

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**KORDİYERİT ESASLI SERAMİK MALZEMEDEN YAPILMIŞ  
TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hakan ESGEL**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**MAYIS 2014**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**KORDİYERİT ESASLI SERAMİK MALZEMEDEN YAPILMIŞ  
TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hakan ESGEL  
(301111011)**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Üner ÇOLAK**

**MAYIS 2014**



İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301111011 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Hakan ESGEL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KORDİYERİT ESASLI SERAMİK MALZEMEDEN YAPILMIŞ TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Üner ÇOLAK**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Hasan HEPERKAN**      .....

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Yrd. Doç. Dr. Coşkun FIRAT**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi**      :      **5 Mayıs 2014**  
**Savunma Tarihi**      :      **27 Mayıs 2014**



*Aileme,*





## ÖNSÖZ

İlk olarak, çalışmalarım sırasında bana yol gösteren, bilgi, tecrübe ve desteğini benden esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Üner ÇOLAK'a teşekkür ederim.

Ayrıca, bu tezin kontrol edilmesi konusundaki yardımlarından ve en başından beridir sunduğu manevi desteğinden dolayı arkadaşım Cansu DENİZ'e teşekkür ederim.

Beni çalışmalarımda cesaretlendiren, motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan ve tecrübelerini benimle paylaşarak doğru kararlar almamda etkin rol oynayan İbrahim ERSÖZ'e özel olarak saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu çalışma süresince sundukları özverilerinin yanı sıra, her konudaki sabır ve anlayışlarından, hiçbir zaman esirgemedikleri maddi ve manevi desteklerini dolayı annem Nezahat, babam Orhan ve ağabeyim Volkan'a teşekkür ederim.

Mayıs 2014

Hakan ESGEL  
Makine Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı.....	2
1.2 Literatür Araştırması .....	2
<b>2. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ .....</b>	<b>5</b>
2.1 Mekanik Enerji Depolama .....	6
2.1.1 Pompaj depolamalı sistemler .....	6
2.1.2 Sıkıştırılmış hava depolama .....	7
2.1.3 Volanlar .....	9
2.2 Kimyasal Enerji Depolama .....	9
2.3 Termal Enerji Depolama.....	10
<b>3. TERMAL ENERJİ DEPOLAMA .....</b>	<b>13</b>
3.1 Termal Enerji Depolama Yöntemleri .....	15
3.1.1 Duyulur ısı depolama.....	15
3.1.1.1 Su .....	17
3.1.1.2 Çakıl taşları .....	17
3.1.1.3 Toprak.....	19
3.1.1.4 Diğer ortamlar .....	19
3.1.2 Gizli ısı depolama.....	19
3.1.3 Termokimyasal ısı depolama .....	21
3.2 Termal Enerji Depolama Sisteminin Uygulamaları .....	22
3.2.1 Mevcut güneş enerji santralleri ve örnek termal enerji depolama sistemleri .....	22
3.2.2 Bina ve endüstriyel proses ısıtma .....	23
3.2.3 Mevsimsel ısıtma.....	24
<b>4. TASARIM PRENSİPLERİ .....</b>	<b>27</b>
<b>5. ÖRNEK TANK TASARIMI VE CFD ÇALIŞMALARI.....</b>	<b>31</b>
5.1 Malzeme Seçimi .....	31
5.1.1 Depolama ortamı malzemesi.....	31
5.1.2 Akışkan .....	32
5.1.3 Yalıtım malzemesi.....	32
5.2 Geometri .....	32
5.3 Fluent ile Sistemin Modellenmesi .....	36
5.3.1 Katı model oluşturulması.....	36

5.3.2 Ağ yapısının oluşturulması.....	37
5.3.3 Fluent ile analizin yapılması.....	38
5.4 CFD Çalışmalarının Sonuçları.....	43
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>57</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>59</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>67</b>

## **KISALTMALAR**

**CFD** : Computituonal Fluid Dynamics  
**CAD** : Computer Aided Design



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 3.1:</b> Duyulur ısı depolamada kullanılan bazı malzemelerin 20°C'deki ısı kapasiteleri.....	17
<b>Çizelge 3.2:</b> Duyulur ısı depolama sistemlerinde kullanılacak bazı malzemelere ait termal özellikler .....	18
<b>Çizelge 3.3:</b> Termal enerji depolama teknolojileri ile ilgili örnek veriler .....	23
<b>Çizelge 3.4:</b> Bazı termal güneş santralleri ile sahip oldukları termal enerji depolama sistemleri .....	25
<b>Çizelge 5.1:</b> Kordiyeritin özellikleri.....	31
<b>Çizelge 5.2:</b> Oluşturulan modellere ait ölçüler. ....	36
<b>Çizelge 5.3:</b> Ağ yapısının oluşturulması için seçilen parametreler .....	38
<b>Çizelge 5.4:</b> Modelde kullanılan malzemeler ve özellikleri. ....	41
<b>Çizelge 5.5:</b> Analiz sonuçlarına göre, her bir modelde depo edilen enerji miktarları	44





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması. ....	6
Şekil 2.2: Pompaj depolamalı sistem.....	7
Şekil 2.3: Yer altı pompaj depolamalı sistemi. ....	8
Şekil 2.4: Sıkıştırılmış hava depolama sistemi. ....	9
Şekil 2.5: 35kWh'lik enerji depolama kapasitesine sahip bir volanın kesiti.....	10
Şekil 3.1: Takıl taşları ile ısı depolama sistemi .....	18
Şekil 3.2: Saf malzemelerin ısıtılması süresince gerçekleşen sıcaklık değişimi.....	20
Şekil 4.1: Termal enerji depolama sistemleri için tesis, bileşen ve sistem düzeyinde tasarım esasları .....	28
Şekil 5.1: Kordiyerit malzemeden yapılmış altıgen tuğla .....	32
Şekil 5.2: Referans modele ait ölçüler .....	33
Şekil 5.3: Referans modelden farklılaştırılarak oluşturulan yeni modellerin içyapısı .....	34
Şekil 5.4: Konik (soldaki) ve küresel (sağdaki) tank tasarıma sahip tank için akış profilleri.....	35
Şekil 5.5: Designmodeller ile katı modelin düzenlenmesi .....	37
Şekil 5.6: Yüzeyle verilen isimler .....	38
Şekil 5.7: Meshing eklentisi ile ağ yapısının oluşturulması. ....	39
Şekil 5.8: Fluent programının açılış ekranı ve yapılan ayarlar. ....	40
Şekil 5.9: Analiz için genel ayarlar .....	40
Şekil 5.10: Zaman adımı ile ilgili değerler .....	42
Şekil 5.11: Analiz sonucunda modellerin sahip olduğu maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık değerleri .....	45
Şekil 5.12: Referans model (Model2) ve giriş çapının değiştirilmesi ile oluşan yeni modellerin sıcaklık dağılımı.....	47
Şekil 5.13: Yeni referans model (Model5) ve giriş çapının değiştirilmesi ile oluşan yeni modellerin sıcaklık dağılımı .....	48
Şekil 5.14: Yeni referans model (Model8) ve giriş çapının değiştirilmesi ile oluşan yeni modellerin sıcaklık dağılımı .....	49
Şekil 5.15: Model1-2-3'e ait akış profilleri .....	50
Şekil 5.16: Model4-5-6'ya ait akış profilleri .....	51
Şekil 5.17: Model7-8-9'a ait akış profilleri .....	52
Şekil 5.18: Model7'nin deşarj süresince sıcaklık değişimi .....	53
Şekil 5.19: Deşarj süresince ortalama sıcaklıklar .....	54
Şekil 5.20: Deşarj süresince ortalama sıcaklıklar .....	54
Şekil 5.21: Model7'nin bekleme durumundaki sıcaklık değişimi .....	55
Şekil 5.22: Bekleme durumunda ortama olan ısı kaybı. ....	56
Şekil 5.23: Bekleme durumunda kordiyerit sıcaklığının değişimi ve depolanan enerjideki değişim.....	56



## SEMBOL LİSTESİ

<b>U</b>	: Toplam iç enerji, kJ
<b>m</b>	: Kütle, kg
<b>c<sub>p</sub></b>	: Sabit basınçta özgül ısı, kJ/kg·K
<b>T</b>	: Sıcaklık, °C ya da K
<b>h</b>	: özgül entalpi, kJ/kg
<b>P</b>	: yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>



## **KORDİYERİT ESASLI SERAMİK MALZEMEDEN YAPILMIŞ TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN ANALİZİ**

### **ÖZET**

Artan dünya nüfusu ve yaşam standartlarına bağlı olarak enerjiye olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Öte yandan, konvansiyonel enerji kaynaklarının fiyatlarının artması, kaynakların sonlu oluşu ve artan çevre bilinci, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve enerji verimliliğinin önemini ortaya çıkarmıştır.

Gelgit enerjisi, nükleer enerji ve jeotermal enerji dışında kalan tüm enerji türlerinin temel kaynağı olan güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynağı olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Öte yandan, yenilenebilir enerji kaynaklarının süreklilik arz etmemesi ve elde edilmesi ile tüketilmesi arasındaki zaman farkı, enerji kaynağı olarak kullanılmalarına bir engel teşkil etmektedirler. Güneş enerjisi sistemlerinde bu sorunları ortadan kaldırmak için termal enerji depolama sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Termal enerji depolama sistemleri; güneş enerjisi ya da atık ısı gibi kaynaklardan elde edilen ısıyı depo edilmesini ve ihtiyaç halinde kullanılmasını sağlamaktadır.

Termal enerji depolama sistemleri; termokimyasal ısı depolama sistemleri, gizli ısı depolama sistemleri ve duyu ısı depolama sistemleri olarak üç temel gruba ayrılmaktadırlar.

Bu çalışma kapsamında termal enerji depolama sistemleri ile ilgili literatür araştırması yapılmış, sistemlerin sahip olduğu avantaj ve dezavantajlara değinilmiştir. Daha sonra, mevcut sistemlere alternatif üretmek amacıyla seramik malzeme ve havanın kullanıldığı bir depolama sistemi tasarlanmıştır. Seramik malzeme ve havanın seçilme nedeni, günümüzde sıklıkla kullanılan erimiş tuzların çalışma sıcaklıklarının çok daha üzerindeki sıcaklıklarda çalışabilmesidir. Seramik malzeme olarak kordiyerit seçilmiştir. Ayrıca kordiyerit tuğlalar oluşturarak, istenilen büyüklükteki enerji depolama sisteminin kolaylıkla uygulanabilmesinin önü açılmıştır.

Sistemin minimum çalışma sıcaklığı 900K, maksimum çalışma sıcaklığı 1200K olarak planlanmış ve çalışmalar bu değerlere göre yapılmıştır. Depolama tankının giriş çapının tank çapına oranının, tank yüksekliğinin tank çapına oranının, tank içerisindeki akış kanallarının büyüklüğünün, yani ortam porozitesinin depo edilen enerjiye olan etkisi araştırılmıştır. Çalışmaların CFD analizleri yapılmıştır ve elde edilen değerler şekil ve çizelgeler halinde sunulmuştur.

Yapılan çalışmalar neticesinde performansı en iyi olan model için deşarj ve bekleme süresindeki davranışları da yine CFD analizleri ile araştırılmıştır.

Yapılan analizler göstermiştir ki tank giriş çapının depo edilen enerjiye etkisi ihmal edilebilir boyuttadır. Ancak ortam porozitesinin değişimi, depo edilen enerjiyi büyük oranda etkilemektedir. Akışın gerçekleştiği kanalların küçültülmesi, hem akış

çizgilerini olumlu yönde etkilemiştir, hem de yüzey alanının artmasını sağlamıştır. Bu sayede sistemin enerji depolama kabiliyetinin arttığı sonucuna varılmıştır.

Malzemenin kalınlığı, malzemenin ısı iletkenlik değeri göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Isı iletim katsayısı düşük olan kordiyerit malzemesinin kalınlığının azaltılması, depo edilen enerji miktarını olumlu yönde etkilemiştir. Yapılan iki model arasında toplamda %6,17 oranında azalan kütleyle rağmen depo edilen enerjideki %3,17lik azalma, bu durumun göstergesidir. Malzeme kalınlığının daha az seçilmesi, aynı çap için toplam yüzey alanının da artmasını sağlamıştır.

Yükseklik ve tank çapı arasındaki oranın değişimi de ortama olan ısı kaybını etkilediği için sistemin enerji depolama kabiliyetini etkilemektedir. Tank boyunun %25 artırılmasının depo edilen enerjiyi %22,94 oranında artırmıştır.

# **ANALYSIS OF A THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM MADE OF CORDIERITE-BASED CERAMIC MATERIAL**

## **SUMMARY**

Increasing world population and life standards increase energy demand day by day. The increase in the cost of conventional energy sources, limited resources, and increasing environmental consciousness reveal the importance of renewable energy sources and energy efficiency.

The origin of all energy sources except for tidal energy, nuclear energy and geothermal energy is solar radiation and it has a big potential as a renewable energy source.

On the other hand, the discontinuity of renewable energy sources causes mismatch between the loads and the available resources. Therefore, it inhibits the use of renewable energy sources as an alternative source. For solar thermal power plants, thermal energy storage systems are utilized to produce power when the solar radiation is not available; however, demand of electricity is high. Similarly, thermal storage systems are also utilized where the waste heat is available.

Thermal energy storage systems have several advantages over mechanical or chemical energy storage systems. Thermal storage systems generally have lower capital costs when compared with other type of storage systems, as well as having very high operating efficiencies.

There are three main types of thermal energy storage systems, sensible heat, latent heat, and thermochemical heat storage systems.

Thermal energy storage systems have a wide variety of functionalities. The main purposes of using thermal energy storage systems are increasing generation capacity, enable better operation of cogeneration plants, shifting energy sales to high-cost periods, and increase system reliability.

In this study, a new high temperature thermal storage system employing cordierite type ceramic heat storage medium was introduced and, air is selected as heat transfer fluid. The reason of employing ceramic material and air is that the maximum temperature achievable in this case is much higher than that for the molten salt storage system.

The candidate material for high temperature thermal storage systems with sensible heat must have thermal stability, high heat capacity, and high density.

Cordierite was selected as a ceramic material for the thermal energy storage system due to its desired characteristics and bricks made out of cordierite were designed to make different size of thermal energy storage system easily.

Honeycomb structure was used to build this bricks since this structure has larger surface area to increase heat transfer between fluid and heat storage medium in the tank.

Density, specific heat, and thermal conductivity of cordierite are 2600kg/m<sup>3</sup>, 1465 J/kg•K, 3W/m•K, respectively. In a system made of cordierite material, the operating temperature can be up to 1650K. These characteristics make cordierite a good material for sensible thermal energy storage applications.

Rockwool was used as an insulation material for the tank. Besides it has 0.5 W/m•K thermal conductivity, it can reach very high, up to 1300K, operating temperature. Rockwool has already been used in many thermal energy storage applications.

Minimum and maximum operating temperatures of the storage system were considered as 900K and 1200K, respectively. CFD analyses were performed with these design parameters.

In this study, the proper dimensions of the system were investigated by analyzing the effect of height-to-diameter ratio as well as inlet-to-outer diameter by means of CFD analyses.

The model, resulting in the best performance in this study, was used for further CFD analyses and its behaviour during discharging and standby were determined.

The storage tank was designed by using a CAD program and design was refined with the Designmodeler program, provided by the ANSYS software. The effective work without refining the structure was difficult because of the presence of many undefined surfaces.

When pressure-based, absolute, transient models were selected, analyses resulted in lower residues. Gravity also affected in -y direction and value of the gravity was considered as -9.81 m/s<sup>2</sup> in y direction.

For inlet boundary condition, “Mass-Flow-Inlet” was used and mass flow rate was selected as 0.01kg/s. Total temperature value was also used as 1200K.

Model has heat losses to ambient, and therefore, fixed wall temperature was determined as 300K. Body Force Weighted solution method was used for pressure calculations.

Analysis was performed with Fixed Time Step mode resulted in lower residues.

The storage tank was divided into 12 symmetrical pieces and analyses were made for one piece. Totally, 9 different models were compared in this study. After the 9 analyses, 2 more analyses were performed to study the effect of tank height. All models were run to consider a charge time of 4000s. The best model among the 9 models yielded in a 6.78kWh of thermal energy and the worst one yielded in a 4.89kWh.

The results of these CFD studies showed that the effect of inlet diameter of thermal storage tank was negligible. Inlet diameter slightly effects flow lines in the tank, but the other parameters have stronger effect than that for the inlet diameter.

Porosity of the medium effects flow lines too much. If the porosity increases, fluid can flow reverse direction in the tank, and the velocity difference between the channels can be higher. Therefore, central channels get hot and outer ones cannot get hot as well as central ones. Moreover, decreasing porosity supply more surface area,



this increases heat transfer between cordierite and air. For these reasons, higher porosity means less storage efficiency.

The thickness of material should be determined by considering thermal conductivity of the material. Cordierite has lower thermal conductivity. Thus, decreasing the thickness of cordierite affect stored energy positively.

To analyze the effect of thickness, two models were compared. One of the models has 6.17 percent less material than the other one. The result of decreasing 6.17 percent mass, stored energy decreases only 3.17 percent. Surface area also increases in this situation.

If the height of the tank increases, the amount of material increases. This affects storage energy positively. On the other hand, heat losses also increase with increasing height. CFD analyses showed that when height of the tank was increased as 25 percent, stored energy increased 22.94 percent. When height of the tank was increased as 50 percent, stored energy increased 44.58 percent.

As a result, the proposed material and geometry may be effectively utilized as a heat storage medium for high temperature applications.



## 1. GİRİŞ

Artan dünya nüfusu ve yaşam standartlarına bağı olarak enerjiye olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Öte yandan, konvansiyonel enerji kaynaklarının fiyatlarının artması, kaynakların sonlu oluşu ve artan çevre bilinci, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve enerji verimliliğinin önemini ortaya çıkarmıştır.

Gelgit enerjisi, nükleer enerji ve jeotermal enerji dışında kalan tüm enerji türlerinin temel kaynağı olan güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynağı olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Dünya üzerine bir saatte düşen güneş enerjisi miktarının, tüm dünyanın bir yılda kullandığı enerjiden daha fazla olması, güneş enerjisinin popülerliğini artırmaktadır.

Öte yandan, yenilenebilir enerji kaynaklarının süreklilik arz etmemesi ve elde edilmesi ile tüketilmesi arasındaki zaman farkı, enerji kaynağı olarak kullanılmalarna bir engel teşkil etmektedirler. Güneş enerjisi sistemlerinde bu sorunları ortadan kaldırmak için termal enerji depolama sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Termal enerji depolama sistemleri; güneş enerjisi ya da atık ısı gibi kaynaklardan elde edilen ısının depo edilmesini ve ihtiyaç halinde kullanılmasını sağlamakta olup, duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal ısı depolama sistemleri olarak üç temel gruba ayrılmaktadırlar.

Termokimyasal ısı depolama sistemleri; tümüyle tersinir reaksiyonlarda molekülün oluşumu ve parçalanması sırasında moleküler bağlarda enerjinin emilmesi ve serbest bırakılması esasına dayanmaktadır. Depolanan ısı miktarı, endotermik reaksiyon ısısına, depolama malzemesi miktarına ve dönüşüm verimine bağlıdır.

Gizli ısı depolama sistemleri; malzemenin katı halden sıvı haline ya da sıvı halden gaz haline geçişi sırasında enerjiyi bünyesine alarak, ters yöndeki faz değişimi sırasında bu ısıyı ortama vermesi esasına dayanır. Faz değişimi sırasında sıcaklığın sabit oluşu nedeniyle düşük sıcaklık farklarında yüksek enerji depolama miktarı sağlaması, bu yöntemi ilgi çekici kılmıştır.

Duyulur ısı depolama sistemleri; ısının depolanması sırasında depolama malzemesi olan katı veya sıvıda sıcaklık artışının olduğu sistemlerdir. Depolamada kullanılan malzeme miktarı, malzemenin ısı kapasitesi ve malzemedeki sıcaklık değişimi, depolanan enerji miktarını belirler. Akışkan olarak su veya hava gibi, depolama malzemesi olarak çakıl taşları, kayalar, seramikler gibi kolay temin edilebilen maddelerin kullanılması bu yöntemin en önemli avantajlarıdır. Ayrıca sıcaklık üst limiti diğer yöntemlerdekinden daha yüksek olduğu için, diğer yöntemlerle kıyaslandığında yüksek ısı verim sağlamaktadır.

## **1.1 Tezin Amacı**

Termal enerji depolama sistemleri hakkında yapılan çalışmalar incelenerek, mevcut sistemlere alternatif yeni bir sistem önerisi getirmek amacıyla hazırlanan bu tezde, kordiyerit seramik malzemedeki yapılan ısı depolama sisteminin ısı depolama kabiliyeti incelenmiştir.

## **1.2 Literatür Araştırması**

Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin çevrim santrallerinde kullanılarak elektrik üretilmesi, doğrudan buhar elde edilerek proseslerde kullanılması gibi uygulamalar dünya genelinde git gide yaygınlaşmaktadır [1-4]. Bu tesislerin ihtiyaç duyduğu termal enerjinin güneşten sağlanması durumunda ortaya çıkan süreksizliğin önüne geçmek için farklı termal enerji depolama yöntemleri geliştirilmiştir [5,6]. Depolama sistemlerindeki eğilim dünya genelinde erimiş tuzların kullanılması yönündedir [7,8]. İlk başlarda yalnızca faz değişimindeki gizli ısıdan yararlanılmak üzere kullanılan tuzlar, sonraki zamanlarda doğrudan akışkan olarak kullanılmaya başlanmıştır [8,9]. Bu sayede daha yüksek sıcaklıklarda ısı depolamak mümkün hale gelmiştir [9]. Her ikisi de ergime sıcaklığının üzerinde olan iki tanktan birisi sıcak akışkanın depolanmasında, diğeri ise soğuk akışkanın depolanmasında kullanılmaktadır [9-11]. Bazı uygulamalarda ise sıcak ve soğuk akışkanın aynı tank içerisinde depolandığı görülmekte olup, bunlar termoklin sistemler olarak adlandırılmaktadır [9,11,12]. Öte yandan, erimiş tuzların kullanılmasının bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Örneğin sıcaklık ergime sıcaklığının altına düştüğünde tuz katı faza geçerek sistemde sorunlara yol açmaktadır. Sıcaklığın fazla yükselmesi ise tuzun kimyasal yapısında bozulmalara

neden olmaktadır [13,14]. Bu sınırlamaların önüne geçmek için farklı depolama sistemleri dünya genelinde bir araştırma konusu olmuştur. Depolama malzemesi olarak yüksek sıcaklığa dayanıklı katı fazdaki bir malzeme ile akışkan olarak su ya da havanın kullanıldığı sistemler umut vadeden sistemler olarak öne çıkmaktadır [15-17]. Çakıl taşları, kayalar, tuğla, yüksek dayanımlı beton ve seramikler malzemeler, ısı depolama sistemleri için en yaygın kullanılan malzemeler arasındadır [18-23].



## 2. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Enerji depolama sistemlerinin gelişimi son yıllarda hız kazanmış olup, modern teknoloji üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle herhangi bir kesintili enerji kaynağının kullanılması durumunda enerji talebini karşılamada kritik önem taşımaktadırlar.

