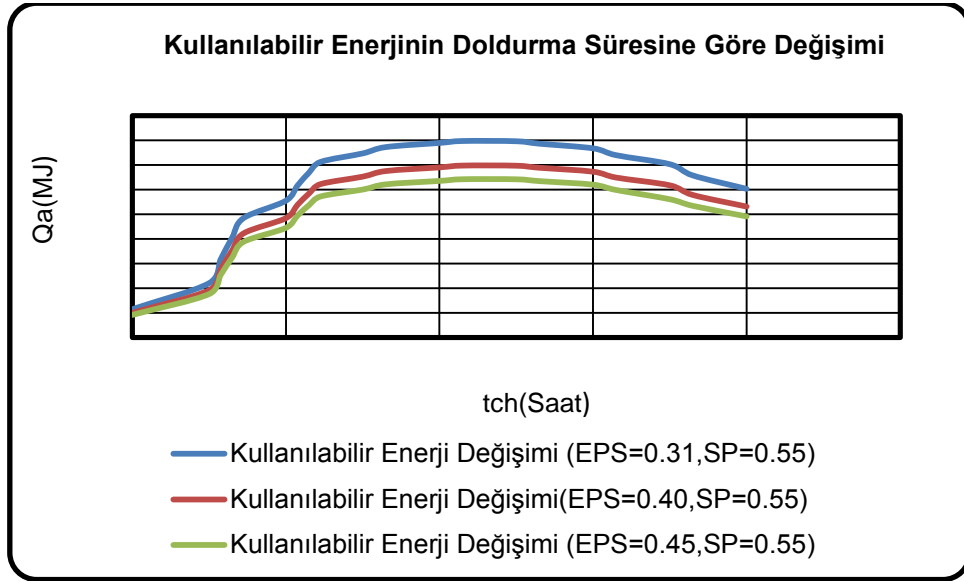
**Şekil 6.** Doldurma süresi boyunca çakıl taşı yatağındaki termal enerji miktarı değişimi

Toplam termal enerji miktarının boşluk oranına göre değişimini veren grafik şekil 7'de gösterilmiştir:



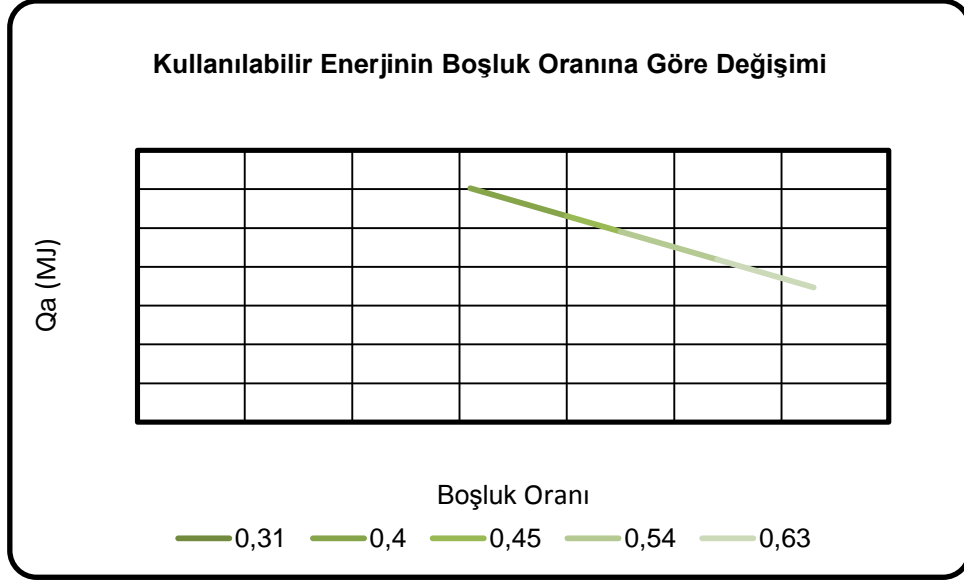
**Şekil 7.** Boşluk oranına göre çakıl taşı yatağındaki toplam termal enerji miktarında ki değişim

Çakıl taşı yatağı içindeki kullanılabilir enerjinin değişen boşluk yuvarlaklık oranları göz önüne alınarak doldurma süresi boyunca göstermiş olduğu değişim şekil 8'de verilmiştir:



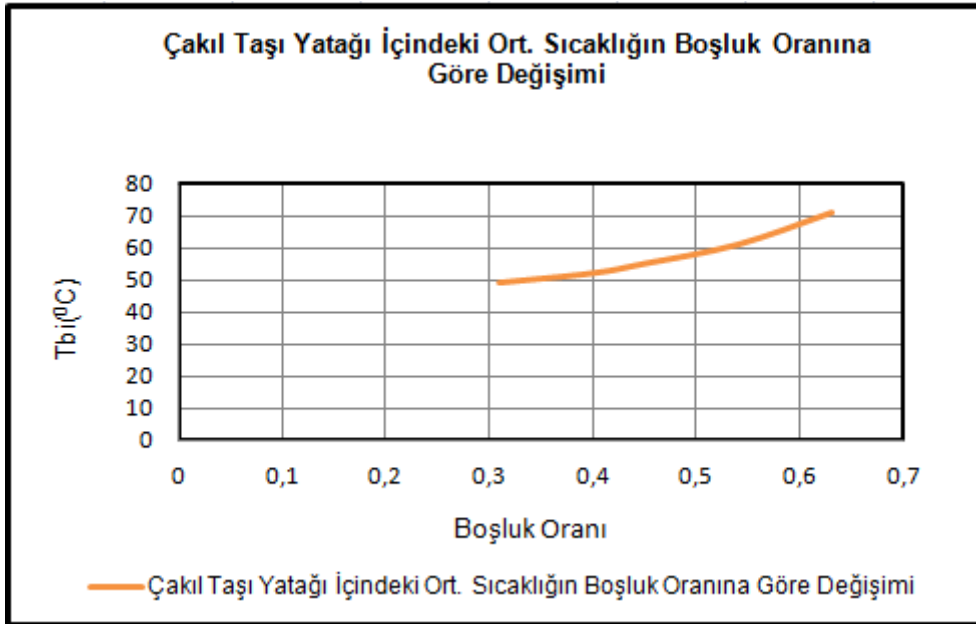
**Şekil 8.** Doldurma süresi boyunca farklı boşluk ve yuvarlaklık oranlarına göre çakıl taşı yatağı içindeki kullanılabilir enerji miktarı değişimi

Çakıl taşı yatağı içinde var olan toplam kullanılabilir enerji miktarının boşluk oranına göre değişimini veren grafik şekil 9'da gösterilmiştir.

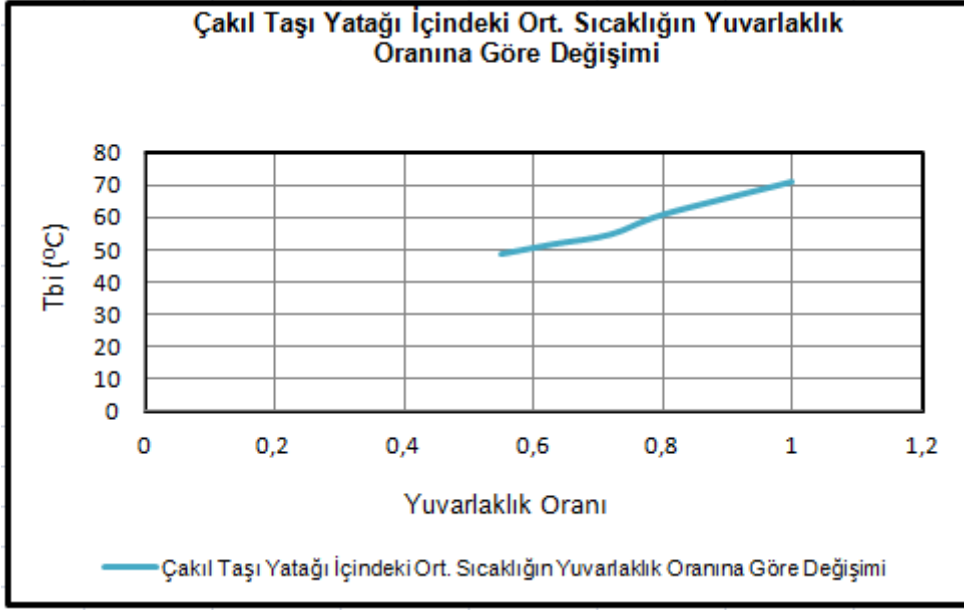


**Şekil 9.** Boşluk oranına göre çakıl taşı yatağı içindeki toplam kullanılabilir enerji miktarındaki değişim

Çakıl taşı yatağı içindeki ortalama sıcaklık dağılımının boşluk oranına ve yuvarlaklık oranına göre değişimini veren grafikler sırasıyla şekil 10a ve şekil 10b'de gösterilmiştir:

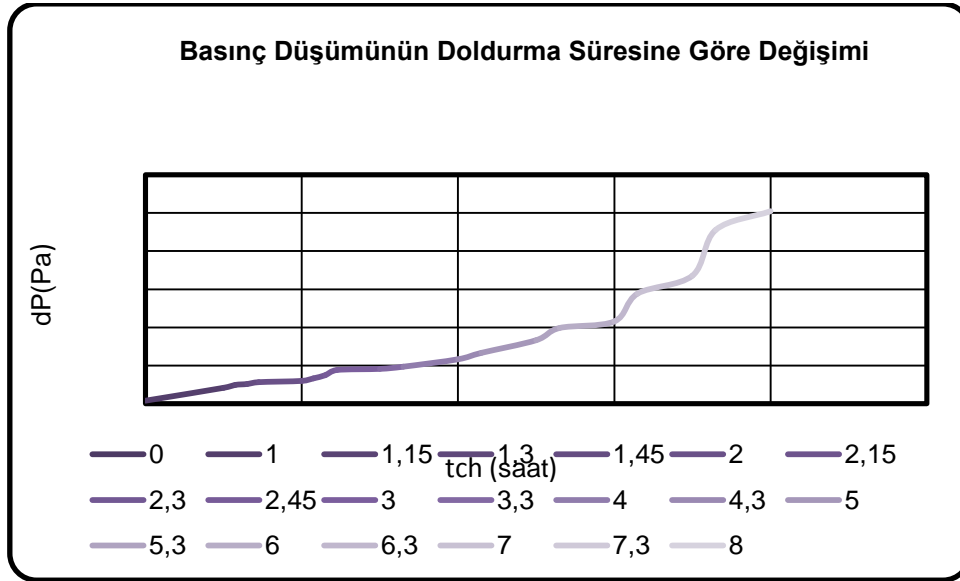


**Şekil 10a.** Boşluk oranına göre çakıl taşı yatağındaki ortalama sıcaklık değerindeki değişim



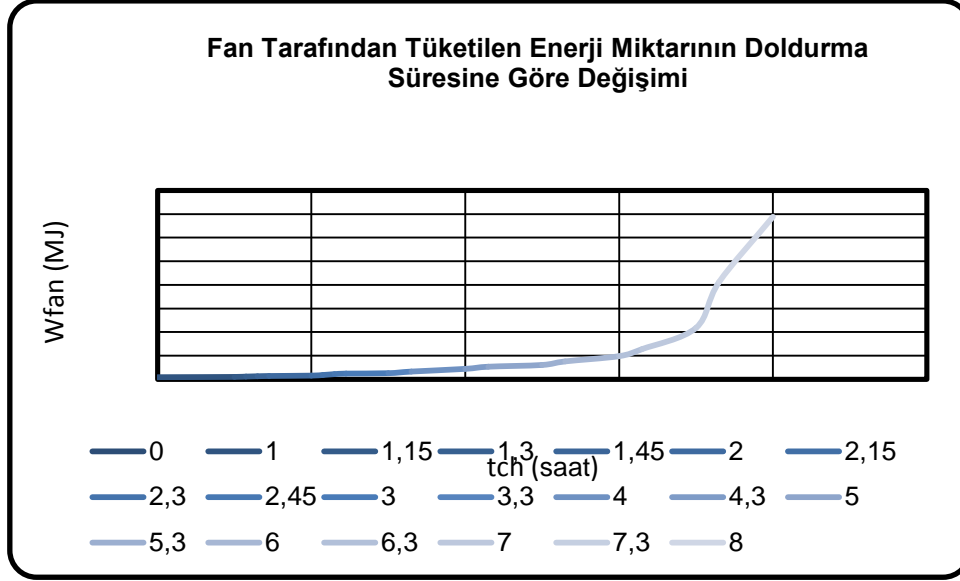
**Şekil 10b.** Yuvarlaklık oranına göre çakıl taşı yatağındaki ortalama sıcaklık değerindeki değişim

Çakıl taşı yatağı içerisinde meydana gelen basınç düşümünün doldurma süresine göre değişimi şekil 11'de yer alan grafikte verilmiştir:



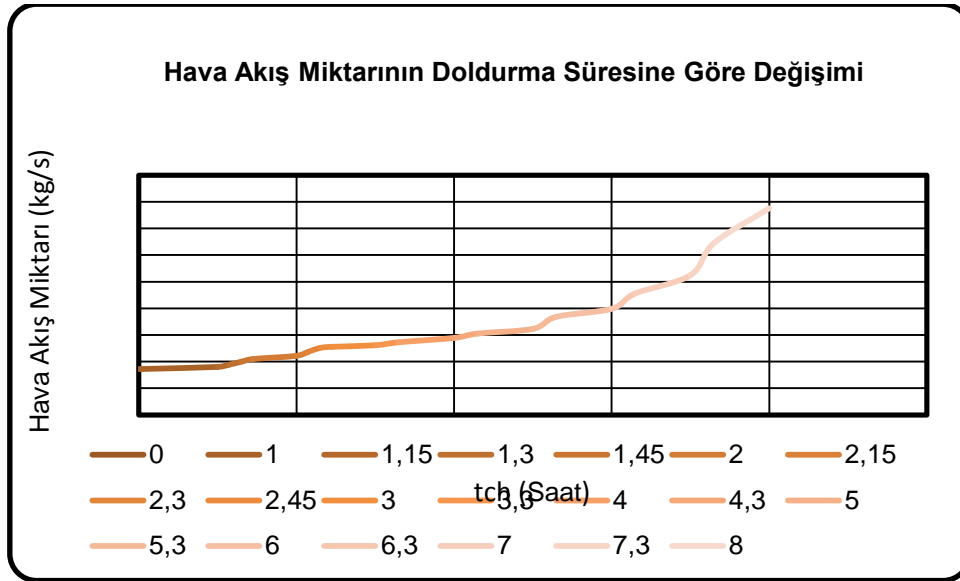
**Şekil 11.** Basınç düşümünün başlangıçtan itibaren doldurma süresine kadar olan değişimi

Çakıl taşı yatağı içerisinde meydana gelen basınç düşümünü karşılayacak olan fanın tükettiği enerji miktarının doldurma süresine göre değişimi ise şekil 12'de gösterilmiştir:



**Şekil 12.** Fan tarafından tüketilen enerji miktarının başlangıçtan itibaren doldurma süresine kadar olan değişimi

Çakıl taşı yatağı içerisindeki hava akış miktarının doldurma süresine göre değişimi şekil 13'de yer alan grafikte verilmektedir:



**Şekil 13.** Hava akış miktarının başlangıçtan itibaren doldurma süresine kadar olan değişimi

## SONUÇ

Bu çalışmada, çakıl taşı enerji depolama sistemi ile ilgili java programlama dili kullanılarak bir simülasyon modeli geliştirilmiş olup bu modelde kolektörden çıkıp çakıl taşı enerji depolama sistemine giren havanın sıcaklığındaki değişim ile çakıl taşı yatağının ortalama sıcaklığındaki değişim incelenmiştir. Bunun dışında, bu sıcaklık değişimlerine bağlı olarak çakıl taşlarının depoladığı enerji miktarı ile çakıl taşı yatağında kullanılabilir enerji miktarındaki değişimi ve yatak içerisinde meydana gelen basınç düşümü incelenmiş olup zamana, çakıl taşları arasındaki boşluk oranına ve yuvarlaklık oranına bağlı olarak yukarıdaki bölümde yer alan grafiklerde sonuçlar ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Isı taşıyıcıyı akışkan olarak hava kullanılmıştır. Sistemimizde yer alan hava akış kanalları yardımıyla hava hızı ve basınç düşümü ayarlanacaktır. Bu çalışmada, yüksek debiler söz konusu olmadığı için havanın yoğunluğunun düşük olmasından dolayı oluşabilecek işletme masrafları bu sayede minimum seviyeye inecektir. Gerçekleştirmiş olduğumuz bu çalışma sonucunda, çakıl taşlarını kullanarak depoladığımız bu enerjinin yaklaşık olarak kaç MJ olacağı, yatak içerisinde sıcaklığın nasıl değişeceği, bu enerji miktarının ne kadar sürede kullanılacağı, yatak içerisinde basınç düşümünün yaklaşık ne kadar olacağı ve bu basınç düşümünü karşılayacak olan fan gücünün yaklaşık olması ne kadar olması gerektiği kolay ve hızlı bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu sayede, bu tarz termal enerji depolama sistemlerinin optimum çalışma şartları ve tasarım kriterleri kolaylıkla belirlenebilmektedir. Bu çalışma şu an için simülasyon çalışması olarak verilmiştir. Önümüzdeki yaz ayları içerisinde deneysel olarak elde edeceğimiz veriler göz önüne alınarak sistemimizin optimum çalışma kriterleri daha belirgin ve güvenilir hale getirilecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] SCHMIDT, F.W.;WILLMOT A.J. Thermal Energy Storage and Regeneration, McGraw-Hill Book Co.,1981.
- [2] SAGARA,K.; NAKAHARA, N.Thermal Performance and Pressure Drop of Packed Beds with Large Storage Materials. Solar Energy,1991,47,157-163.
- [3] SINGH,R.; SAINI,J.S. Nusselt Number and Friction Factor Correlations for Packed Bed Solar Energy Storage System Having Large Sized Elements of Different Shapes.Solar Energy,2006,80,760-771.
- [4] SINGH,R.;SAINI R.P.; SAINI J.S. Simulated Performance of Packed Bed Solar Energy Storage System Having Storage Material Elements of Large Size Part 1,2,3.The Open Fuels&Energy Science Journal,2008,1,91-96.
- [5] DUFFIE,J.A.;BECKMAN,W.A.Solar Engineering of Thermal Processes, 2<sup>nd</sup> Ed.;John Wiley&Sons Inc.1991.
- [6] ABBUD,I.A.;LÖF,G.O.G.;HITTLE,D.C. Simulation of Solar Air Heating at Constant Temperature.Solar Energy,1995,54,75-83.
- [7] MUMMA,S.A.; MARVIN, W.C. A Method of Simulating the Performance of a Pebble Bed Thermal Energy Storage and Recovery Systems, ASME Paper 76- HT-73, ASME/AICHE National Heat Transfer Conference St. Louis, August 1976.

## ÖZGEÇMİŞ

### Halil ATALAY

1984 yılı, Gemlik doğumludur. 2006 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi, Uşak Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden bölüm 1. fakülte 2. olarak mezun olmuş, 2011 yılında ise EGE Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü Enerji A.B.D.'da MSc. Eğitimini tamamlamıştır. Şu anda Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmakta olup Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Isı-Proses A.B.D.'da doktora eğitimine devam etmektedir. Aynı zamanda, Ar-Ge Proje Uzmanlığı görevini de sürdürmektedir.



**Mustafa Turhan ÇOBAN**

1957 yılı Seben, Bolu doğumludur. 1978 yılında Ege Üniversitesi Makine Fakültesi, Makine bölümünü bitirmiş, 1982 Yılında Michigan Teknik Üniversitesi (A.B.D.) Makine Mühendisliği ve Mühendislik Mekaniği bölümünden Yüksek lisans derecesi, 1986 Yılında Utah Üniversitesi (A.B.D.), Mühendislik fakültesi, makine mühendisliği bölümünden doktora derecesi, 1995 Yılında Victoria Teknik Üniversitesi (Avustralya), Matematik Fakültesi, bilgisayar bölümünden Bilgisayar Mühendisliği Yüksek lisans derecesi almıştır. ARAS kompresör, Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, Jeotermal bölümü, Imperial Chemical Industries (Avustralya), Ceramic Fuel Cells Limited (Avustralya), TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsünde, Utah Üniversitesi (ABD) Makine mühendisliği, Ballarat Üniversitesi Mühendislik bölümü (Avustralya), Victoria Teknik Üniversitesi, makine mühendisliği bölümü (Avustralya), Nebraska Üniversitesi, makine mühendisliği bölümü(A.B.D.), Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi makine mühendisliği bölümlerinde çalışmıştır, Halen Ege Üniversitesi Makine Mühendisliğinde enerji konularında çalışmaktadır.

**Olca KINCAI**

1981 yılında İDMMA Makine Mühendisliği Bölümü'nden lisans, 1984 yılında ise YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı Proses dalından yüksek lisans ve 1991 yılında doktor unvanını almıştır. Şu anda Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde profesör olarak görev yapmakta olup enerji, ekserji, yenilenebilir enerji, ısı depolama, ısı prosesler, mekanik tesisatlar da korozyon konuları üzerinde çalışmalarını sürdürmektedir.