Enerji depolama sistemlerinin başlıca faydaları [24];

- enerji tüketiminin azaltılması,
- enerji giderlerinin azaltılması,
- iç hava kalitesinin artırılması,
- operasyon esnekliğinin artırılması,
- ilk yatırım ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi şeklinde sıralanabilir.

Enerji depolama sistemleri enerji dönüşüm ekipmanlarının etkinliğinin artırılmasında önemli bir potansiyele sahiptir [25]. Ancak enerji depolama sistemleri, enerji arzı ve son kullanıcının gereksinimlerini irdelemeden uygun bir biçimde değerlendirilemez. Genel olarak, enerji depolamanın maksimum fayda potansiyelinden yararlanabilmek için enerji sistemlerinin bütün sektörlerinde koordine bir eylem gereklidir [24].

Enerji talebi ticari, sınai, kamu, konutlarda ve yardımcı sektörlerde günlük, haftalık, sezonluk olarak değişim gösterir. Tercih edilen durum, enerji talebi ile çeşitli enerji dönüşüm sistemlerinin birlikte sağladığı enerji arzının eşleşmesidir [26]. Ancak enerji tüketimi belirli saatlerde çok fazladır ve bu saatlerde talebi karşılamak güçleşir. Bozulan arz talep dengesi, pik yük saatlerinde enerji fiyatlarının artmasına da neden olmaktadır [27,28]. Günümüzde pik yük talebi gaz türbinleri ya da dizel jeneratörler ile karşılanmaktadır [28]. Enerji depolama yöntemleri pik yükteki talebi karşılamak için güneş, rüzgâr, nehir tipi hidrolik santraller veya kojenerasyon sistemleri gibi alternatifler sunmaktadır [28-30].

Birçok enerji teknolojileri için enerji depolama önemli bir husustur. Yakıtlar, içlerinde gömülü halde enerji depolanan sistemler olarak ele alınırsa, petrol de enerjinin depolandığı güzel bir örnek olacaktır. Dünya çapında depo edilen petrol;

benzinin, fuel oilin ya da petrokimyasalların güvenilir ve ekonomik olarak temin edilebilmesi için gereklidir [24].

Günden güne gelişmekte ve çeşitlenmekte olan enerji depolama yöntemleri Şekil 2.1'de görüldüğü gibi mekanik, termal, kimyasal, biyolojik ve manyetik olarak sınıflandırılabilir [24,25,31-33]. Bu sınıflandırmada enerji depolama yöntemleri, depolanan enerjinin formuna göre gruplandırılmıştır.

<b>Enerji Depolama Yöntemleri</b>		
<b>Mekanik Enerji Depolama</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Pompaj Depolamalı</li><li>• Sıkıştırılmış Hava Depolama</li><li>• Volanlar</li></ul>	<b>Kimyasal Enerji Depolama</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Elektrokimyasal piller</li><li>• Organik Moleküler Depolama</li></ul>	<b>Termal Enerji Depolama</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Duyulur Isı Depolama</li><li>• Gizli Isı Depolama</li><li>• Termokimyasal Depolama</li></ul>

**Şekil 2.1:** Enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması [24].

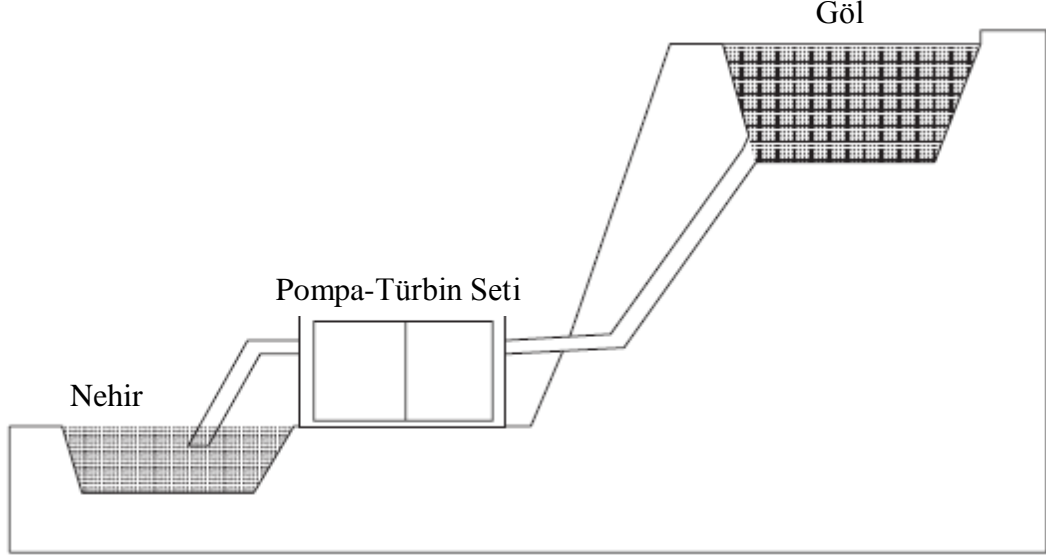
## **2.1 Mekanik Enerji Depolama**

Mekanik enerji, doğrusal ya da dönel hareketin kinetik enerjisi, yüksek bir cismin potansiyel enerjisi, elastik bir cismin sıkıştırma ya da gerdirme enerjisi ya da sıkıştırılmış gazlarda enerji olarak depolanabilir [24,32]. Mekanik enerji depolama sistemleri pompaj depolamalı sistemler, sıkıştırılmış hava ile enerji depolama sistemleri ve volanlar olarak üç temel başlıkta ele alınabilir [33].

### **2.1.1 Pompaj depolamalı sistemler**

Pompaj depolamalı sistemler, oldukça basit bir enerji depolama sistemleridir. Geceleri enerji talebinin düşük olduğu saatlerde suyun pompa vasıtasıyla nehirden yüksek bir yere doğru pompalanmasıyla sağlanır. Su bir boru yardımıyla bir hazneye pompalanır. Gündüz enerji talebinin arttığı saatlerde, depolanan su bu defa nehre boşaltılır. Su, yüksekteki depodan nehre doğru giderken türbini döndürür, böyle elektrik üretimi gerçekleştirilir [24,25,34]. Şekil 2.2 pompaj depolamalı sistemlerin yöntemini göstermektedir.





**Şekil 2.2:** Pompaj depolamalı sistem [25].

Bu depolama yöntemi güneş enerjisi için de uygulanabilir durumdadır. Gündüz güneşin varlığında su, yüksekteki kuyuya pompalanarak güneşin olmadığı gece saatlerinde türbine gönderilebilir. Bu tip bir depolama sisteminin verimi yaklaşık olarak %50'dir [24].

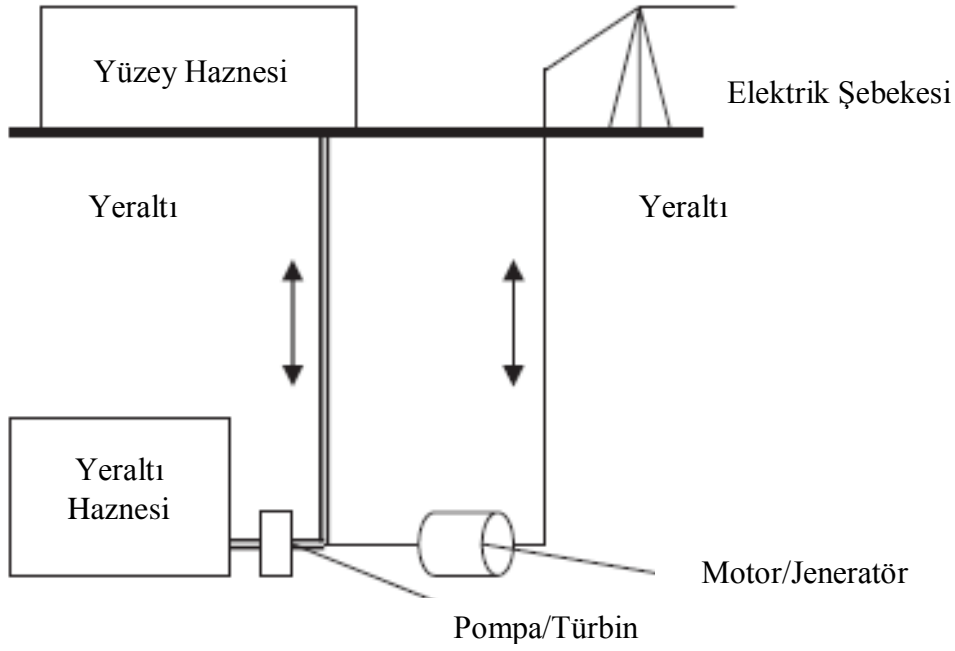
Bu sistem, yer altı depolama sistemi şeklinde de dizayn edilebilir [24,34]. Şekil 2.3'de gösterildiği gibi biri yer altında diğeri yer üstünde olan iki depo arasında suyun yer değiştirmesi ile sistemdeki enerji giriş-çıkışı mümkün olmaktadır.

Bu yöntemdeki en önemli kriter, alt haznenin bulunduğu yerdeki jeolojik koşullardır. Yeraltındaki yapı sağlam kayalar şeklinde olmalıdır. Pompaj depolamalı sisteme uygun olmayan yeraltı yapıları [24];

- gevşek tortul yapının ağırlıkta olduğu kayalar,
- volkanik kayalar;
- çok kısa mesafelerde farklılık gösteren karışık jeolojik yapı,
- sismik hareketlerin yüksek olduğu bölgelerdir.

### 2.1.2 Sıkıştırılmış hava depolama

Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama sistemleri, enerji tüketiminin az olduğu saatlerde havanın kompresör ile sıkıştırılması ve enerji ihtiyacı olduğunda sıkıştırılmış havanın gaz türbinine gönderilmesi vasıtasıyla elektrik üretilmesi esasına dayanır [24,32,33].



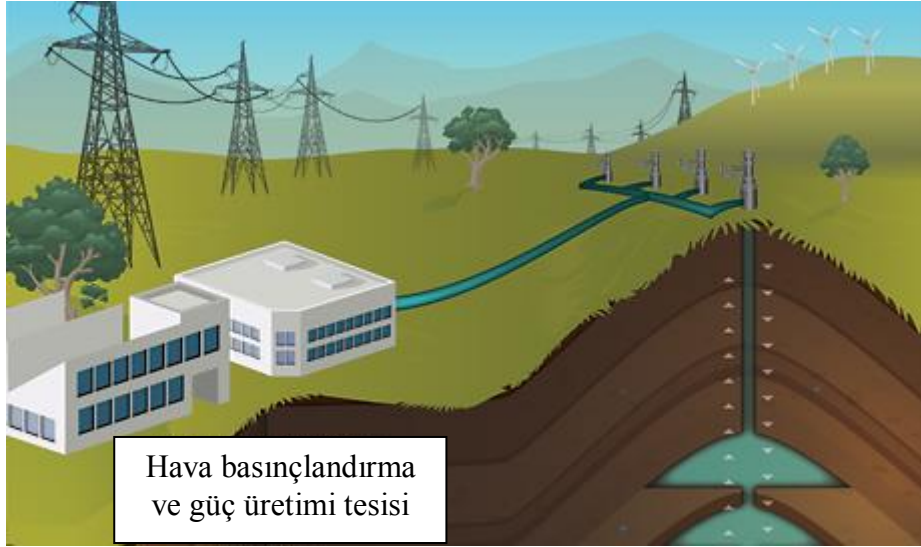
**Şekil 2.3:** Yer altı pompaj depolamalı sistemi [24].

Elektrik tüketiminin düşük olduğu saatlerde hava kompresör ile sıkıştırılarak doğal mağaralarda, eski petrol ve gaz kuyularında ya da gözenekli kayalarda depo edilir [32]. Sıkıştırılmış hava depolama sistemleri ile su pompaj depolamalı sistemleri birbirlerine benzemektedir, ancak sıkıştırılmış hava tekrar kullanılmadan önce ısıtılarak sistem veriminin artırılması yönü ile daha avantajlı durumdadır [24]. Şekil 2.4 örnek bir sıkıştırılmış hava depolama sistemini göstermektedir.

Dünyanın ilk sıkıştırılmış hava ile enerji depolama sistemi 1978 yılında Huntorf (Hamburg)'da faaliyete geçmiştir [35]. Tesis yerel elektrik şebekesine bağlıdır. Tüketimin düşük olduğu saatlerde hava yaklaşık olarak 47780 Pa basınca sıkıştırılarak tuz kuyusundaki iki oyukta depolanmıştır. Toplam depolama kapasitesi  $283179\text{m}^3$ 'tür. Pık yük saatlerinde hava serbest bırakılıp, doğal gaz ile ısıtılarak yüksek basınç ve alçak basınç türbinlerine gönderilmektedir. Sistem 2 saate kadar 290MW güç üretebilmektedir. Her 1kWh güç çıkışı için gerekli olan hava 0,8kWh'lik elektrik enerjisi ile sıkıştırılmakta, 5600kJ lük doğal gaz ile ısıtılmaktadır. Sıkıştırılmış havadan da ısı geri kazanılmakta, bu şekilde %25 doğalgaz tasarruf edilmektedir [24].

### 2.1.3 Volanlar

Volan, dönel bir hareketteki kinetik enerjiyi depolamak için kullanılan, nispeten büyük kütleli tekerlek şeklindeki enerji depolama ünitesidir [36]. Volanda enerji depolamak için volanı döndüren elektrik motoru, volandan enerji çekimi sırasında jeneratör olarak kullanılabilir [24]. Şekil 2.5’de yüksek kapasiteli bir volanın kesiti görülmektedir.



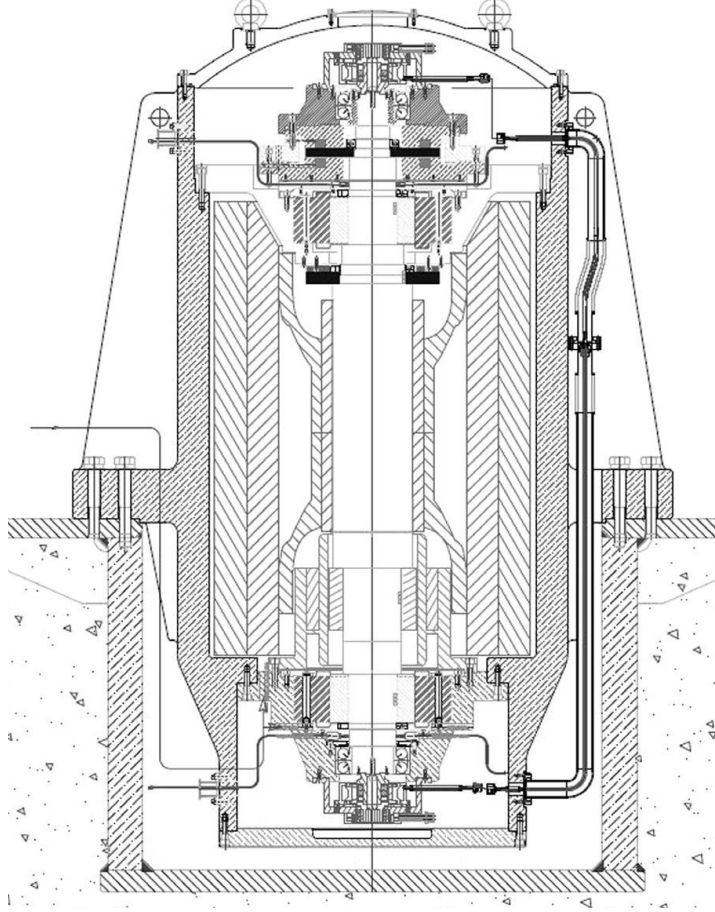
**Şekil 2.4:** Sıkıştırılmış hava depolama sistemi [37].

Volanlar taşınabilir enerji depolama sistemleri olarak kullanılabilirler. Ayrıca günümüz araçlarında şehir içindeki sık duruş kalkışlarda enerji geri kazanım sistemi olarak avantaj sağlayabilmektedirler [38]. Adalar gibi enterkonnekte hattan bağımsız yerdeki yerleşimlerde, gün içinde sıklıkla değişen elektrik talebini dengelemeyi sağlarlar. Kullanıcı sayısının az olduğu bu yerleşimlerde, gün içerisindeki talep büyük oranlarda değişmekte ve güç santrallerinin bu değişime ayak uydurması zor olmaktadır [39]. Bu nedenle şebekeye bağlı olarak kullanılan volanlar, enerji talebinin azaldığı durumlarda enerjiyi depolamakta, pik yük zamanlarında da şebekeye geri vermektedir [24,32].

## 2.2 Kimyasal Enerji Depolama

Bir veya daha fazla kimyasal bileşikten oluşan, bir formdan diğerine geçerken enerjiyi depolayan ya da yayan sistemlerdir. En çok bilinen kimyasal sistemler pillerdir. Piller enerjiyi elektrokimyasal enerji olarak depolarlar ve gerektiğinde kullanıma sunarlar [24].

Hidrojen de bir kimyasal enerji depolama aracıdır. Suyun elektrolizi ile hidrojen elde edilir, böylece enerji depolanmış olunur. Gerektiğinde yakıt pilleri ya da termal sistemlerde kullanılan hidrojenden, depolanan enerji geri alınmış olunur [31].



Şekil 2.5: 35kWh'lik enerji depolama kapasitesine sahip bir volanın kesiti [40].

### 2.3 Termal Enerji Depolama

Termal enerji depolama, cismin sıcaklığının yükseltilmesi ya da faz değiştirmesi ile enerji depolanması yöntemidir [32]. Dünyada en yaygın olarak kullanılan termal enerji depolama sistemleri, evlerde bulunan sıcak su boylarleridir [31]. 10 kg suyun sıcaklığı 86°C artırıldığında ya da 1 ton suyun sıcaklığı 0,86°C artırıldığında 1kWh'lik enerji depo edilmiş olunur. Mekanik enerji depolama yöntemi ile kıyaslamak gerekirse, aynı miktarda enerji depolamak için 1 ton su 314 m yükseğe taşınmalıdır [24].

Bazı kimyasal sistemler enerjiyi termal enerji olarak da depolayabilmektedir. Bu tipteki sistemler termal enerji depolama uygulamalarında kullanılabilen olup, hala gelişim aşamasındadır [41].

Günlük hayatta birçok termal enerji depolama yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemler bir sonraki bölümde kapsamlı olarak ele alınacaktır.



### 3. TERMAL ENERJİ DEPOLAMA

Termal enerji depolama, sıcak ya da soğğun daha sonra kullanmak üzere depo edilmesidir [42]. Enerji üretimi ile tüketimi arasında uyumsuzluk olduğu durumlarda termal enerji depolama sistemlerinin kullanılması, enerjinin verimli kullanımına yardımcı olmaktadır [24].

Termal enerji depolama yöntemi, enerji depolamanın düşük maliyetli ve yüksek verimli bir yöntemidir [43]. Solar termal güç santralleri, termal enerji depolama sistemleri ile birlikte kullanılabilirdi için diğer yenilenebilir enerji santrallerine göre avantajlı durumdadır. Örneğin rüzgâr santralleri ya da fotovoltaik güç santrallerinde enerji, elektrik enerjisi olarak depolanabilirken, solar termal güç santrallerinde doğrudan ısı olarak depolanabilir. Böylece, gün içerisindeki değişken ışınımına rağmen daha sabit bir güç çıkışı elde edilmiş olur [24].

Termal enerji depolama sistemleri, günümüzde pratik ve ekonomik olarak uygulanabilmektedir. Solar termal güç santralleri termal enerji depolama sistemleri ile donatıldıklarında, gün batımından sonra da birkaç saat süreyle tam yükte çalışabilmektedirler [44]. Genel uygulama, depolama sisteminin gün içerisinde doldurulması ve güneş batımından sonra tekrar boşaltılması şeklinde olup, bu sayede şebekenin talebine göre santralin işletilmesi sağlanmış olur [24,44].

Termal enerji depolama sistemleri; ısı geçişi mekanizması, depolama ortamı ve bunları çevreleyen bir depo olmak üzere 3 temel parçadan meydana gelir [24].

Termal enerji depolama sistemleri, mekanik ya da kimyasal depolama teknolojileri ile kıyaslandığında, daha düşük ilk yatırım maliyeti ve yüksek verimlilik gibi çeşitli üstünlüklere sahiptir [43]. Seçilen depolama şekline bağlı olarak, optimum depolama özelliklerini ve sistemin uzun ömürlü olmasını sağlamak için birtakım gereksinimlere ihtiyaç duyulur. Bunlar;

1. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip depolama malzemesi,
2. Yaygın bulunabilmesi
3. Isı taşıyıcı akışkan ile depolama ortamı arasında yüksek ısı geçişi,

4. Depolama ortamının mekanik ve kimyasal kararlılığı,
5. Alevlenebilir ya da patlayıcı olmaması,
6. Isı taşıyıcı akışkan, ısı değiştirici ve depolama ortamı arasında kimyasal uyumluluk,
7. Taşınabilirlik,
8. İklimlendirme sistemleri ile uyumlu olması,
9. Yüksek sayıda şarj/deşarj dōngüsü,
10. Düşük termal kayıplar,
11. Düşük maliyet,
12. Düşük çevresel etki.

Termal enerji depolama sistemleri, güneşten sağlanan enerji ile enerji talebi arasındaki uyumsuzluğu gidermek için kullanılır [44,45]. Gün içindeki ya da yıl boyunca meydana gelen güneşlenmeye ve değişen elektrik talebine bağlı olarak termal enerji depolama sistemleri şu fonksiyonlardan birini ya da birkaçını üstlenebilir [24,34,41,43,44]:

1. Tampon depolama: Bulutlu ya da kötü hava şartlarında türbini besleyerek santrali geçiş modunda çalıştırıp, türbinin ilk çalıştırmadaki verim düşüşünün önüne geçmek. Normalde ısı taşıyıcı akışkanın kendi ısıl ataletinin olması ve santrali kısa süreli bulutlanmalarda besleyebilmesine rağmen, büyük ölçekli tesislerde bunun türbinin durmasını engellemek için yeterli olmadığı yapılan araştırmalar neticesinde ortaya çıkmıştır. İlave edilen küçük bir termal depolama sistemi güneş ışığındaki dalgalanmalar sebebiyle oluşan süreksizliğin önüne geçmeye yardımcı olabilmektedir.

2. Çıkış süresinin kaydırılması ya da uzatılması: Pik güç talebi ile pik güneş ışınımı her zaman örtüşmeyebilir. Termal enerji depolama sistemleri sayesinde, örneğin sabah saatlerinde olduğu gibi güç talebinin düşük olduğu saatlerde enerji depolanarak, tüketimin arttığı ve elektriğin daha pahalı olduğu saatlerde daha fazla elektrik üretilmesi sağlanabilir.

3. Yıllık kapasite faktörünün iyileştirilmesi: Kapasite faktörü, güç santralleri için bir performans parametresidir. Güneş enerjisinin, günün sadece belirli periyodunda



erişilebilir olması nedeniyle termal enerji depolama sistemleri ile donatılmayan güneş santrallerinin kapasite faktörü oldukça düşük olmaktadır. Termal enerji depolama sayesinde güneş santrallerinin çalışma sürelerini günlük 24 saate kadar yükseltmek mümkün hale gelmektedir.

### **3.1 Termal Enerji Depolama Yöntemleri**

Termal enerji depolama sistemlerinde üç yöntem kullanılmaktadır [24,32,34,41]. Bunlar;

- duyulur ısı depolama,
- gizli ısı depolama,
- termokimyasal enerji depolama yöntemleridir.

Bu üç yöntemden ilk ikisi, mevcut sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [46].

#### **3.1.1 Duyulur ısı depolama**

Duyulur ısı depolama, ısının iç enerji olarak depolanması esasına dayanmaktadır. Depolanan ısı, genellikle katı ya da sıvı haldeki ortamda sıcaklık artışına sebep olur [41]. Bu yöntem genellikle diğer alternatiflerden basit ve daha ucuzdur. Evlerde sıklıkla kullanılan sıcak su boylerleri, bu yöntemin en temel ve en yaygın uygulamasıdır.

İyi bir depolama ortamı yüksek ısıl kapasiteye sahip malzemedan oluşturulur. Evsel uygulamalar gibi kısıtlı alana sahip uygulamaları için, depolama sisteminin kapladığı alan da önemli bir etmendir. Kullanılabilir alanın kısıtlı olması, depo malzemesi olarak kullanılacak olan katı veya sıvı malzemenin miktarını sınırlar. Bir diğer önemli özellik ise, gerekli uygulama için yeterli oranda ısının etkin bir şekilde emilimi ve serbest bırakılmasıdır. Bu oran, katılarda termal difüzyona, sıvılarda ise malzemenin ısı taşınım katsayısına bağlıdır [24].

Duyulur termal enerji depolama sistemleri için depo ile çevresi arasındaki nispeten yüksek ısı değişim alanı ve sıcaklık farkı, özellikle uzun süreli depolama halinde ısı kayıplarını artırmakta ve sistemin kendi kendine boşalmasını hızlandırmaktadır [47].

Depolama malzemesinin seçimindeki en önemli kıstaslardan birisi de hiç şüphesiz malzemenin fiyatıdır. Depolama süresinin artması ile maliyet önemli miktarlarda

artmaktadır. Bu nedenle büyük ölçekli uygulamalarda su, toprak ya da kaya parçacıklarının kullanılması maliyeti ciddi oranda azaltacaktır [47].

Duyulur ısı depolamada sıklıkla kullanılan malzemeler su, hava, yağ, kayaç, tuğla, beton ve kumdur [24]. Depolama sisteminde sunulan enerji miktarı sıcaklıkla, ortamın kütlesiyle ve ortamın ısı kapasitesiyle orantılıdır. Her ortamın kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır, fakat seçim yaparken genellikle ısı kapasitesi ve depolamada kullanılabilir alan temel kriter olarak ele alınmaktadır [41].

Duyulur enerji depolama sırasında kütle, özgül ısı ve sıcaklığa bağlı olarak malzemedeki iç enerji değişimi denklem 3.1'de gösterilmiştir [34]:

$$\Delta U = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.1)$$

Bu denklemde  $\Delta U$  malzemenin iç enerjisindeki değişimini [kJ],  $c_p$  malzemenin özgül ısısını [kJ/kg·K];  $T_1$  ve  $T_2$  başlıktaki ve son durumdaki malzeme sıcaklığını [ $^{\circ}\text{C}$  ya da K] ve  $m$  depolama malzemesinin kütlesini [kg] ifade etmektedir.

Duyulur ısı depolama, sıcak ya da soğuk depolama sistemleri için en çok kullanılan yöntemdir [24]. Yaygın olarak kullanılan malzemelerden bazıları Çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Depolama uygulamalarında kullanılan malzemenin ucuz olması, iyi bir ısı kapasiteye ( $m \times c_p$ ) sahip olması gereklidir.

Duyulur ısı depolamada yoğunluk ve ısı kapasitenin yanı sıra malzemenin diğer özellikleri de önemlidir. Bu özellikler işletme sıcaklığı, ısı iletkenlik, ısı yayılım, buhar basıncı, malzemeler arasındaki uyum, kararlılık, yüzey alanının hacme oranına bağlı olarak ısı kaybı katsayısı ve maliyettir [41]. Çizelge 3.2'da duyulur ısı depolamada kullanılabilecek bazı malzemeler için bu özellikler verilmiştir.

Duyulur ısı depolamada kullanılan ortamların başında hiç şüphesiz su gelmektedir; kaya parçaları, çakıllar, toprak ve yağlar, tuzlar, seramikler gibi diğer bazı malzemeler de günümüzde yaygın olarak kullanılan duyulur ısı depolama ortamlarıdır [47].

**Çizelge 3.1:** Duyulur ısı depolamada kullanılan bazı malzemelerin 20°C'deki ısı kapasiteleri [41].

Malzeme	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Özgül ısı (J/kg·K)	Volümetrik ısı kapasite (×10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup> ·K)
Kil	1456	879	1,28
Tuğla	1800	837	1,51
Kumtaşı	2200	712	1,57
Odun	700	2390	1,67
Beton	2000	880	1,76
Cam	2710	837	2,27
Alüminyum	2710	896	2,43
Demir	7900	452	3,57
Çelik	7840	896	2,43
Çakıllı toprak	2050	1840	3,77
Manyetit	5177	752	3,89
Su	988	4182	4,10

### 3.1.1.1 Su

Çalışma sıcaklığı 20-80°C arasında olan sistemlerde, yüksek ısı kapasitesi (~4.2 kJ/kg·K) ve düşük maliyetinden dolayı depolama ortamı olarak su tercih edilmektedir [48]. Suyun kullanılmasındaki en büyük engel, çalışma aralığının düşük olması olsa da, evsel uygulamalardaki kullanım suyu ve mahal ısıtmasında kullanılmak için yeterli sıcaklık aralığını sağlayabilmektedir. Ayrıca su, evsel uygulamalar için kullanılan solar kollektörlerin üst limitlerinde çalışabilmektedir [41]. Buna rağmen, termal güneş santrallerindeki üst sıcaklık değeri yüksek olduğu için bu tip uygulamalarda su kullanımı mümkün olmamaktadır [43]. Bu tip santraller için gerekli olan sıcaklıklarda suyun sahip olduğu yüksek buhar basıncı, malzeme dayanımı açısından sorun teşkil etmektedir.

### 3.1.1.2 Çakıl taşları

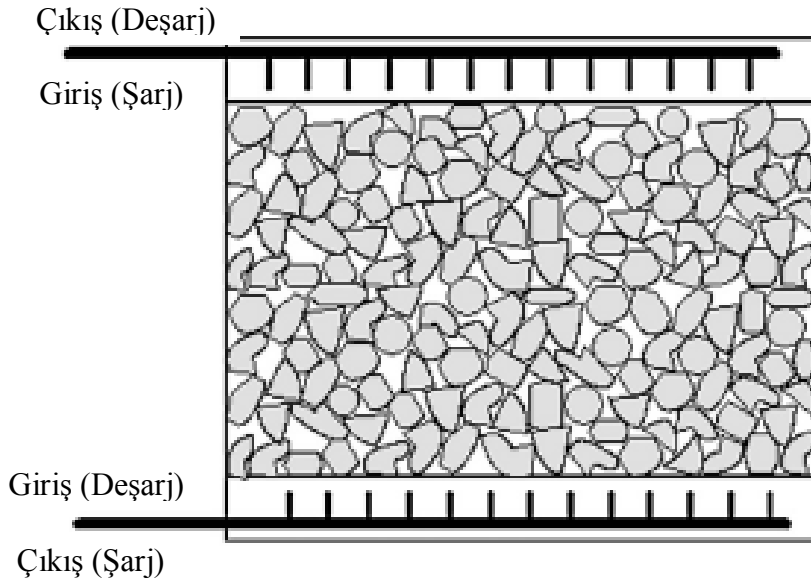
Çakıl taşlarının ısı depolama malzemesi olarak kullanılması, hava ya da su gibi bir akışkanın ısı taşıyıcı ortam olarak kullanılması ile mümkün olabilmektedir. Kullanılan akışkan sayesinde, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi sisteme ısı girişi ya da sistemden ısı çıkışı sağlanmaktadır [47].

Çakıl taşları suya göre daha düşük ısı kapasiteye sahip olsalar da, daha yüksek sıcaklıklara çıkabilmeleri ve bu sıcaklıklarda daha kolay muhafaza edilebilmeleri nedeniyle avantajlı durumdadırlar [48]. Yine de, ısı taşıyıcı olarak kullanılan ortamın ısı depolamaya da yardımcı olmaması durumunda, çakıl taşlarının enerji yoğunluğu düşük değerlerde kalmaktadır.

**Çizelge 3.2:** Duyulur ısı depolama sistemlerinde kullanılabilen bazı malzemelere ait termal özellikler [43].

$T_{\text{soğuk}}$ (°C)	$T_{\text{sıcak}}$ (°C)	Malzeme	Isıl iletkenlik (W/m·k)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Ortalama özgül ısı kapasitesi (kJ/kg·K)	Hacimsel özgül ısı kapasitesi (kWh <sub>th</sub> /m <sup>3</sup> )	Ortam türü
200	300	Kum-kayaç-yağ	1	1700	1,3	60	Katı
200	400	Takviyeli beton	1,5	2200	0,85	100	Katı
200	400	Dökme demir	37	7200	0,56	160	Katı
200	500	NaCl	7	2160	0,85	150	Katı
200	700	Dökme çelik	40	7800	0,6	450	Katı
200	700	Silika ateş tuğlası	1,5	1820	1	150	Katı
200	1200	Magnezyumoksit ateş tuğlası	5	3000	1,15	600	Katı
250	350	Sentetik yağ	0,11	900	2,3	57	Sıvı
250	450	Nitrit tuzları	0,57	1825	1,5	152	Sıvı
270	530	Sıvı sodyum	71	853	1,3	80	Sıvı
300	400	Silikon yağı	0,1	900	2,1	52	Sıvı
180	1300	Sıvı lityum tuzu	38,1	510	4,19		Sıvı
15	400	Dowtherm A (155°C'de)	0,1177	867	2,2		Sıvı
0	345	Therminol 66		750	2,1		Sıvı

Yapılan çalışmalar, çakıl taşlarının ( $c_{p,\text{çakıl}} = 1,84$  kJ/kg·K) suya ( $c_{p,\text{su}} = 4,182$  kJ/kg·K ) oranla yaklaşık üç kat daha düşük ısı kapasiteye sahip olduğunu göstermektedir [41].



**Şekil 3.1:** Takıl taşları ile ısı depolama sistemi [24].

Bu nedenle çakıl taşı kullanılması durumunda, aynı enerjiyi depo etmek için üç kaç daha fazla alana ihtiyaç duyulmaktadır. Yine de çakıl taşları, hava kolektörleri ile

birlikte kullanılmaları durumunda ekonomik olarak tercih edilebilir durumdadır [49]. İhtiyaç duyduğu fazla alan nedeniyle ısı kayıplarının fazla olması, bu tarz depolama sistemlerinin uzun dönem ısı depolama sistemlerinde kullanılmasının önünde engel teşkil etmektedir [47].

### 3.1.1.3 Toprak

Toprağın ısı depolama ortamı olarak kullanılması yöntemi, düşük maliyetli sistemler olarak ortaya çıkmaktadır [48]. Bu yöntemde toprak kazılarak ya da delinerek içine borular yerleştirilir ve bu boruların içinden ısı taşıyıcı akışkan dolaştırılır, bu sayede toprağa ısı girişi ya da topraktan ısı çıkışı mümkün kılınır [41,47,50].

### 3.1.1.4 Diğer ortamlar

Yağlar ya da tuzların sıvı halde ısı depolama ortamı olarak kullanılmaları mümkündür [24,34]. Yüksek depolama sıcaklıklarına (yaklaşık 400°C) ulaşabilmesi nedeniyle bu malzemelerin kullanılması güç santralleri için uygun bir depolama yöntemidir [43].

Katı haldeki metallere elde edilen blokların ya da levhaların da duyulur ısı depolamada kullanılması mümkündür. Demirden yapılmış toprakların ya da yüksek sıcaklığa dayanıklı beton, seramik gibi malzemelerin duyulur ısı depolamada kullanıldığı uygulamalar mevcuttur [47]. Kullanılan depolama ortamlarına ait özellikler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

### 3.1.2 Gizli ısı depolama

Gizli ısı depolama, bir materyali faz değişimi gerçekleşene kadar ısıtma yöntemi ile sağlanmaktadır. Katı halden sıvı hale ya da sıvı halden gaz haline geçen materyal, bu sayede ısıyı depolamış olur [42]. Faz değişim sıcaklığına ulaşan malzeme, faz değişimini gerçekleştirmek için büyük miktarda ısıya ihtiyaç duyar. Bu ısı, faz değişim ısısı olarak tanımlanır, malzemenin bu davranışı da ısının depolanmasını sağlamış olur [46].

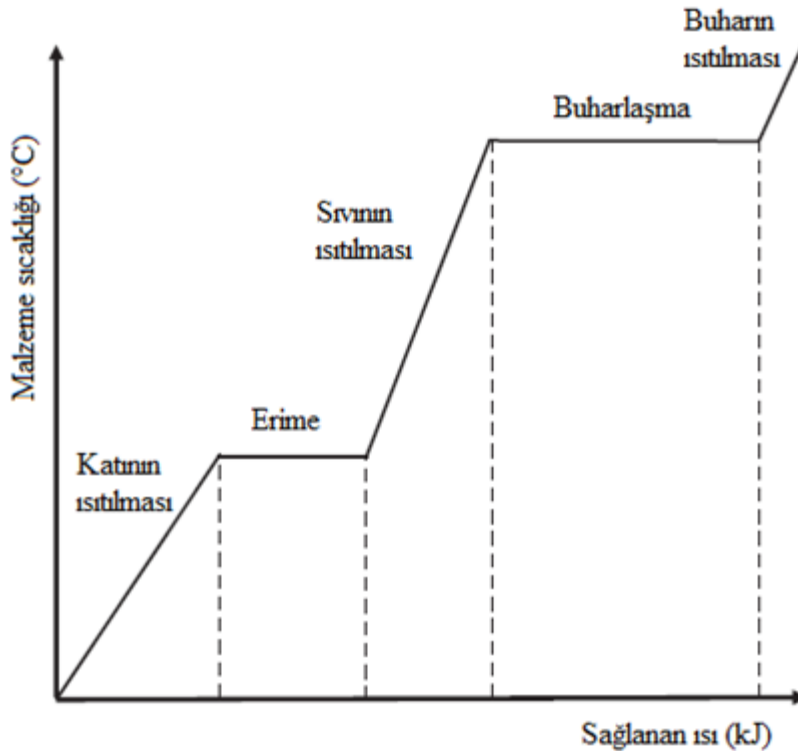
Gizli ısı depolama yöntemi için, depolanan ısı miktarı Denklem 3.2’de verildiği gibi hesaplanır [43];

$$Q = m [c_{ps} (T_m - T_s) + h + c_{pl} (T_l - T_m)] \quad (3.2)$$

Bu denklemde katı ve sıvı fazdaki özgül ısılar  $c_{p_s}$  ve  $c_{p_l}$ , faz değişim entalpisi  $h$ , ergime sıcaklığı  $T_m$ , katı fazdaki sıcaklık  $T_s$  ve sıvı fazdaki sıcaklık  $T_l$  ile ifade edilmiştir. Şekil 3.2’de saf maddelerin ısıtılması süresince sıcaklığının değişimi gösterilmektedir.

En iyi bilinen ve sıklıkla kullanılan faz değişim malzemesi sudur. Su, soğuk depolama sistemlerinde de tercih edilen bir malzemedir.  $0^{\circ}\text{C}$ ’nin altındaki sıcaklıklarda tuzlu su sıklıkla kullanılır [41].  $0-130^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkları arasında parafinler, tuz hidratları, yağ asitleri ve alkoller kullanılmaktadır.  $150^{\circ}\text{C}$ ’nin üzerindeki sıcaklıklarda ise tuzlar ve organik malzemeler kullanılır [51].

Gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılmak üzere birçok faz değişim malzemesi üzerinde çalışmalar yapılmış olup, bunlardan çok azı ticarileşmiştir. Genellikle erişilebilirlik ve fiyat, birçok faz değişim malzemesinin önündeki en büyük engel olmuştur. Bunlar dışında günümüzde bazı malzemeler için faz ayrışması, aşırı soğuma, korozyon, kararsızlık ve düşük ısıl iletkenlik gibi sorunlar hala çözülememiştir, bu alanlarda çalışmalar devam etmektedir [52].



**Şekil 3.2:** Saf malzemelerin ısıtılması süresince gerçekleşen sıcaklık değişimi [47].

Gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılmak üzere birçok faz değişim malzemesi üzerinde çalışmalar yapılmış olup, bunlardan çok azı ticarileşmiştir. Genellikle

erişilebilirlik ve fiyat, birçok faz değişim malzemesinin önündeki en büyük engel olmuştur. Bunlar dışında günümüzde bazı malzemeler için faz ayrışması, aşırı soğuma, korozyon, kararsızlık ve düşük ısıl iletkenlik gibi sorunlar hala çözülememiştir, bu alanlarda çalışmalar devam etmektedir [52].

### 3.1.3 Termokimyasal ısı depolama

Bu yöntem, tersinir endotermik kimyasal reaksiyonlardan termal enerji depolamak için yararlanılması esasına dayanır. Kimyasal ısı, kimyasal bir bileşikteki bağları koparmak için gerekli olan ısı olup, bu enerjinin neredeyse tamamı sentez reaksiyonu gerçekleştiğinde geri alınabilmektedir [53]. Kimyasal enerji depolamak birçok avantaj sunmasına rağmen, tersinir termokimyasal reaksiyonun çok erken evrelerde gerçekleşmesi sorun teşkil etmektedir [54].

Termokimyasal enerji depolamada aktif materyalin; enerji depolama yoğunluğu, sıcaklık aralığı, geri kazanılabilirlik ve reaksiyon kinetiği gibi birçok özelliği önemlidir.

Yapılan bir literatür çalışmasına göre [55] termokimyasal enerji depolama malzemelerinin en önemli özellikleri, enerji depolama yoğunluğu ve çalışma aralığıdır. Evsel uygulamalar için bu sıcaklık aralığı 50-150°C olarak ele alınırsa, düşük maliyet, yüksek enerji yoğunluğu ve güvenlik avantajı ile kullanım potansiyeli yüksek bir malzeme olarak tuz hidratları karşımıza çıkmaktadır.

Literatür çalışmalarında sıklıkla ele alınan  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ,  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ,  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  ve  $CaCl_2 \cdot 6H_2O$  tuz hidratlarının bu konuda umut verici olduğu ortaya çıkmıştır [56].

Bu hidratlardan özellikle  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ , yüksek sıcaklık seviyesinde ısı sunma yeteneğine sahip olması nedeniyle hem su hem de ortam ısıtma uygulamalarında termokimyasal enerji depolama için ilgi çekici özelliklere sahiptir. Sunduğu  $1Gj/m^3$ 'lük ısıl yoğunluğa ilave olarak, ucuz olması ve toksik özellik barındırmaması nedeniyle mevsimlik ısı depolama uygulamaları için oldukça uygun bir malzemedir [55].

### 3.2 Termal Enerji Depolama Sisteminin Uygulamaları

Termal enerji depolama sistemlerinin pratikteki başlıca uygulamaları şunlardır [34]:

- Ortam ısıtma ve soğutma,
- Kullanım suyu ısıtma,
- Endüstriyel ve zirai proses ısıtma,
- Güneş enerjisiyle pişirme,
- Küçük güç santralleri ve su pompaları,
- Çanak tipi kollektörlerde kısa süreli depolama,
- Büyük ölçekli yoğunlaştırılmış güneş enerji santrallerinde uzun süreli depolama (genel olarak 3-12 saatlik depolama).

Termal enerji depolama yöntemleri ile ilgili örnek veriler Çizelge 3.3’de verilmiştir.

#### 3.2.1 Mevcut güneş enerji santralleri ve örnek termal enerji depolama sistemleri

Solar One and Solar Two Mojave Çölü, Kaliforniya — Pilot uygulama olarak yapılan 10MW gücünde, Solar One isimindeki ilk ticari yoğunlaştırılmış güneş enerji santraline entegre olarak yağ, kayaç ve kum içeren bir termal enerji depolama sistemi yapılmıştır. 1992 yılında mevcut sisteme ilave edilen aynalar ile santral Solar Two adını almıştır. İlave edilen aynalar santrale 10MW daha güç kazandırmıştır. Solar Two santralinde kullanılan enerji depolama sistemi, %60 sodyum nitrat ve %40 potasyum nitrat içeren erimiş tuzlu depolama sistemidir.

Solar Energy Generating Systems (SEGS), Mojave Çölü, Kaliforniya — 13,4MW gücündeki bu santralin sahip olduğu, mineral tuzların kullanıldığı termal enerji depolama sistemi santrali 3 saat çalıştırabilmektedir [34].

Holaniku at Keahole Point, Keahole Point, Havai — 2 MW kapasiteye sahip, 3 akrelik araziye kurulu olan bu termal güneş santrali, parabolik oluklu tip güneş kollektörlerine sahiptir. Tesis, 2 saat süreyle santrali çalıştırabilecek termal enerji depolama sistemi ile donatılmıştır [57-59].

Solana Generating Station; Phoenix, Arizona — Parabolik oluklu tip güneş kollektörleri ile donatılan santralin kapasitesi 250 MW’dır. Tesis, sahip olduğu 2 tanklı indirekt tip ergimiş tuzlu depolama sistemi sayesinde güneşin olmadığı saatlerde 6 saat süre ile çalışabilmektedir [60].



**Çizelge 3.3:** Termal enerji depolama teknolojileri ile ilgili örnek veriler [57].

Teknik performans	Tipik uluslararası güncel değerler ve aralıklar		
Enerji giriş/çıkışı	Güneş ısı, atık ısı, değişken yenilenebilir enerji kaynakları (PV, rüzgâr), elektrik/ısı		
Teknoloji	Duyulur ısı depolama	Faz değişim malzemeleri	Termokimyasal enerjide depolama
Depolama kapasitesi (kWh/t)	10 - 50	50 - 150	120 - 150
Isıl güç (MW)	0,001 - 10	0,001 - 1	0,01 - 1
Verim, %	50 - 90	75 - 90	75 - 100
Depolama süresi	Günlük - Yıllık	Saatlik - Haftalık	Saatlik - Günlük
Maliyet (€/kWh)	0,1 - 10	~50	8 - 100
Teknik ömür, yıl	10 - 30+ (Çevrime, sıcaklığa ve işletme koşullarına bağlı)		
Güç faktörü, %	80	80	55
Ulaşılabilirlik, %	95	95	95
Tipik kapasite, MW <sub>e</sub>	25	0,5	100
Kurulu kapasite, GW <sub>e</sub>	9 - 10	<<1	18 (tahmini)
Çevresel etki	İhmal edilebilir, kullanılan birincil fosil kaynakların miktarına bağlı olarak sera gazı emisyonunun azalmasına yardımcı olur.		
Maliyet (\$ 2008)	Tipik uluslararası güncel değerler ve aralıklar		
Yatırım maliyeti, \$/kW	3400 - 4500	6000 - 15000	1000 - 3000
İşletme ve bakım maliyetleri, \$/kW/yıl	120	250	20 - 60
Ekonomik ömrü, yıl		20	
Toplam üretim Maliyeti, \$/MWh	80 - 110	120 - 300	25 - 75
Pazar payı, %	0,25	İhmal edilebilir	Mevcut değil

Bu güneş santrallerine ilave olarak, Çizelge 3.4'te bazı termal güneş enerji depolama sistemleri ve sahip oldukları termal enerji depolama sistemleri hakkında bilgi verilmiştir.

### 3.2.2 Bina ve endüstriyel proses ısıtma

Termal enerji depolama teknikleri küçük ölçekli binalarda ve endüstriyel proseslerde de kullanılmaktadır. Örneğin, temizleme prosesi birçok endüstride kullanılmaktadır. Şişelerin, konserve kutularının ve proses ekipmanlarının temizlenmesi gıda endüstrisindeki enerji tüketiminin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Metal işleme tesislerindeki galvanizleme, anotlama, boyama gibi uygulamalardan için yüzeyin ya da parçanın temizlenmesi de enerji gerektiren işlemlerdir. Tekstil ve çamaşır temizleme fabrikaları ve oto yıkamacıları, yaklaşık 60 ile 100°C arasında sıcak su

kullanılmaktadır. Bu tip uygulamalar termal enerji depolama sistemleri ile mükemmel uyum sağlayabilecek uygulamalardır [34].

Sıcak su boylereleleri, binalarda en çok uygulanan termal enerji depolama yöntemidir. Sıcak su temini için kullanılmalarının yanı sıra, binalardaki ısıtma sistemlerini desteklemek amacıyla da kullanılmaktadırlar [61]. Sıcak hava kollektörleri ile birlikte kullanılan su, beton, tuğla, kum gibi maddeler de binaların ısıtılmasında kullanılan termal enerji depolama sistemleridir [62]. Yine su, beton, tuğla, kum gibi maddeler gece saatlerinde soğutularak gündüz saatlerinde binaları soğutmak amacıyla kullanılabilirler [63].

### **3.2.3 Mevsimsel ısıtma**

Mevsimsel ısıtma, termal enerji depolama sistemlerinin uygulandığı diğer bir alandır. Sıcak yaz günlerinde depolanan ısı, soğuk kış günlerinde kullanıma sunulmaktadır [48]. Genellikle güneş kollektörleriyle toplanan ısı kullanılsa da, diğer ısı kaynaklarından toplanan ısı da sisteme dâhil edilebilmektedir [24]. Mevsimsel ısı depolama üç farklı uygulama türüne sahiptir. Bunlar düşük sıcaklık, orta sıcaklık ve yüksek sıcaklık uygulamalarıdır. Düşük sıcaklık uygulamalar genellikle iklimlendirme sistemlerinde tercih edilmekte olup, binanın ihtiyacı olan ısı toprakta depo edilmektedir. Orta sıcaklıktaki uygulamalar da düşük sıcaklıktaki uygulamalara benzer amaçla yapılmakta olup, ısı yine toprakta depo edilmektedir.

Yüksek sıcaklıktaki mevsimsel depolama uygulamaları, bina ısıtmasına ek olarak soğutma ve sıcak su temininde de kullanılmaktadır. Depolama ortamı olarak genellikle su tercih edilmektedir [34].

**Çizelge 3.4:** Bazı termal güneş santralleri ile sahip oldukları termal enerji depolama sistemleri.

Tesis	Tipi	Depolama ortamı	Nominal sıcaklıklar (°C)		Depolama tipi	Tesis kapasitesi	Depolama kapasitesi	Referans
			Soğuk	Sıcak				
SSPS-DCS test facility Almeria, İspanya	Parabolik oluklu	Santotherm 55	225	295	1 tank termoklin	1,2 MW <sub>th</sub>	5 MW <sub>th</sub>	[63,64]
Planta Solar – 10 Sevilla, İspanya	Merkezi alıcılı	Basınçlı su	240	260	Buhar Akümülatörü	11 MW <sub>e</sub>	50 dk / 20 MW <sub>th</sub>	[65,66]
Andasol - 1-2 Granada, İspanya	Parabolik oluklu	Ergimiş tuz	292	386	2-tank indirekt	50 MW <sub>e</sub>	7,5 saat/ 1010 MW <sub>th</sub>	[65,66]
Manchasol - 1-2, Ciudad, İspanya	Parabolik oluklu	Ergimiş tuz	292	386	2-tank indirekt	50 MW <sub>e</sub>	7,5 saat	[65,66]
Archimede Sicily, İtalya	Parabolik oluklu	Ergimiş tuz	290	550	2-tank direkt	5 MW <sub>e</sub>	8 saat/ 100 MW <sub>th</sub>	[65]
Dahan Beijing, China	Merkezi alıcılı	Doymuş buhar/yağ	220	350	Kombine buhar akümülatörü / beton	1 MW <sub>e</sub>	1 MW <sub>th</sub>	[65,66]



#### 4. TASARIM PRENSİPLERİ

Termal enerji depolama sistemlerinin varlığı, santralin tasarımı ve optimizasyonu ile ilgili olarak ilave gereksinimleri de beraberinde getirir. Örneğin, parabolik oluklu güneş kolektörlerinin kullanıldığı güç santralleri için ısı taşıyıcı akışkanın maksimum sıcaklığı, güneş tarafındaki maksimum sıcaklığın bir sonucu olarak ortaya çıkacaktır. Gece saatlerinde sistem deşarj edilirken ısı taşıyıcı akışkanın en yüksek sıcaklığı, gün içerisindeki maksimum sıcaklıkla aynı olmayacaktır. Düşük sıcaklıktaki ısı taşıyıcı akışkana bağlı olarak daha az miktarda ve daha düşük sıcaklıklarda buhar üretimi sağlanabilecektir. Bunun üstesinden gelmek için, artan ısı taşınımı ve buhar üretimi oranlarını elde etmek için suyun buhar basıncı düşürülerek doyma sıcaklığını düşürülmüş olunur. Çevrim verimi hesaplanırken bu değişiklikler dikkate alınmalıdır. Şekil 4.1’de termal enerji depolama sistemleri için tasarım esasları tesis düzeyinde, bileşen düzeyinde ve sistem düzeyinde sınıflandırılmıştır. Termal enerji depolama sisteminin performansı bileşenlerin türüne ve kapasitesine bağlıdır. Depolama malzemesinin, tankın ve ısı taşıyıcı akışkanının arasındaki uyum, sistem performansına etki eden parametrelerdir [43].

Termal enerji depolama sistemi dizayn edilirken, uygulamanın sınır koşulları dikkatlice belirlenmelidir [41]:

- sıcaklık açısından bakıldığında, kaynağın besleme sıcaklığı depolama sıcaklığına eşit ya da depolama sıcaklığından yüksek olmalıdır.
- güç açısından bakıldığında, ısı belirli bir zamandaki ısı transferi, şarj ve deşarj için gerekli olan düzeyde olmalıdır.
- ısı taşıyıcı akışkan için doğal ya da zorlanmış taşınım ile sağlanan akış hareketi göz önüne alınmalıdır.

## Termal Enerji Depolama Tasarım Esasları

Tesis Düzeyinde	Bileşen Düzeyinde	Sistem Düzeyinde
<ul style="list-style-type: none"><li>• Uzun dönem ya da kısa dönem depolama</li><li>• Sistem boyutu (şarj/deşarj oranı)</li><li>• Tesis işletmesi (İşletme sıcaklığı, basınç, ortam)</li><li>• Tesis ekonomisi</li><li>• Çevresel etki</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Depolama Şekli (Duyulur, gizli, termokimyasal)</li><li>• Depo malzemesi ( Özellikleri, çevrim kapasitesi, maliyet)</li><li>• Koruyucu malzeme,</li><li>• Isı taşıyıcı akışkan ile arasındaki uyum</li><li>• Çevrime uygunluk</li><li>• Çevresel etki</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tank</li><li>• Isı değiştiricileri, pompalar ve borular,</li><li>• Solar bölge, iş akışkanı ve ısı taşıyıcı akışkan ile arasındaki uyum</li><li>• Kontrol edilebilme</li><li>• Verim, Kayıplar</li><li>• Maliyet</li></ul>

**Şekil 4.1:** Termal enerji depolama sistemleri için tesis, bileşen ve sistem düzeyinde tasarım esasları [43].

Yerüstünde kurulan tipik bir çelik termal enerji depolama tankı için temel tasarım gereklilikleri, termal gereksinimler ve akış gereksinimleri şu şekilde sıralanabilir [45]:

1. Genel tasarım gereksinimleri:

- a. Tank kapasitesi: Tank kapasitesi hesaplanırken sıcaklık değişiminin olduğu bölgenin, tanktaki hava boşluğunun ve genleşme hacmi dikkate alınmalı, varsa alt difüzörün altında ve üst difüzörün üzerinde kalan hacim göz ardı edilmelidir.
- b. Şarj vedeşarj sırasında tanka giren akışkan ile tanktan çıkan akışkan arasındaki sıcaklık farkı,  $\Delta T$
- c. Şarj vedeşarj döngüsünde tanka giren ve tanktan çıkan akışın maksimum hızı
- d. Termoklin bölgenin belirlenmesi: Sıvı fazdaki depolama ortamının kullanıldığı tanklarda, sıcak ve soğuk akışkan arasında oluşan ve sıcaklığın çok hızlı bir şekilde değiştiği kısım olan termoklin bölge

2. Tank tasarımı yapılırken, öncelikle matematik modeli oluşturulmalı ve termal depolama kapasitesi ve modelin performansı test edilmelidir. Yapılan test tankın tam olarak şarj ve deşarj edilmesi durumunda tankın davranışını göstermelidir.
3. Tank girişindeki difüzör, akışı düzgün bir şekilde dağıtmalıdır.
4. İyi bir performans için tankın sahip olduğu yalıtım, 24 saatlik bir zaman diliminde %2'den daha fazla ısı kaybına izin vermemelidir.





## 5. ÖRNEK TANK TASARIMI VE CFD ÇALIŞMALARI

Bu çalışma ile mevcut termal enerji depolama sistemlerine alternatif olarak, daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilen ve kolay boyutlandırılabilen bir tank tasarımı amaçlanmıştır. Tasarlanan tank için giriş çapının, yüzey alanının ve ortam porozitesinin depolanan ısıya olan etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak ulaşılan optimum dizayn için deşarj işlemi ve bekleme durumundaki ısı kaybı analizi yapılmıştır. Tasarım, küçük ölçekli bir uygulama için dizayn edilmiştir. Çalışma sıcaklığı 900K ila 1200K arasındadır. Akışkan sıcaklığı şarj işlemi için 1200K, deşarj işlemi için ise 700K olarak belirlenmiştir.

### 5.1 Malzeme Seçimi

#### 5.1.1 Depolama ortamı malzemesi

Büyük kapasiteli termal enerji depolama sistemleri için sıklıkla tercih edilen erimiş tuzların ve termal yağların çalışma sıcaklıkları yaklaşık 400°C ile sınırlıdır. Bu sıcaklık engelini aşmak, depolama ortamı olarak seramik malzemelerin kullanılması ile mümkün olabilmektedir [31]. Özellikleri Çizelge 5.1’de verilen kordiyeritin termal enerji depolamak için uygun bir malzeme olabileceği bir akademik çalışmada ele alınmıştır [67].

**Çizelge 5.1:** Kordiyeritin özellikleri [68].

Özellikler	Birimi	Test Standardı	Değeri
Kimyasal formülü	-	-	2MgO-2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -5SiO <sub>2</sub>
Yoğunluk, ρ	kg/m <sup>3</sup>	ASTM C20	2600
Maksimum çalışma sıcaklığı	°C	Yüksüz şartlarda	1371
Isıl iletkenlik	W/m·K	ASTM C408	3,0
Özgül Isı, c <sub>p</sub>	J/kg·K	ASTM C351	1465

Kordiyeritin andalosit ile katkılandırılması ile oluşan seramik malzemenin termal çevrimlere karşı dayanımını inceleyen akademik çalışma, kordiyeritin termal enerji depolamak için uygun bir aday olduğunu göstermiştir. Bu çalışma referans alınarak, tasarlanan termal enerji depolama sistemi için kordiyerit esaslı seramik malzeme depolama ortamı olarak seçilmiştir.

### 5.1.2 Akışkan

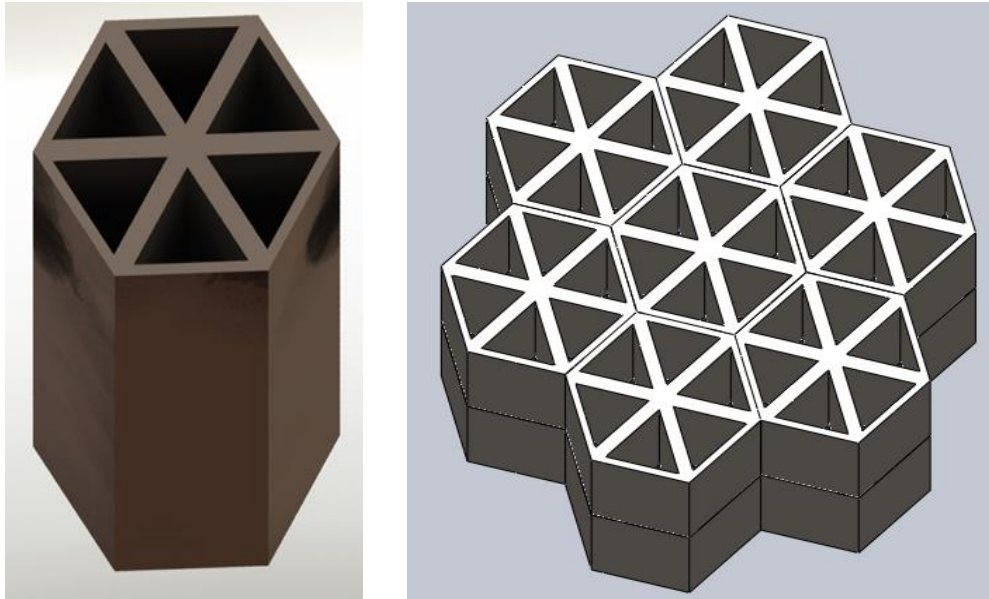
Yüksek sıcaklıklarda kullanılmaya uygun olmasının yanı sıra ucuz ve kolay bulunabilir olması nedeniyle ısı taşıyıcı akışkanı olarak hava tercih edilmiştir.

### 5.1.3 Yalıtım malzemesi

Yüksek sıcaklıklarda kullanılmaya uygun olması nedeniyle yalıtım malzemesi olarak taş yünü tercih edilmiştir. Kullanılan taş yününün yüksek sıcaklıklar için ısı iletkenlik değeri  $0,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 'dir [69].

## 5.2 Geometri

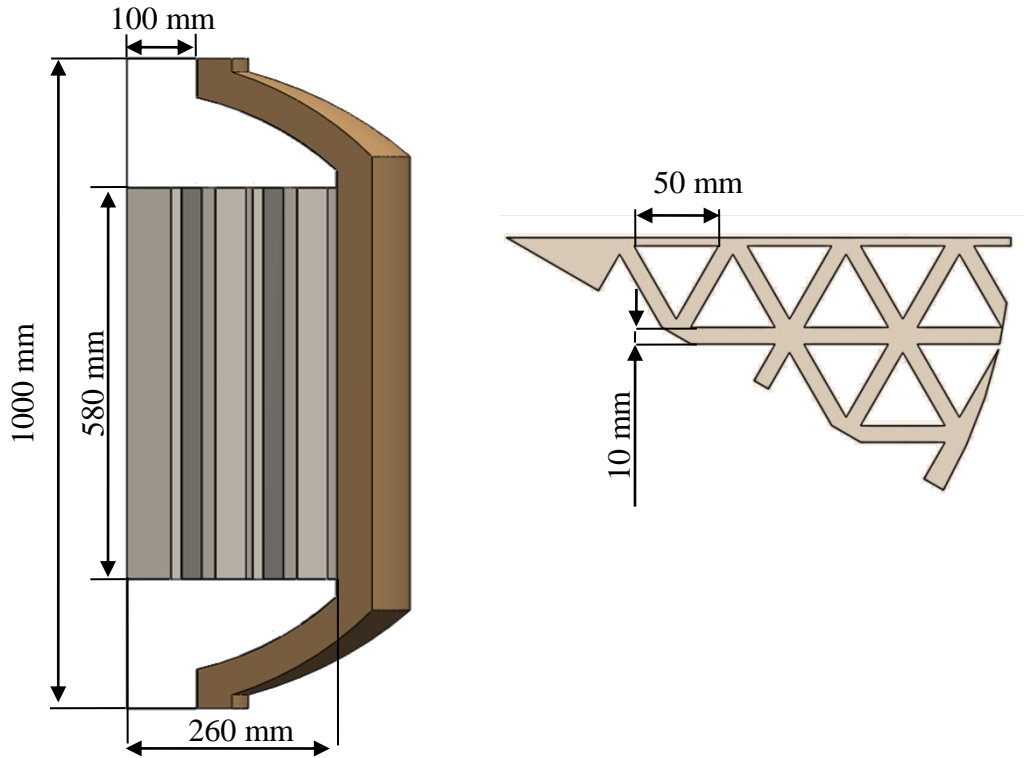
Depolama malzemesi olarak seçilen kordiyerit, Şekil 5.1'de görüldüğü gibi bal peteği yapısında ve tuğla şeklinde tasarlanmıştır. Bu şekildeki tuğlaların bir arada kullanılması ile sistemin pratik olarak istenen kapasitede dizayn edilebilmesi sağlanmıştır.



**Şekil 5.1:** Kordiyerit malzemeneden yapılmış altıgen tuğla.

Tankın alt ve üst yüzeylerinin tasarımı ilk önce konik olarak yapılmıştır. Aynı sınır koşulları ile yapılan çalışmalar göstermiştir ki konik kesitin akış çizgilerinin dağılımına olan etkisi nedeniyle tank içerisindeki bazı bölgelerde hava akışı ters yönde olmuştur. Bu da tank genelindeki sıcaklık dağılımının homojen olmamasına neden olmuştur. Aynı giriş çapı ve tank çapına sahip tank için küresel tasarımlı tanktaki geri akış miktarının konik olandan daha az olduğu görülmüştür.

Referans model olarak ele alınan tankın 1/12'lik dilimi ve ölçüleri ile birlikte Şekil 5.2'de verilmiştir.

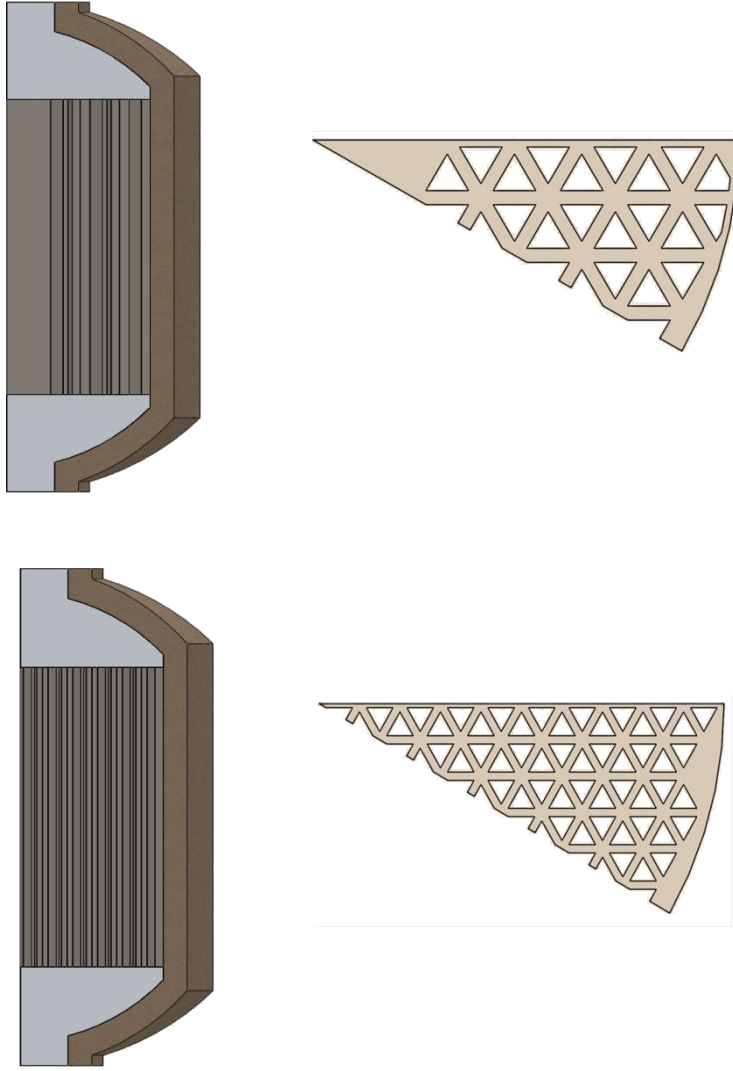


**Şekil 5.2:** Referans modele ait ölçüler.

Şekil 5.4'de, aynı sınır koşulları için konik ve küresel tank tasarımlarının akış profilleri görülmektedir. Ayrıca giriş-çıkış çapının değişiminin akış üzerinde etkilerinin fazla olması, yapılan tasarımın farklı kapasitedeki bir sisteme uyarlanmasını zorlaştırmaktadır. Bunun üzerine tasarım yenilenecek alt ve üst yüzeylere küresel şekil verilmiştir. Küresel şekle sahip olan tanktaki akış profilinin konik şekilden daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

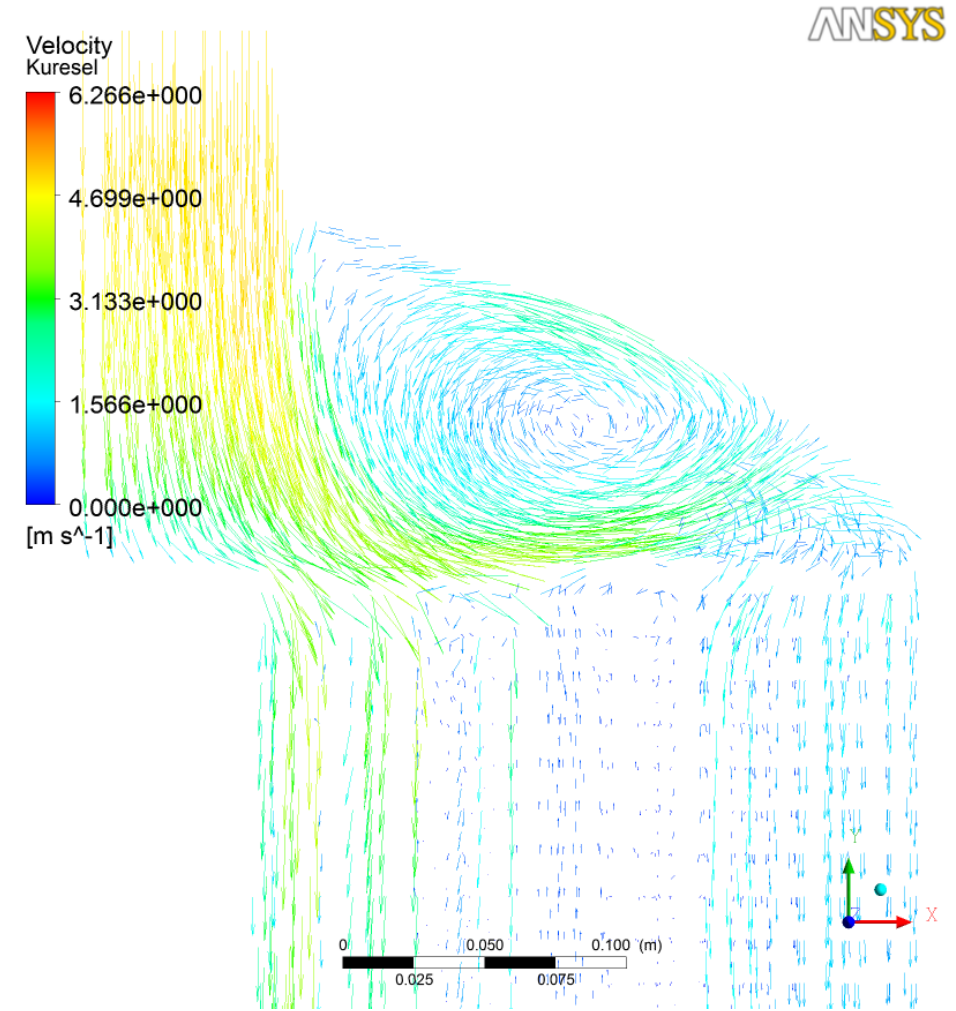
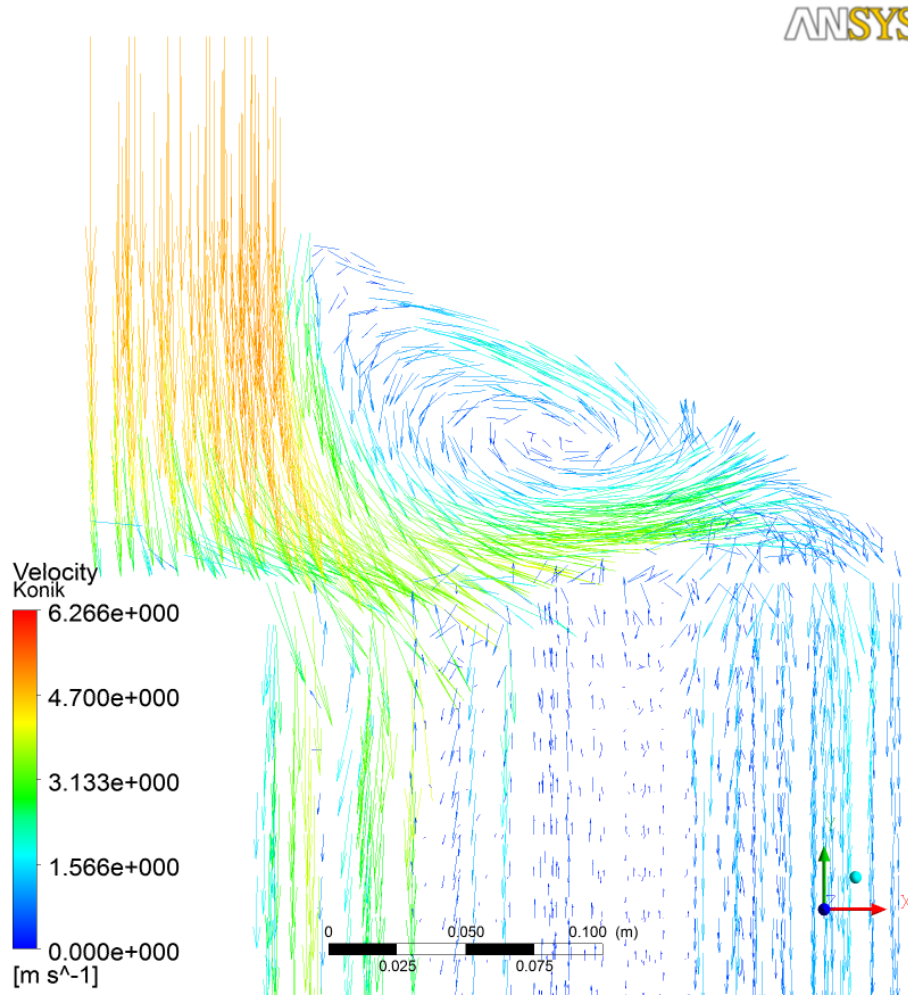
Giriş çapının etkisini gözlemlemek için giriş çapının %20 daha küçük ve %20 daha büyük olduğu iki model daha hazırlanmıştır. Bu üç modelin CFD çalışmaları Fluent programı ile yapılmıştır. Daha sonra kordiyeritin et kalınlığı ve porozitesi

değiştirilerek elde edilecek yeni modeller için de akış analizleri ile termal analizler yapılmıştır. Sonuç olarak ilgili parametrelerin enerji depolama kabiliyetine olan etkileri araştırılmıştır. Giriş çapı referans modelle aynı, toplam yüzey alanı ve porozitesi farklı olan modeller Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



**Şekil 5.3:** Referans modelden farklılaştırılarak oluşturulan yeni modellerin içyapısı.

Oluşturulan toplam 9 model için ölçüler Çizelge 5.2’de verilmiştir. Referans modeller koyu renkle yazılmış olup, bir öncesindeki model %20 daha küçük, bir sonrasındaki model ise %20 daha büyük giriş çapına ait olan modeldir.



Şekil 5.4: Konik (soldaki) ve küresel (sağdaki) tank tasarıma sahip tank için akış profilleri.

**Çizelge 5.2:** Oluşturulan modellere ait ölçüler.

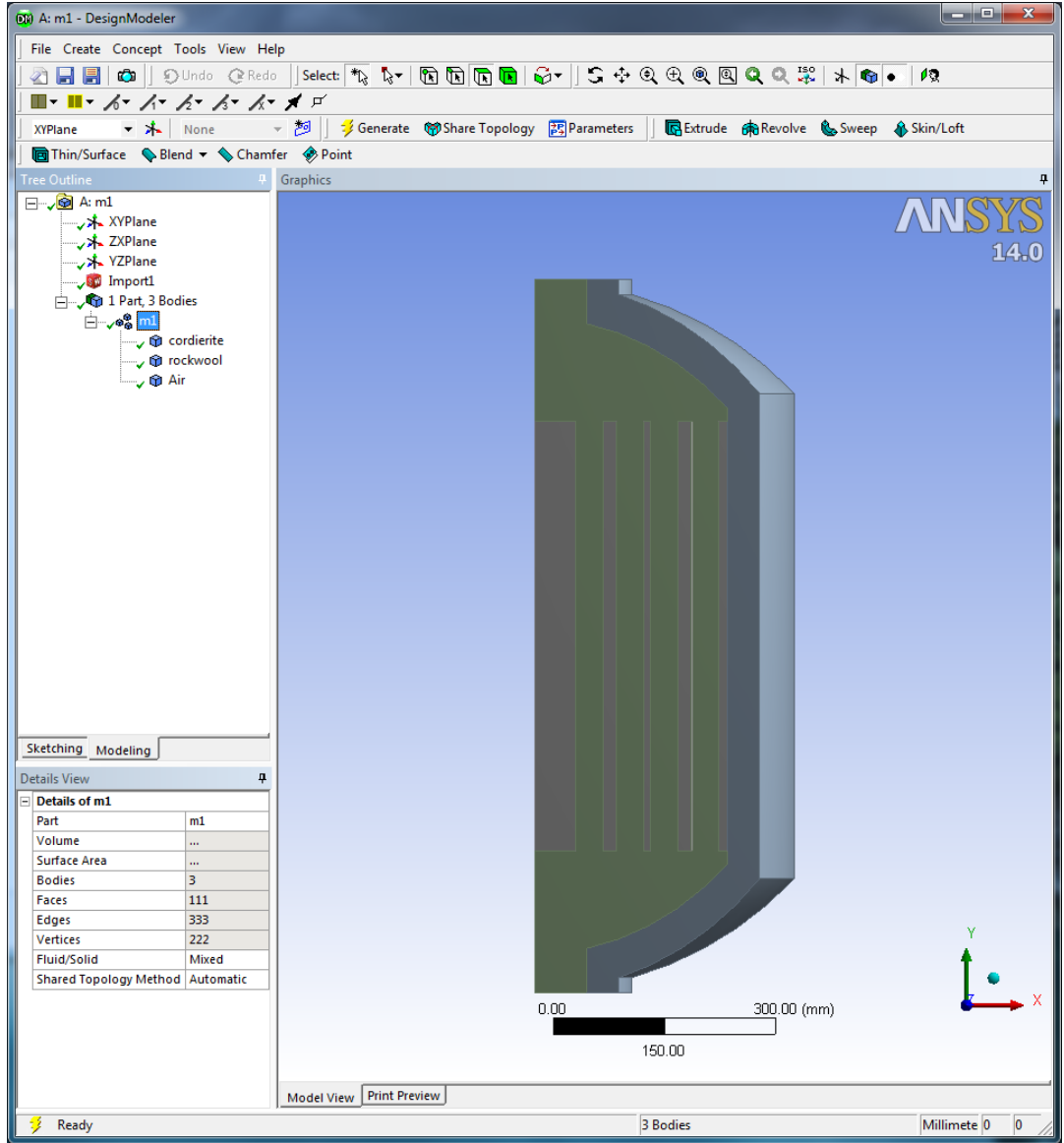
Model No.	Giriş Çapı	Tank Çapı	Giriş Çapının Toplam Çapa Oranı	Seramik Yüksekliği	Yüksekliğin Çapa Oranı	Kütle
	d, [m]	D, [m]	d/D	H, [m]	H/D	m, [kg]
1	0,16	0,60	0,27	0,580	0,97	16,98
2	0,20	0,60	0,33	0,580	0,97	16,98
3	0,24	0,60	0,40	0,580	0,97	16,98
4	0,16	0,60	0,27	0,580	0,97	23,02
5	0,20	0,60	0,33	0,580	0,97	23,02
6	0,24	0,60	0,40	0,580	0,97	23,02
7	0,16	0,60	0,27	0,580	0,97	21,60
8	0,20	0,60	0,33	0,580	0,97	21,60
9	0,24	0,60	0,40	0,580	0,97	21,60

### 5.3 Fluent ile Sistemin Modellenmesi

Tasarlanan termal enerji depolama sistemine ait CAD modelleri, ANSYS programı dâhilinde bulunan Designmodeler ile tekrar düzenlenerek, yine ANSYS dâhilinde bulunan Meshing eklentisiyle ağ yapısı oluşturulmuştur. Daha sonra sınır koşulları tanımlanmış ve Fluent programında da sınır koşullarına ait ilave bilgiler girilerek analiz yapılmıştır. Katı modelin ve ağ yapısının oluşturulması ile ilgili olan kısımlarda yalnızca referans modele ait olan çalışmalar gösterilmiş olup, bütün modeller için aynı adımlar uygulanmıştır.

#### 5.3.1 Katı model oluşturulması

Tasarlanan termal enerji depolama sistemine ait CAD modelleri, ANSYS programı dâhilinde bulunan Designmodeler ile Şekil 5.5'te gösterildiği gibi tekrar düzenlenmiştir. Bu sayede Fluent programının CAD dosyasını daha doğru okuması sağlanmıştır. Bu işlem yapılmadığı durumda, tasarlanan modelde tanımlanamayan ya da yanlış tanımlanan hacimler ve yüzey alanları olabilmektedir.



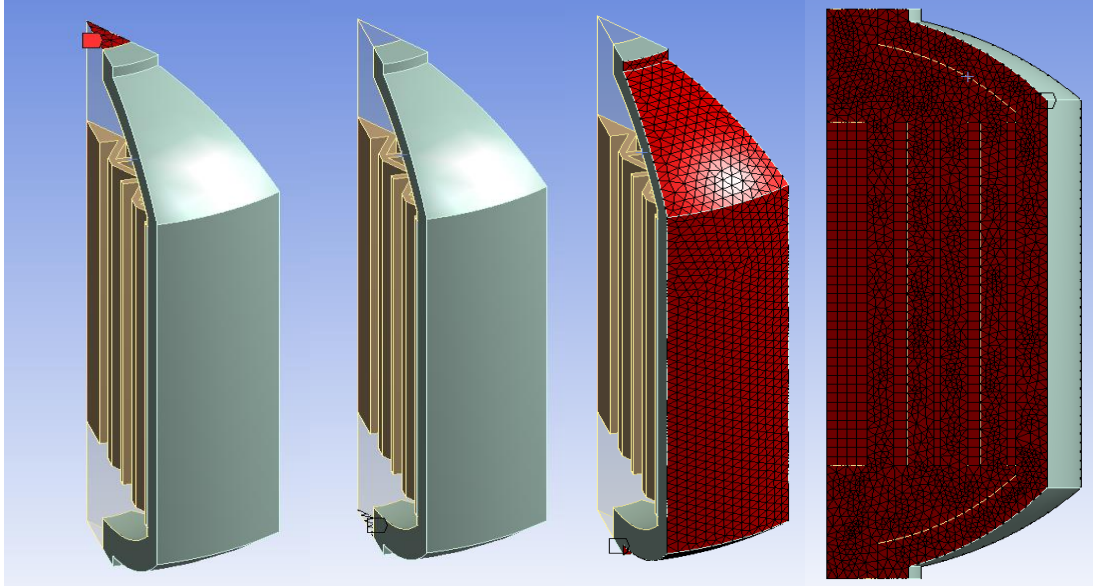
**Şekil 5.5:** Designmodeler ile katı modelin düzenlenmesi.

Bu aşamada model içerisindeki malzemelerin katı ya da akışkan oldukları da tanımlanabilmektedir. Hava için “Fluid”, kordiyerit ve taş yünü için “Solid” tanımlaması yapılmıştır.

### 5.3.2 Ağ yapısının oluşturulması

Designmodeler ile düzenlenen model, Meshing eklentisine aktarılarak ilk önce yüzeylere isimler verilmiştir. Bu isimlerin temel amacı, Fluent programında çalışırken yüzeyleri tanıyabilmektir. Fluent’in özelliği olarak, eğer orada tanımlanacak olan sınır koşuluna ait isim, bu aşamada yüzeye verilirse, program sınır koşulunu otomatik olarak oluşturabilmektedir. Yüzeylere verilen isimler Şekil 5.6’da

gösterilen sıra ile soldan sağa “mass-flow-inlet, outflow, wall, symmetry” şeklindedir.



Şekil 5.6: Yüzeyle verilen isimler.

Daha sonra ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısının oluşturulması için seçilen parametreler Çizelge 5.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3: Ağ yapısının oluşturulması için seçilen parametreler.

Relevance Center	Fine
Smoothing	High
Curvature Normal Angle	10°

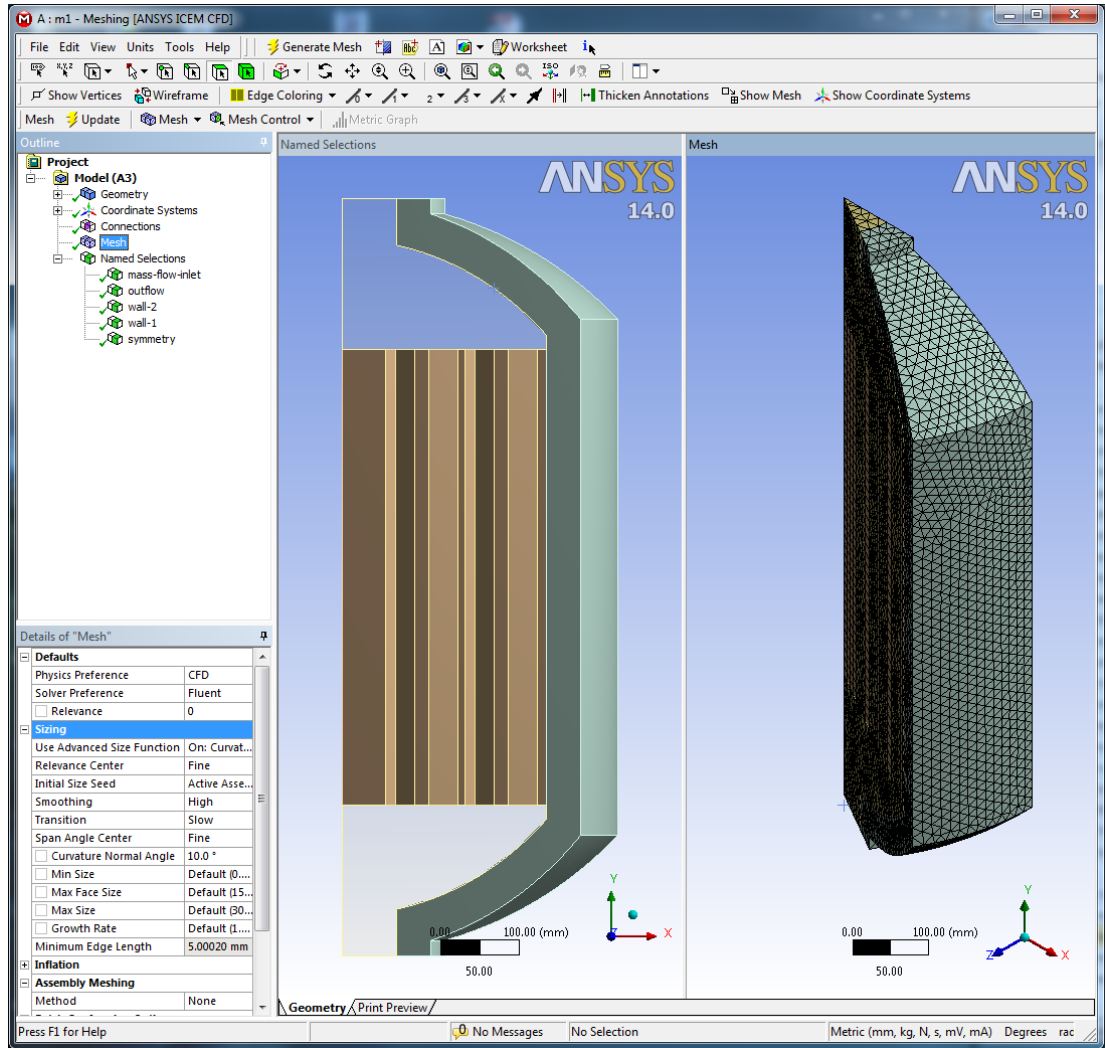
Oluşturulan ağ yapısı 18456 “Node” ve 74713 “Element”ten oluşmaktadır. Analize hazır hale getirilen model için ekran görüntüsü Şekil 5.7’de gösterilmektedir.

### 5.3.3 Fluent ile analizin yapılması

Ağ yapısı oluşturulan model, artık Fluent’te kullanmaya hazırdır. Fluent programı açılırken Şekil 5.8’de gösterilen pencere açılmaktadır. Burada “Double Precision” seçeneği işaretlenmiştir. Bu sayede ondalıklı sayılarda virgülden sonra 8 değil 16 hanenin işleme dâhil edilmesi sağlanarak hesaplama hassasiyeti artırılmıştır. “Processing Options” seçeneğinden “Parallel (Local Machine)” seçeneği işaretlenip, “Number of Processes” 4 olarak seçilmiştir. Bu sayede hesaplama yapılırken bilgisayara ait işlemcinin 4 çekirdeğinin de aktif olarak kullanılması sağlanmıştır. Fluent açıldığında ilk olarak gelen ekrandan “Check” tuşuna basarak programın dosyayı kontrol etmesi sağlanır. Program, kendi algıladığı hacim ve yüzey alanı



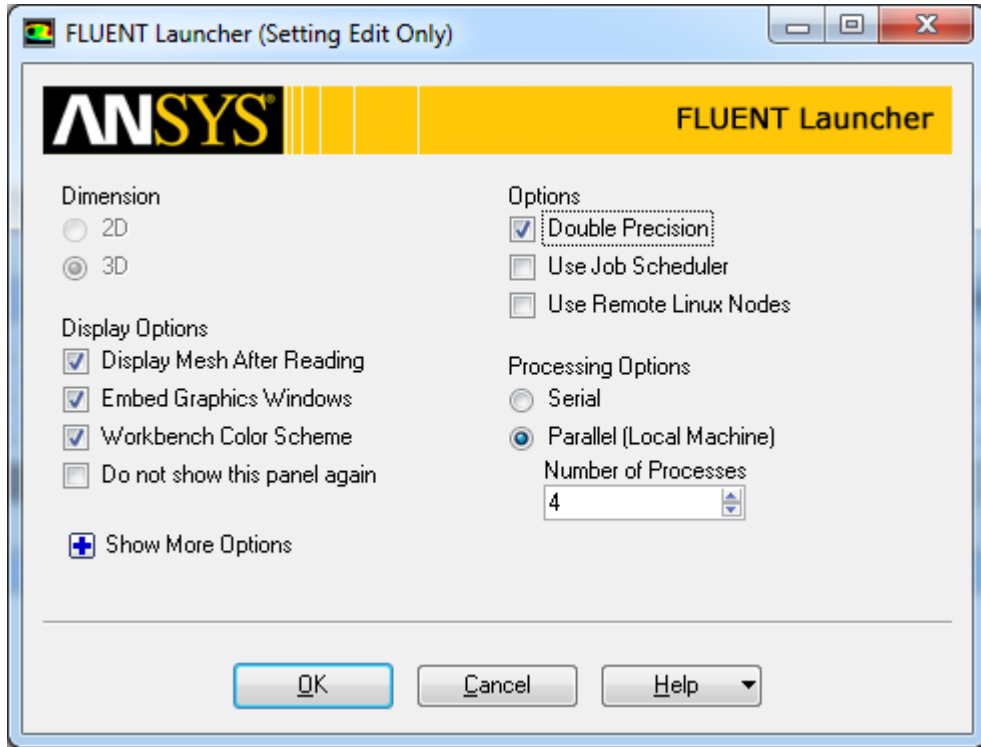
bilgilerini çıktı olarak verir, eğer CAD programında oluşturulan veriler ile uyuyorsa program dosyayı doğru okumuş demektir.



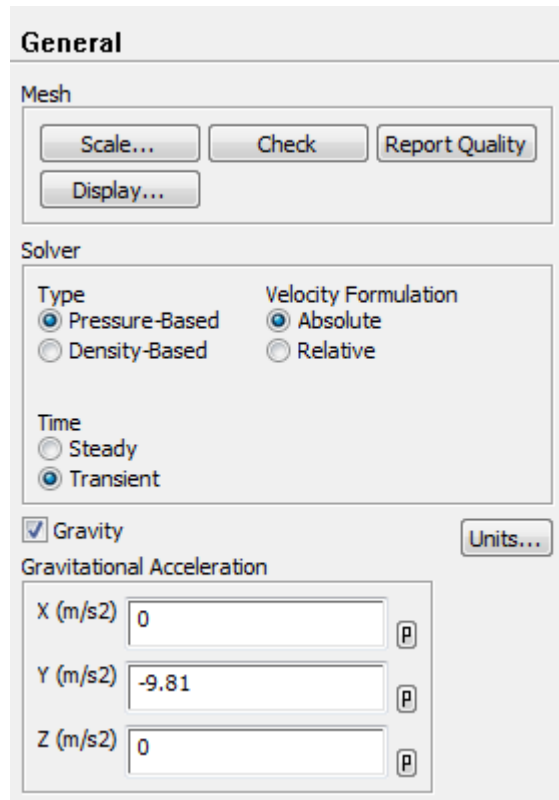
Şekil 5.7: Meshing eklentisi ile ağ yapısının oluşturulması.

Aksi halde tasarım aşamasına geri dönülerek mümkün olan sadeleştirmelere gidilir, böyle hata çözülmüş olunur. Ayrıca, Şekil 5.9’da gösterildiği gibi “Pressure-Based, Absolute, Transient” seçenekleri işaretlenmiştir. Yer çekiminin etkisini de analize dâhil etmek için “Gravity” sekmesi işaretlenmiş, değeri Y yönünde  $-9,81 \text{ m/s}^2$  olarak girilmiştir.

Programın hesaplama performansını iyileştirmek için üstteki menüden “Mesh→Reorder→Domain” tıklanmıştır. Enerji çözümlemesini aktif etmek için soldaki menüden “Models→Energy→Edit” işlemi yapılarak açılan pencerede “Energy Equations” sekmesi işaretlenmiştir.



Şekil 5.8: Fluent programının açılış ekranı ve yapılan ayarlar.



Şekil 5.9: Analiz için genel ayarlar.

Akış modeli ile ilgili ayarlar yapılmak üzere “Models→Viscous→Edit” işlemi yapılarak açılan pencereden, türbülanslı akışların analizinde kullanılan “k-omega” modeli seçilmiştir.

Akışkan ve katılar ile ilgili malzeme özelliklerini girmek için “Materials” bölümüne girilmiştir ve malzeme özellikleri olarak Çizelge 5.4’de gösterilen değerler tanımlanmıştır.

**Çizelge 5.4:** Modelde kullanılan malzemeler ve özellikleri.

Name	Cordierite	Rockwool
Material Type	Solid	Solid
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2600	130
Specific Heat, c <sub>p</sub> (J/kg·K)	1465	1500
Thermal Conductivity (W/m·K)	3	0.5

Fluent kütüphanesinde standart halde bulunan verilerin kullanılacak olması nedeniyle hava için herhangi bir yeni tanımlama yapılmamıştır.

“Cell Zone Conditions” bölümünden, girilen malzeme özelliklerinin modeldeki hangi parçaya ait olduğunun tanımlaması yapılmıştır.

“Boundary Conditions” bölümünden sınır koşulları verilmiştir. Ağ yapısı oluştururken verilen isimler sayesinde program sınır koşulu tipini otomatik olarak tespit etmiştir. Bunlara ilave olarak şu işlemler yapılmıştır:

“Mass-Flow-Inlet” sınır koşulu için “Mass Flow Rate” 0.01kg/s ve “Total Temperature” 1200K olarak girilmiştir.

“Wall” sınır koşulu için “Thermal Conditions” bölümünden dış yüzey sıcaklığı sabit 300K olarak girilmiştir.

“Outflow” ve “Symmetry” sınır koşulları program tarafından otomatik olarak algılandığı için herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

“Solution Methods” menüsünden “Spatial Discretization” başlığı altındaki “Pressure→Body Force Weighted” şeklinde değiştirilerek, yapılan analizlerde atalet kuvvetlerinin etkisi analize dahil edilmiş, diğer ayarlar mevcut haliyle bırakılmıştır.

“Solution Initialization” menüsüne gelinerek başlangıç sıcaklığı 900K olarak belirlenmiştir. Böylece işlem süresi kısaltılmıştır. Başlangıç sıcaklığının 900K olarak verilmesinin nedeni, termal enerji depolama sisteminin en düşük çalışma sıcaklığının

yaklaşık 900K olarak öngörülmesidir. Bu değerin girilmesinin ardından “Initialize” tuşuna basılarak sınır koşullarının modele uygulanması sağlanır.

“Calculation Activities” bölümünden “Autosave Every (Time Steps)” değeri 100 olarak girilmiştir. Bu sayede hem her 100 birimlik zaman dilimi için değerler kayıt altında tutulmuş, hem de analiz sırasında olası bir sorun durumunda analizin en son kayıt edilen zaman adımından devam etmesi sağlanabilmektedir.

“Run Calculation” bölümünden hesaplama adımı ile ilgili değerler Şekil 5.10’da gösterilmiştir. İlk önce analizler “Adaptive Time Stepping Method” ile yapılmıştır. Ancak bu yöntem ile yapılan analizlerde “Residuals” değerlerinin yüksek olmakta ve analizler çok düşük adımlar halinde çözülmektedir. Bu sorunu çözmek için “Fixed Time Stepping Method” kullanılmış ve “Max Iterations/Time Step” değeri 50 olarak girilmiştir. “Time Step Size” 1s olarak, “Number of Time Steps” 4000 olarak belirlenmiştir.

The image shows a software dialog box titled "Run Calculation". It contains several input fields and buttons. The "Time Stepping Method" is set to "Fixed". The "Time Step Size (s)" is set to 1. The "Number of Time Steps" is set to 4000. Under the "Options" section, "Extrapolate Variables" and "Data Sampling for Time Statistics" are unchecked. The "Sampling Interval" is set to 1, and the "Time Sampled (s)" is set to 0. The "Max Iterations/Time Step" is set to 50, and the "Reporting Interval" is set to 10. The "Profile Update Interval" is set to 10. There are buttons for "Check Case...", "Preview Mesh Motion...", "Settings...", "Data File Quantities...", "Acoustic Signals...", and "Calculate".

Şekil 5.10: Zaman adımı ile ilgili değerler.

Bunun anlamı 1'er saniyelik zaman dilimleri ile toplam 4000 saniyelik akış için analiz yapılacağıdır. "Calculate" tuşuna basılarak analiz başlatılmış, her bir model için yaklaşık 22-24 saat arasında değişen çözüm sürelerinin sonunda modeller çözümlenmiştir. Bu haldeki "Residuals" değerleri analiz süresince ortalama  $10^{-4}$  mertebesinde seyretmiştir.

#### 5.4 CFD Çalışmalarının Sonuçları

Yapılan analizlerin sonucunda 9 modelde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te verilmiştir. Model1-2-3'ün gösterildiği Şekil 5.12'ye bakıldığında görülüyor ki tank içerisinde sıcaklık dağılımı homojen olmaktan çok uzaktır. Dış yüzeylerde oluşan ısı kaybı nedeniyle bu bölgede sıcaklık diğer bölgelerden daha azdır. Tank merkezine yaklaştıkça sıcaklığın artması beklenmektedir, ancak iç kanallarda hava akışının dengesizliği nedeniyle sıcaklıkta da lineer bir şekilde artmamaktadır. Hava akışındaki dengesizlikten kastedilen, hızın bölgeden bölgeye değişmesi, hatta zaman zaman ters yönde akışın olmasıdır. Bu durum da sıcaklık ve depo edilen enerjinin incelenmesinin ardından ele alınacaktır. Giriş çapının değişiminin sıcaklık dağılımında kayda değer bir değişime neden olmadığı da yine aynı şekilde görülebilmektedir.

Model4-5-6'nın sıcaklık dağılımının gösterildiği Şekil 5.13'e bakıldığında, dağılımın daha homojen olduğu görülmektedir. Buradan anlaşılıyor ki tank içerisindeki kanalların büyüklüğünün akışa olan etkisi, tank giriş çapının etkisinden daha fazladır. Şekil 5.14'e bakıldığında Model7-8-9'un diğer modellere göre çok daha homojen bir sıcaklık dağılımına sahip olduğu görülmektedir.

Yapılan analiz neticesinde elde edilen verileri Çizelge 5.5'de gösterilmiştir. Bu verilere göre, ortam porozitesinin %54,4 olduğu Model1-2-3 için giriş çapının tank çapına oranının (d/D) artmasının depo edilen enerji miktarını artırdığı sonucuna varılmıştır. Boşluk miktarının azaltılması ve malzeme kalınlığının aynı kalması neticesinde ortam porozitesinin %38,2 olduğu Model4-5-6 için ise d/D oranının referans modele göre daha az olması ve daha fazla olması durumlarının her ikisinde de depolama kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Olası hatalara karşı veriler kontrol edilerek analizler tekrarlanmış ve aynı sonuç elde edilmiştir. Boşluk ve malzeme kalınlığının her ikisinin de azaltılması neticesinde porozitenin yaklaşık olarak aynı

olduğu (%39,2) Model7-8-9 için ise şu sonuca varılmıştır; d/D oranı arttıkça depo edilen enerji miktarı artmaktadır.

**Çizelge 5.5:** Analiz sonuçlarına göre, her bir modelde depo edilen enerji miktarları.

Model	d/D	H/D	Porozite	Depo Edilen Enerji Miktarı		Açıklama
				kJ	kWh	
1	0,27	0,97		17616,96	4,89	1. Referans Model'den %0,85 daha az
2	0,33	0,97	%54,4	17768,87	4,94	1. Referans Model
3	0,40	0,97		18126,06	5,04	1. Referans Model'den %2,01 daha fazla
4	0,27	0,97		25101,72	6,97	2. Referans Model'den %0,27 daha fazla
5	0,33	0,97	%38,2	25034,14	6,95	2. Referans Model
6	0,40	0,97		25075,87	6,96	2. Referans Model'den %0,17 daha fazla
7	0,27	0,97		23842,65	6,62	3. Referans Model'den %1,59 daha az
8	0,33	0,97	%39,2	24226,71	6,73	3. Referans Model
9	0,40	0,97		24417,97	6,78	3. Referans Model'den %0,79 daha fazla
10	0,27	1,21		29286,24	8,14	7 No.lu modelden %22,94 daha fazla
11	0,27	1,45	%39,2	34441,54	9,57	7 No.lu modelden %44,58 daha fazla

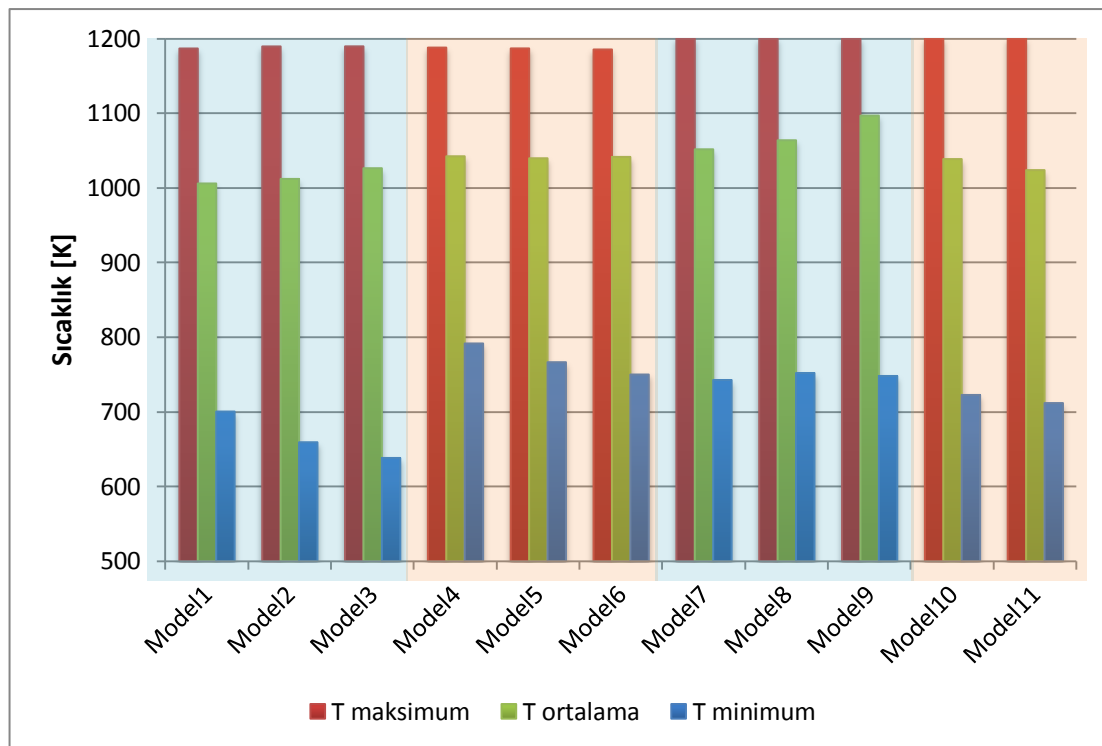
Yapılan 9 model arasında en başarılı olarak Model7 ele alınmış ve bu model üzerinde yükseklik/tank çapı (H/D) oranının ısı depolamaya etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda görüşmüştür ki;

- Seramik yüksekliğinin %25 artırılması depolanan enerjiyi %22,94 oranında,

- Seramik yüksekliğinin %50 artırılması depolanan enerjiyi %44,58 oranında artırmıştır.

d/D oranının artışı ile depo edilen enerji miktarı artmış olsa da, bu oran yaklaşık olarak %2 mertebelerinden fazla olmamıştır. Ancak, artan giriş çapının, ısı taşıyıcı akışkanın taşındığı boruların çapının da artması anlamına geldiği de unutulmamalıdır. Hiç şüphesiz bu durum, tesis bazında enerji kaybını ve ilk yatırım maliyetini artırıcı bir unsurdur.

Modellerin ulaştığı en yüksek, en düşük sıcaklık ile ortalama sıcaklık değerleri Şekil 5.11’de gösterilmektedir. Boşluk miktarının fazla olduğu ilk üç modelin sıcaklıklarının diğerlerine nazaran daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca en yüksek sıcaklık ile en düşük sıcaklık arasındaki farkın da bu modellerde daha yüksek olduğu görülmektedir.



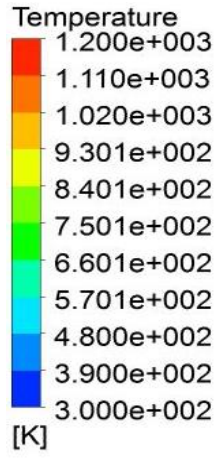
**Şekil 5.11:** Analiz sonucunda modellerin sahip olduğu maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık değerleri.

Boşluk miktarının azalması ile sıcaklıkların arttığı, yani modelin ısı tutma kabiliyetinin iyileştiği sonucuna varılabilir. Kordiyerit kalınlığının azaltıldığı Model7-8-9’da ise ortalama sıcaklığın da arttığı görülmektedir. Buradan çıkarılacak sonuç; malzeme kalınlığı seçilirken kullanılan malzemenin ısı iletim katsayısının

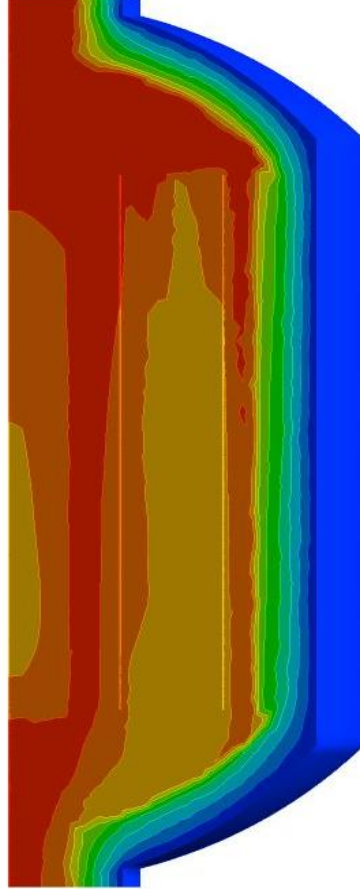
dikkate alınması gerektiğidir. Aksi halde iç bölgelere kadar ısı iletimi zorlaşacak ve yüzey sıcaklığı fazla olmasına rağmen ortalama sıcaklık düşük kalacaktır. Model10-11’de ise en yüksek sıcaklık yüksek olmasına rağmen ortalama sıcaklık ve en düşük sıcaklık diğer modellerden daha düşüktür.

Modellerde oluşan bu sıcaklık dağılımlarının temel nedenlerinden bir tanesi, model içerisindeki akışın şeklidir. Şekil 5.15’e bakıldığında boşluk miktarının fazla olduğu Model1-2-3’ün kanallar arası akışkan hızının birbirinden çok farklı olduğu görülmektedir. Hatta bazı kanallarda akışın ters yönde olduğu, Şekil 5.12’de görülen sıcaklık dağılımının temel nedeninin bu ters akış olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Kanalların daraltılarak porozitenin düşürüldüğü modellere ait akışkan hızlarının ise daha homojen olduğu Şekil 5.16’da görülmektedir. Unutulmamalıdır ki bu homojenliği sağlayan etkenlerden birisi de tankın ortasında boşluksuz olarak bırakılan bölümdür. Bu bölümün olmadığı durumlarda yapılan analizlerde, akışkanın büyük oranda tankın ortasından aktığı ve kenar bölümlerin neredeyse devre dışı kaldığı sonucuna varılmıştır. Şekil 5.17’ye bakıldığında, tankın ortasındaki dolu alanın iptal edilmesine rağmen akışın daha düzgün olduğu görülebilir. Tank içerisindeki tasarımın düzgün yapıldığında tankın tamamının etkin bir şekilde kullanılabileceği sonucu bu akış profillerinden çıkarılabilir. Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de kanallar arasında ters yönde akış olmadığı da görülmektedir.



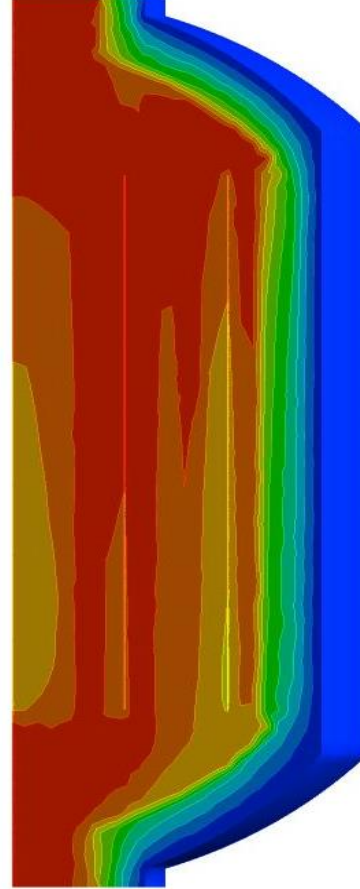


d = 0,16 m



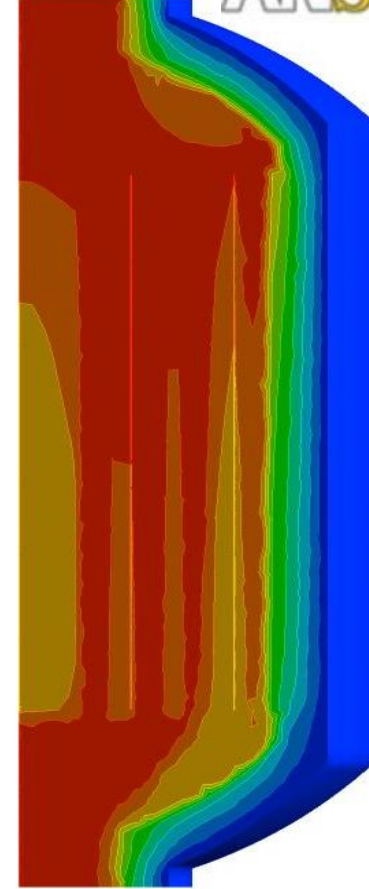
Model1

d = 0,20 m



Model2

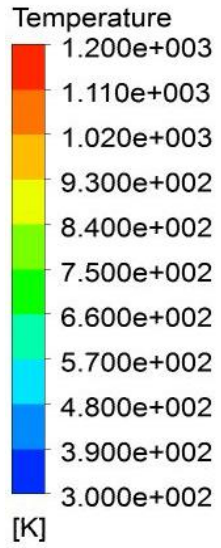
d = 0,24 m



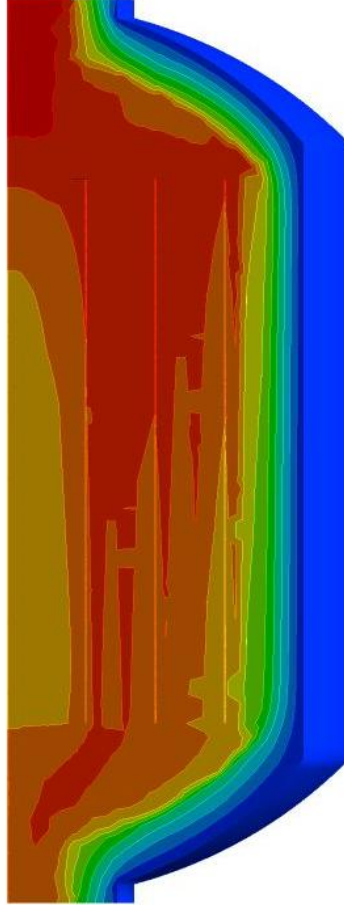
Model3

ANSYS

Şekil 5.12: Referans model (Model2) ve giriş çapının değiştirilmesi ile oluşan yeni modellerin sıcaklık dağılımı.

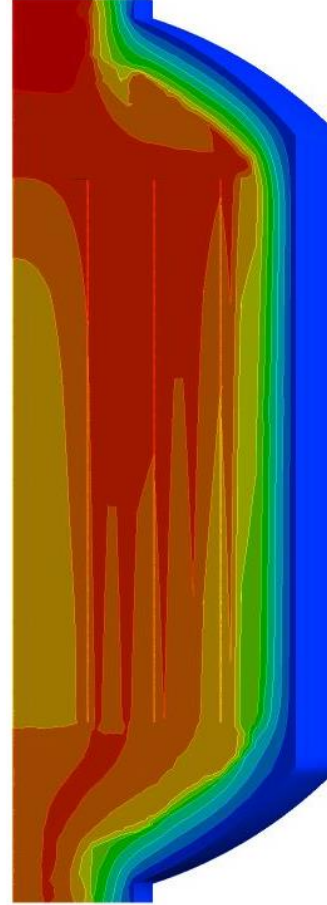


d = 0,16 m



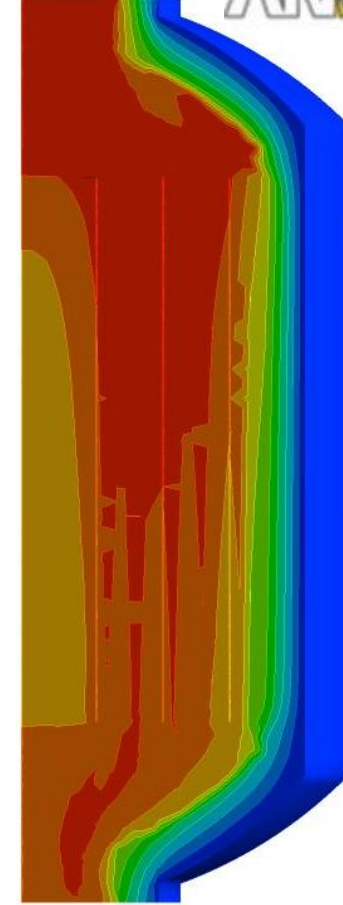
Model4

d = 0,20 m



Model5

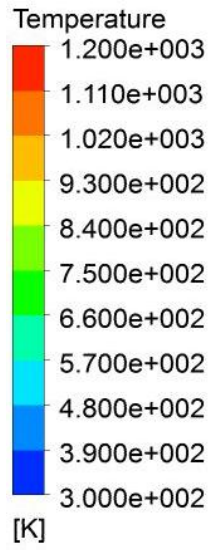
d = 0,24 m



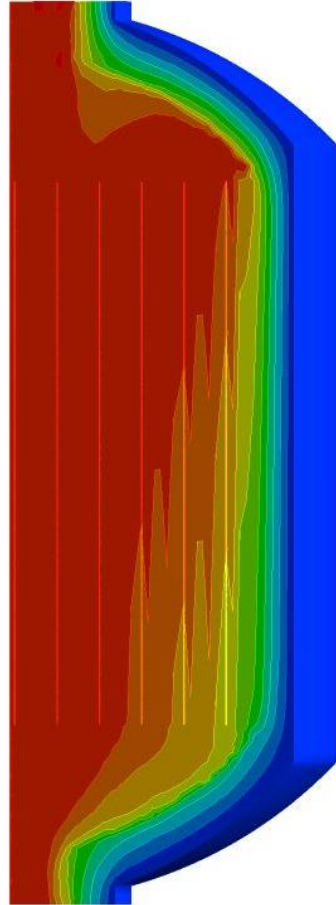
Model6

ANSYS

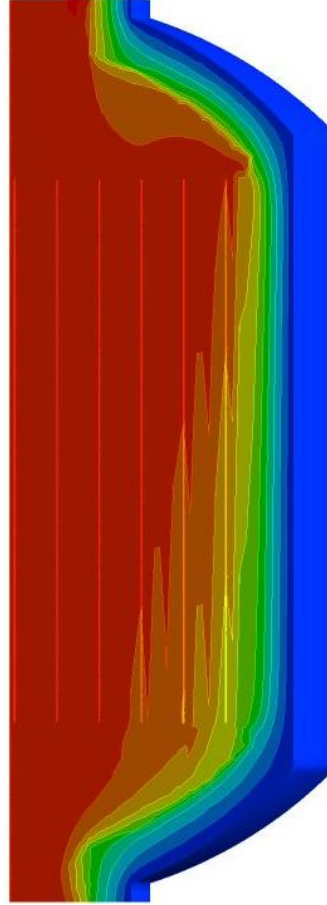
Şekil 5.13: Yeni referans model (Model5) ve giriş çapının değiştirilmesi ile oluşan yeni modellerin sıcaklık dağılımı.



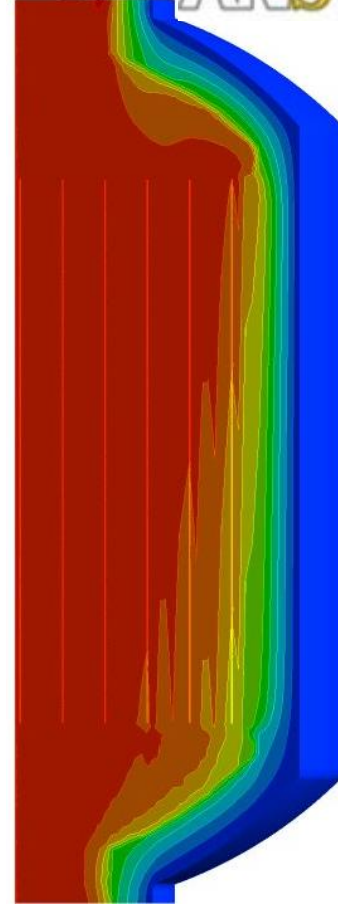
d = 0,16 m



d = 0,20 m

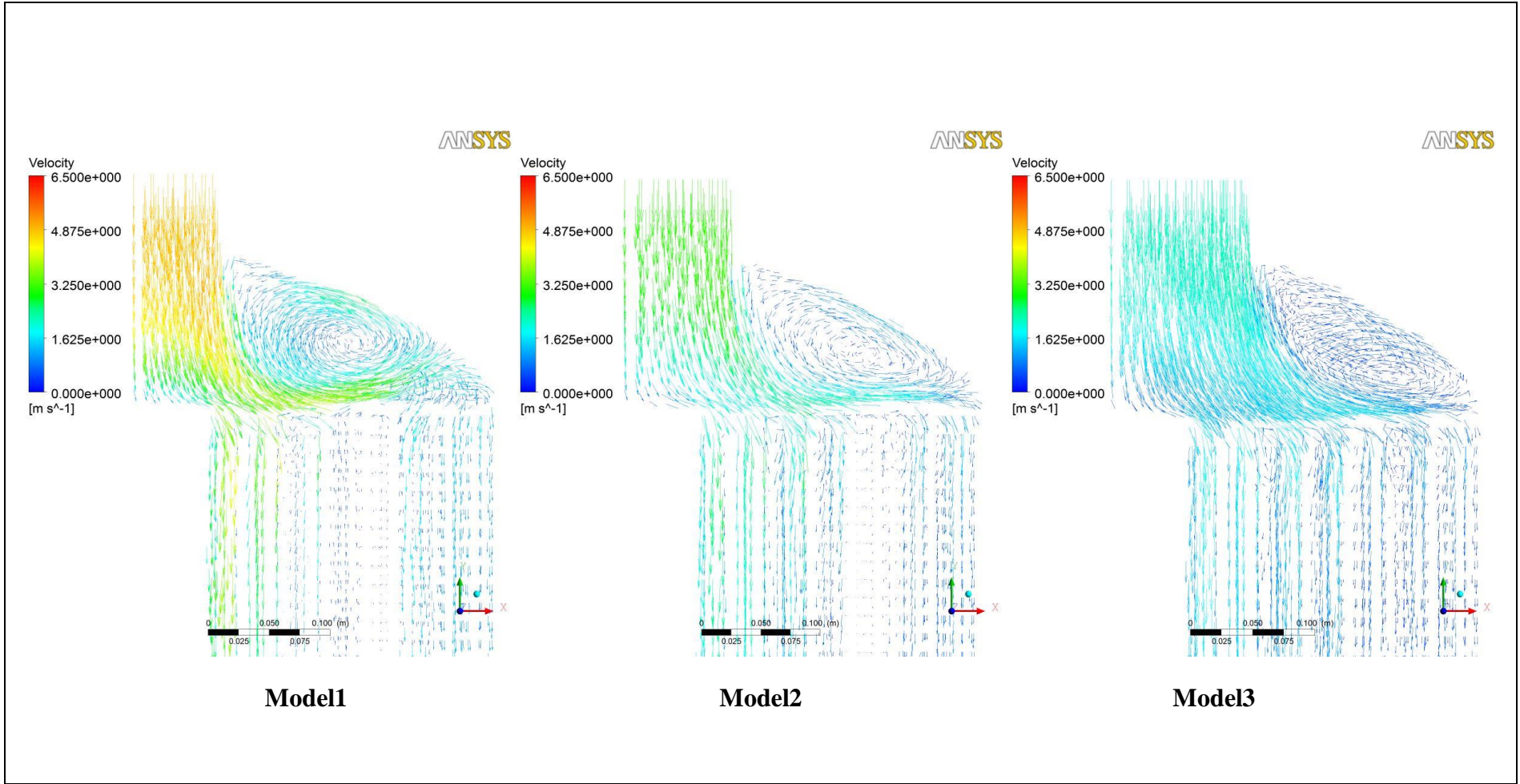


d = 0,24 m

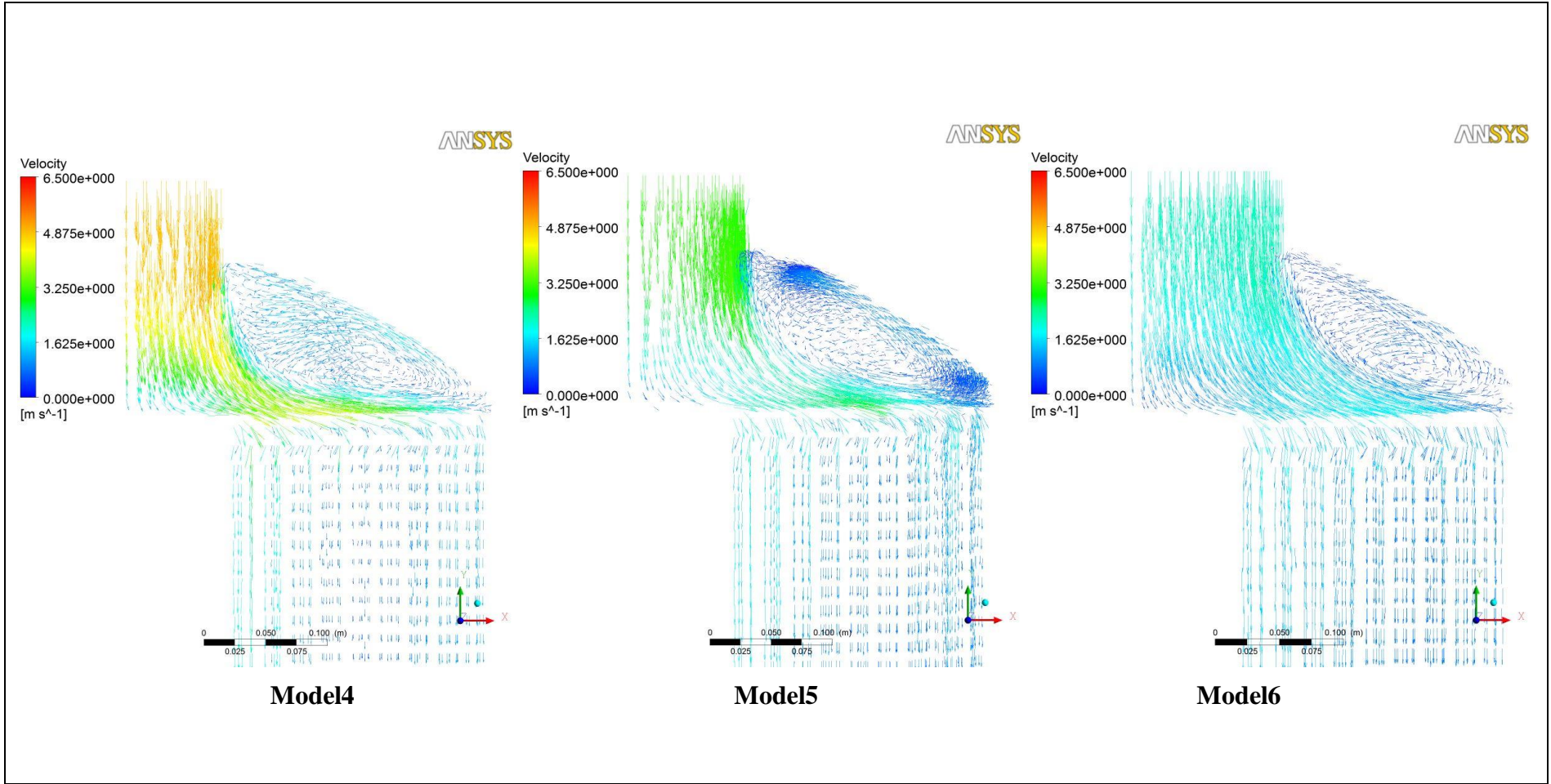


ANSYS

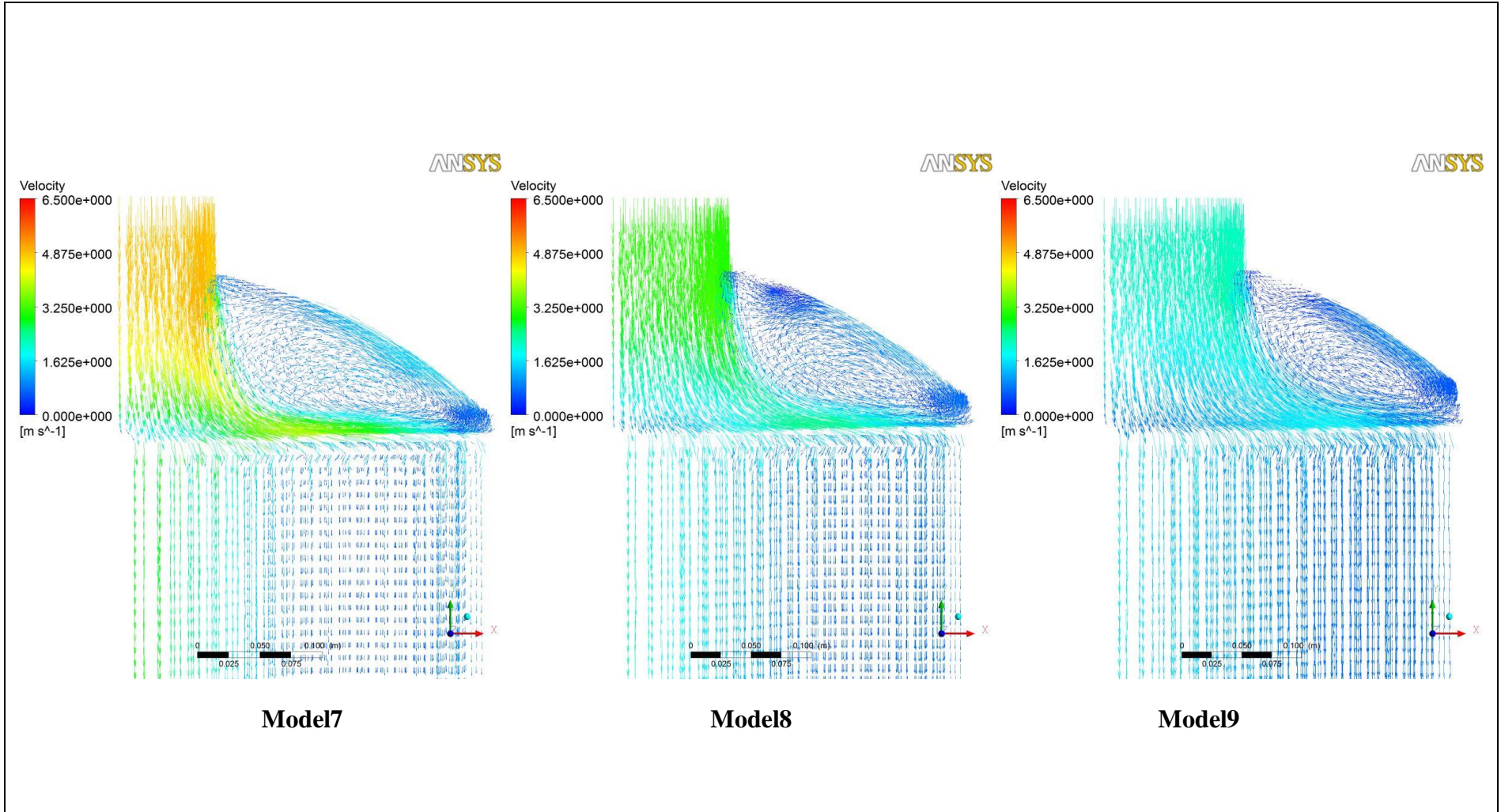
Şekil 5.14: Yeni referans model (Model8) ve giriş çapının değiştirilmesi ile oluşan yeni modellerin sıcaklık dağılımı.



Şekil 5.15: Model1-2-3'e ait akış profilleri.

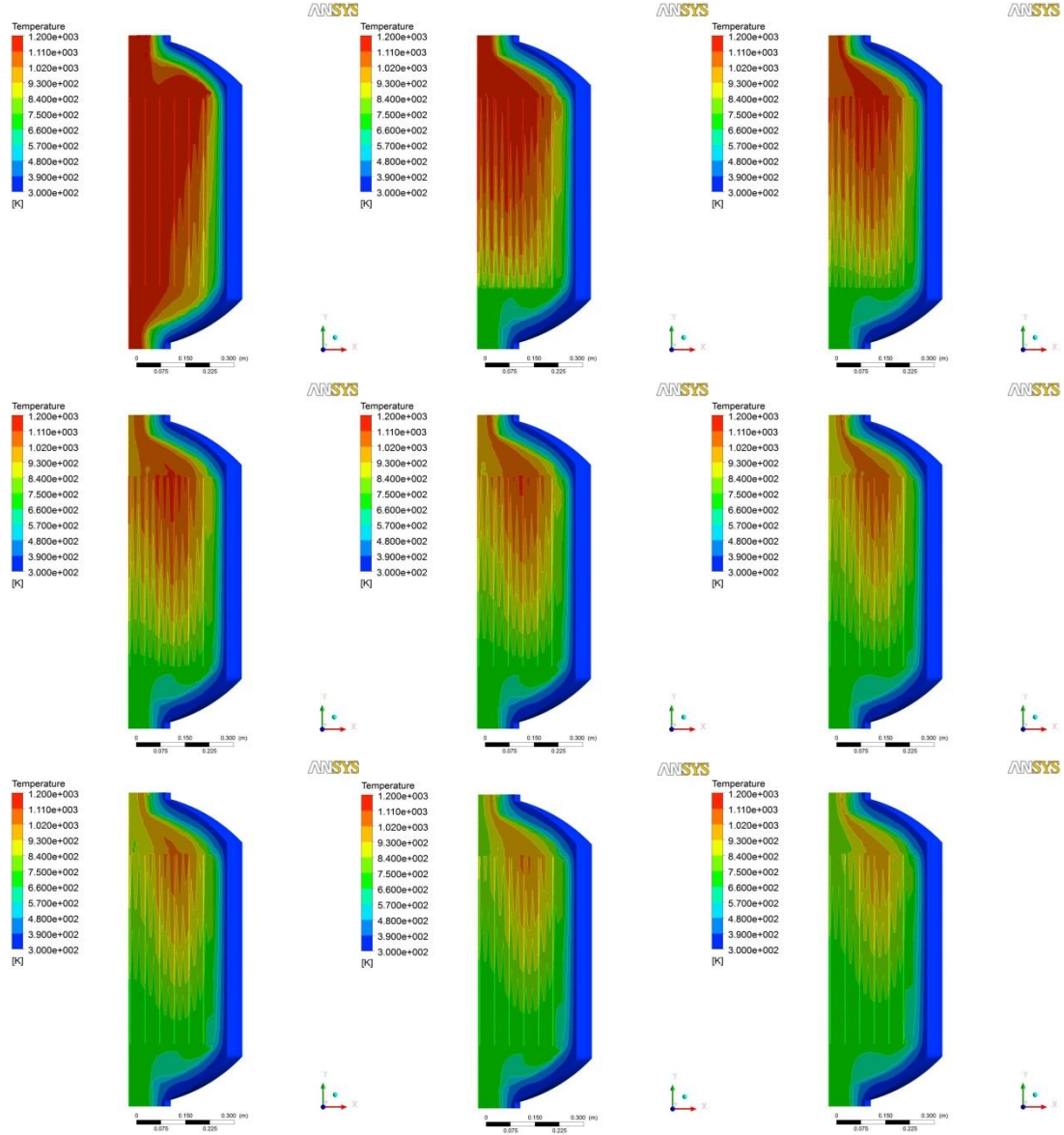


Şekil 5.16: Model4-5-6'ya ait akış profilleri.



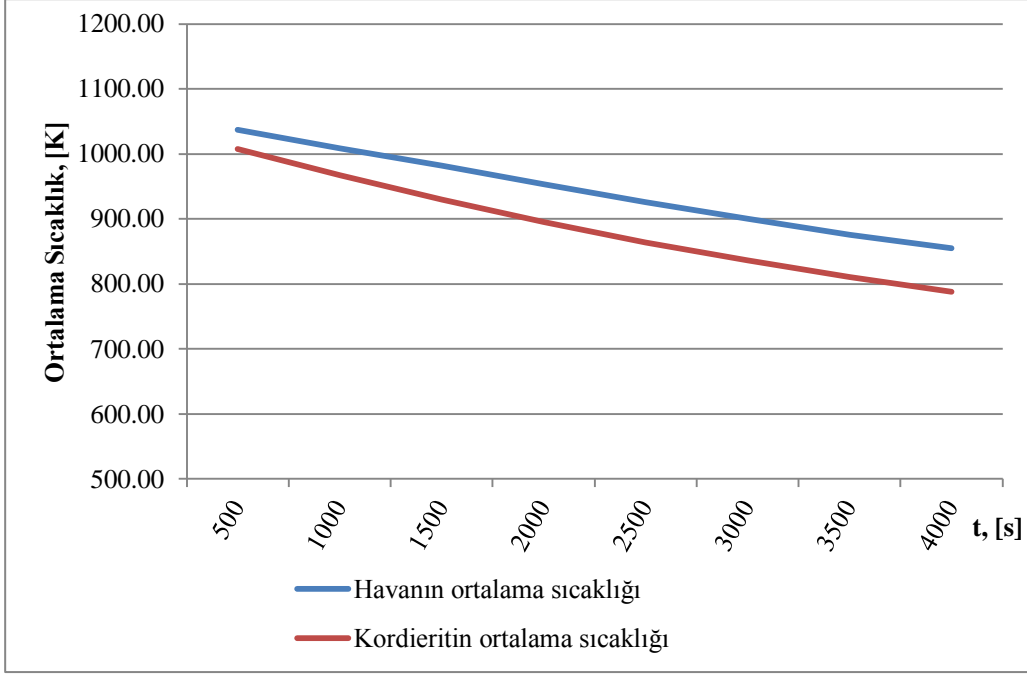
Şekil 5.17: Model7-8-9'a ait akış profilleri.

Bu çalışmada en uygun model olarak belirlenen Model7'nin aynı sürede deşarj analizi de yapılmış, deşarj işlemi sırasında tankın sıcaklık değişimi  $t=0$  anından  $t=4000s$  anına kadar  $\Delta T=500s$  olarak Şekil 5.18'de gösterilmiştir.



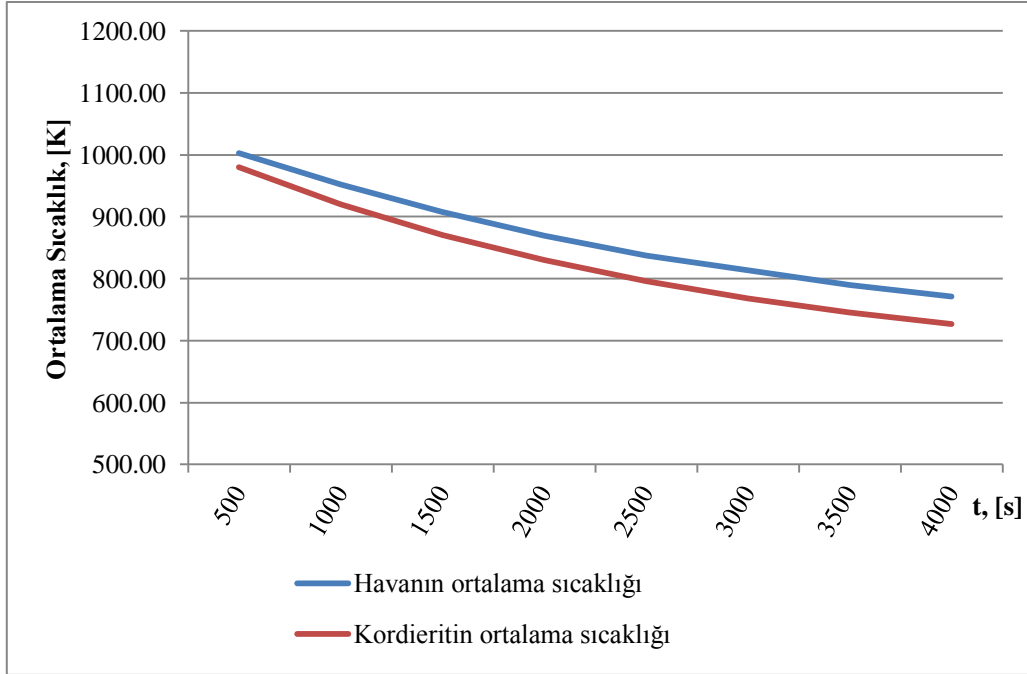
**Şekil 5.18:** Model7'nin deşarj süresince sıcaklık değişimi.

Deşarj işleminde giriş ve çıkış sınır koşulları şarj işlemininkinin tersi olarak ele alınmıştır. Yani "Mass-Flow-Inlet" sınır koşulu yerine "Outflow", "Outflow" sınır koşulu yerine "Mass-Flow-Inlet" sınır koşulu verilerek "Mass Flow Rate" 0.005kg/s ve "Total Temperature" 700K olarak girilmiştir. Deşarj süresince kordiyeritin ve akışkanın ortalama sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi Şekil 5.19'da gösterilmiştir.



**Şekil 5.19:** Deşarj süresince ortalama sıcaklıklar.

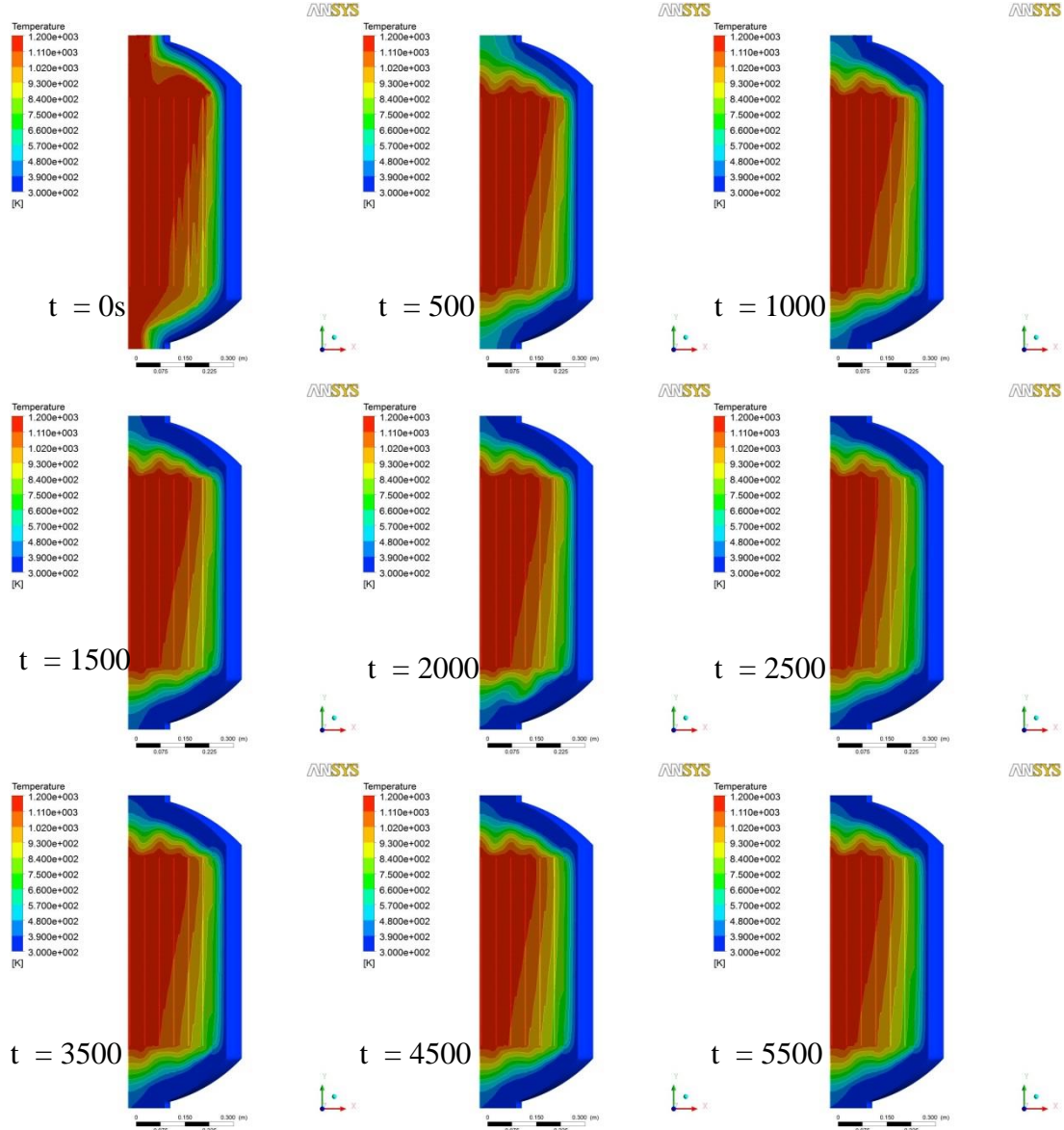
“Mass-Flow-Rate” 0.01kg/s olarak değiştirilip tank yeniden deşarj edildiği durumdaki çıkan akışkanın ortalama sıcaklığı ile ortalama kordiyerit sıcaklığı Şekil 5.20’da görüldüğü gibi olmuştur.



**Şekil 5.20:** Deşarj süresince ortalama sıcaklıklar.



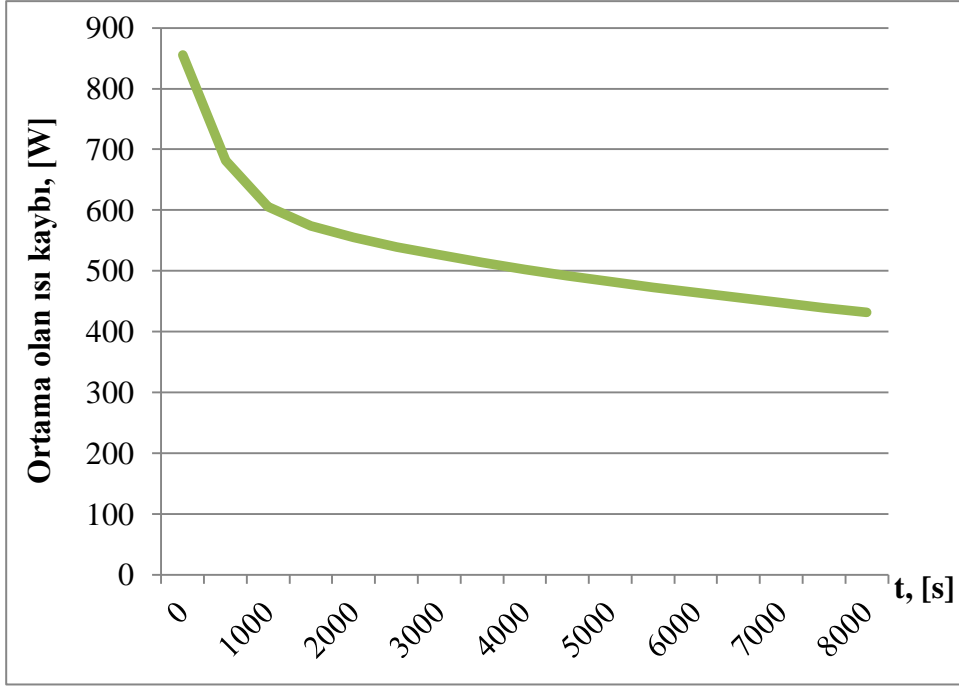
Termal enerji depolama sistemleri için diğ er bir önemli unsur, bekleme durumundaki ısı kaybıdır. Isı kaybını belirlemek için yapılan analize ait görüntüler Şekil 5.21’de verilmiştir.



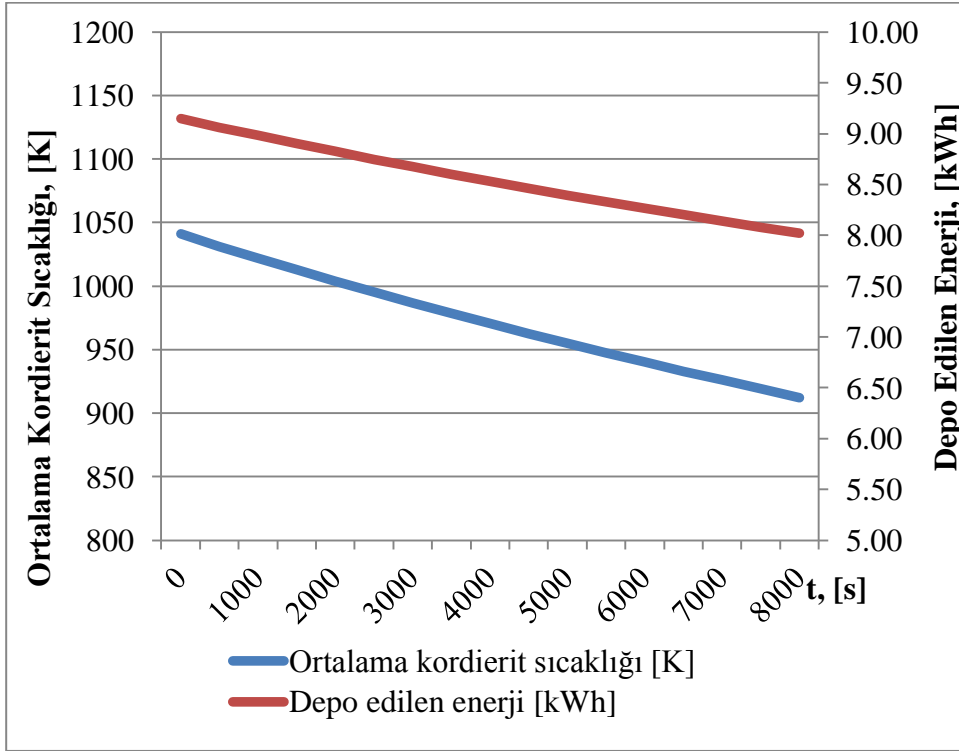
Şekil 5.21: Model7’nin bekleme durumundaki sıcaklık değ işimi.

Toplam 8000s’lik bekleme süresi analiz edilmiş ve ortama olan ısı kaybının zamana bağı lı değ işimi Şekil 5.22’de verilmiştir. Bu süre zarfında kordiyeritin ortalama sıcaklığı ile sistemde depo edilen toplam enerjideki değ işim ise Şekil 5.23’de verilmiştir.

Yapılan analiz sonucuna göre 8000s’lik bekleme sürecinin sonunda %12lik bir enerji kaybı olmuştur. Yalıtım malzemesinin kalınlığının artırılması ile bu değ erin azaltılması mümkündür.



Şekil 5.22: Bekleme durumunda ortama olan ısı kaybı.



Şekil 5.23: Bekleme durumunda kordierit sıcaklığının değişimi ve depolanan enerjideki değişim.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan analizler göstermektedir ki tank içerisindeki akış dağılımı, ısı depolama kabiliyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında incelenen parametrelerin etkileri sonraki paragraflarda sırası ile özetlenmiştir.

Giriş çapının akışa ve depolanan enerjiye olan etkisi bütün modeller için ihmal edilebilir büyüklüklerde olmuştur.

Tankın giriş ve çıkışının sahip olduğu şekil, akışı ve dolayısıyla depo edilen enerjiyi büyük oranda etkilemektedir. Bu nedenle, mümkün ise küresel giriş tercih edilmelidir. Bu şekilde ters akışın önüne büyük ölçüde geçilebilir.

Tank içerisindeki kanalların büyük olması, merkeze yakın olan kanallarda akışın hızlı, merkezden uzak olan kanallarda ise akışın yavaş olmasına neden olmaktadır. Ayrıca büyük kanallar, tank içerisinde ters akışın oluşmasına neden olarak enerji depolama kabiliyetini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle kanallar güçlendirilerek tasarımın daha düzgün akış profiline sahip olması sağlanabilir.

Kanalların güçlendirilmesinin diğer bir etkisi de yüzey alanının artmasıdır. Akışkan ve depolama ortamı arasındaki yüzey alanının artması, ısı geçişini de artıracığından enerji depolama kabiliyetini iyileştirmektedir.

Malzemenin kalınlığı, malzemenin ısıl iletkenlik değeri göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Isı iletim katsayısı düşük olan kordiyerit malzemesinin kalınlığının azaltılması, depo edilen enerji miktarını olumlu yönde etkilemiştir. Model4-5-6 ile Model7-8-9 arasındaki toplamda %6,17 oranında azalan kütleyle rağmen depo edilen enerjideki %3,17lik azalma, bu durumun göstergesidir. Malzeme kalınlığının daha az seçilmesi, aynı çap için toplam yüzey alanının da artmasını sağlamıştır.

H/D oranının artması, toplam yüzey oranının da artmasına neden olduğu için ısı kaybını artırmaktadır.

Çalışma sıcaklığının 900-1200K aralığında olduğu düşünüldüğünde 4000s sonunda 970K, 8000s sonunda 912K'e düşen ortalama sıcaklık seçilen yalıtım kalınlığının artırılmasının gerekliliğini göstermektedir.

Kordiyerit esaslı seramik malzeme yüksek sıcaklıklardaki termal enerji depolama sistemleri için uygun bir malzemedir. Yaklaşık 1650K'e kadar çıkabilen çalışma sıcaklığı ile, ergimiş tuz ve yağların duyulur ısı depolama uygulamalarından daha yüksek sıcaklıklara ulaşabilmektedir. Ayrıca yüksek volümetrik ısı kapasiteye sahip olması nedeniyle kil, tuğla, beton, alüminyum, çakıl gibi duyulur ısı depolama ortamlarına göre de avantajlı konumdadır. Günümüzde gittikçe yaygınlaşan gaz türbinli sistemlerde depolama ortamı olarak kullanılabilir, çevrimde akışkan olarak kullanılan gaz doğrudan depolama sisteminde de kullanılabilmesi için ısı değiştiricileri getirdiği ek maliyet ve performans düşüşlerinin önüne geçilmiş olunur.

Termal enerji depolama sistemi için ısı taşıyıcı akışkan olarak hava yerine su buharının ya da farklı gazların kullanılması, bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda depolama sistemleri için yeni bir alternatif olabilir. Akışkanın debisinin değiştirilmesi ile depo edilen enerjideki ve akış çizgilerindeki değişim de üzerinde çalışılacak konulardandır. Ayrıca yalıtım kalınlığının etkileri de incelenebilecek diğer bir konudur.

Sonuç olarak yapılan çalışmada seramik esaslı termal depolama sistemlerinin sağladığı esneklik ve yüksek performansı nedeni ile değişik uygulamalarda başarı ile kullanım bulacağı öngörülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Iliev, I. ve Vegt, H.** (2012). Desalination: new frontier for renewable energy. *Renewable Energy Focus*, **13**, 20-22.
- [2] **Larsen, K.** (2008). Denmark continues its renewable tradition. *Renewable energy focus*, **8**, 66-69.
- [3] **Moldovana, M. D. ve Visaa, I.** (2014). Solar heating & cooling energy mixes to transform low energy buildings in nearly zero energy buildings. *Energy Procedia*, **48**, 924-937.
- [4] **Mira-Hernández, C. ve Flueckiger, S. M.** (2014). Numerical Simulation of Single- and Dual-media Thermocline Tanks for Energy Storage in Concentrating Solar Power Plants. *Energy Procedia*, **49**, 916-926.
- [5] **Kronhardt, V., Alexopoulosb, S., Reißelc, M., Sattlerd, J., Hoffschmidte, B., Hänelf, M., Doerbeckg, T.** (2014). High-temperature Thermal Storage System for Solar Tower Power Plants with Open-volumetric Air Receiver Simulation and Energy Balancing of a Discretized Model. *Energy Procedia*, **49**, 870-877.
- [6] **Ma, Z. ve Glatzmaier, G. C.** (2014). Development of Solid Particle Thermal Energy Storage for Concentrating Solar Power Plants that Use Fluidized Bed Technology. *Energy Procedia*, **49**, 898-907.
- [7] **Turchi, C. S. ve Heath, G. A.** (2013). Molten Salt Power Tower Cost Model for the System Advisor Model (SAM). Technical Report TP-5500-57625, NREL.
- [8] **Janz, G. J., Krebs, U., Siegenthaler, H. F. ve Tomkins, R. P. T.** (1972). Molten Salts: Nitrates, Nitrites, and Mixtures. Rensselaer Polytechnic Institute.
- [9] **Kearney, D., Hermann, U., Nava, P., Kelly, B., Mahoney, R., Pacheco, J., Cable, R., Potrovitza, N., Blake, D., Price, H.** (2012). Assessment

Of A Molten Salt Heat Transfer Fluid In A Parabolic Trough Solar Field. ASME.

- [10] **Rodríguez, I., Pérez-Segarra, C. D., Lehmkuhl, O., Oliva, A.** (2013). Modular object-oriented methodology for the resolution of molten salt storage tanks for CSP plants. *Applied Energy*, **109**, 402-414.
- [11] **Gaggioli, W., Fabrizi, F., Fontana, F., Rinaldi, L. ve Tarquini, R.** (2014). An Innovative Concept of a Thermal Energy Storage System Based on a Single Tank Configuration Using Stratifying Molten Salts as both Heat Storage Medium and Heat Transfer Fluid, and with an Integrated Steam Generator. *Energy Procedia*, **49**, 780-789.
- [12] **Yang, Z. ve Garimella, S. V.** (2009). Thermal analysis of solar thermal energy storage in a molten-salt thermocline. *Solar Energy*, **84**, 974–985.
- [13] **Ruegamer, T., Kamp, H., Kuckelkorn, T., Schiel, W., Weinrebe, G., Nava, P. ve Riffelmann, K.** (2013). Molten Salt for Parabolic Trough Applications: System Simulation and Scale Effects. *Energy Procedia*, **49**, 1523–1532.
- [14] **Robert, W., Siegel, N. P.** (2008). Molten Nitrate Salt Development for Thermal Energy Storage in Parabolic Trough Solar Power Systems. *Sandia National Laboratories*, ES2008-54174.
- [15] **Dinter, F., Geyer, M., Tamme, R.** (1990). Thermal Energy Storage for Commercial Applications. *Springer-Verlag*, New York, ISBN 3-540-530054-1, 30–50.
- [16] **Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lazaro, A., Dolado, P., Zalba, B. ve Cabeza, L. F.** (2010). State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part I: concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 31–55.
- [17] **Laing, D., Steinmann, W. D., Tamme, R. ve Richter, C.** (2006). Solid media thermal storage for parabolic trough power plants. *Solar Energy*, **80**, 1283–1289.

- [18] Laing, D., Bahl, C., Bauer, T., Lehmann, D., Steinmann, W. D. (2011). Thermal energy storage for direct steam generation. *Solar Energy*, **85**, 627–633.
- [19] Pacheco, J. E., Showalter, S., Kolb, W. (2002). Development of a molten salt thermocline thermal storage system for parabolic trough plants. *Journal of Solar Energy Engineering*, **124**, 153-159.
- [20] Burolla, V. P. ve Bartel, J. J. (1979). High temperature compatibility of nitrate salts, granite rock and pelletized iron ore. *Sandia National Laboratory*.
- [21] Laurent, S. S. (2000). Thermocline thermal storage test for large-scale solar thermal power plants. *Sandia National Laboratory*.
- [22] Bradshaw, R. W. ve Meeker, D. D. (1990). High-temperature stability of ternary nitrate molten salts for solar thermal energy systems. *Solar Energy Materials*, **21**, 51-60.
- [23] Leiby, C. C. ve Ryan, T. G. (1973). Thermophysical properties of thermal energy storage materials e aluminum. *Air Force Cambridge Research Labs*.
- [24] Dinçer, İ. ve Rosen, M. A. (2011). Thermal Energy Storage Systems and Applications, *Wiley*, Ontario, Canada.
- [25] Mahlia, T. M., Saktisahdan, T. J., Jannifar, A., Hasan, M. H. ve Matseelar, H. S. (2014). A review of available methods and development on energy storage; technology update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **33**, 532-545.
- [26] Liu, G. ve Tomsovic, K. (2014). A full demand response model in co-optimized energy and reserve market. *Electric Power Systems Research*, **111**, 62-70.
- [27] Lund, H., Marszal, A. ve Heiselberg, P. (2011), Zero energy buildings and mismatch compensation factors. *Energy & Buildings*, **43**, 1646-1654.
- [28] Price, H., Lüpfert, E., Kearney, D., Zarza, E., Cohen, G., Gee, R. ve Mahoney, R. (2002). Advances in Parabolic Trough Solar Power Technology. *Journal of Solar Energy Engineering*, **124**, 109-125.

- [29] **Muratori, M., Schuelke-Leech, B. A. ve Rizzoni, G.** (2014). Role of residential demand response in modern electricity markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **33**, 546-553.
- [30] **Cordaro, M.** (2008). Understanding Base Load Power. *Affordable Reliable Electricity Alliance*, New York.
- [31] **Suberu, M. Y., Mustafa, M. W. ve Bashir, N.** (2014). Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **35**, 499-514.
- [32] **Pielichowska, K.** (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Journal of Progress in Materials Science*, **65**, 67-123.
- [33] **Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglobe, A., Rosehart, W.** (2014). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development*, **14**, 302-314.
- [34] **Barnes, F. S. ve Levine, J. G.** (2011). Large Energy Storage Systems Handbook (The CRC Press Series in Mechanical and Aerospace Engineering). *CRC Press*, New York.
- [35] **Raju, M. ve Khaitan, S. K.** (2012). Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: A case study of the Huntorf plant. *Applied Energy*, **89**, 474-48.
- [36] **Liu, H. ve Jiang, J.** (2007). Flywheel energy storage—An upswing technology for energy sustainability. *Energy and Buildings*, **39**, 599–604.
- [37] **Url-1** <<http://www.bpa.gov/news/newsroom/Pages/Study-identifies-two-Northwest-basalt-rock-caverns-sites-for-storing-energy.aspx>>, alındığı tarih: 12.02.2014.
- [38] **He, J., Ao, G., Guo, J., Chen, Z. ve Yang, L.** (2009). Hybrid Electric Vehicle with Flywheel Energy Storage System. *WSEAS Transactions On Systems*, **8**, 638-648.
- [39] **Zakaib, S.** (2013). Supporting Island Grids with Flywheel Energy Storage. *Carilec Renewable Energy Forum*, Ontario, Canada.



- [40] Han, Y. H., Park, B. J., Jung, S. Y. ve Han, S. C. (2012). Study of superconductor bearings for a 35 kWh superconductor flywheel energy storage system. *Physica C: Superconductivity and its applications*, **483**, 156-161.
- [41] Cabeza, L. F. (2012). Thermal Energy Storage. *Comprehensive Renewable Energy*, 211-254.
- [42] Mehling, H. ve Cabeza, L. F. (2008). Heat and Cold Storage with PCM: An Up to Date Introduction into Basics and Applications, Heidelberg, Berlin: Springer.
- [43] Kuravi, S., Trahan, J., Goswami, D. Y., Rahman, M. M. ve Stefanakos, E. K. (2013). Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. *Progress in Energy and Combustion Science*, **39**, 285-319.
- [44] IRENA. (2012). Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. *IRENA working paper*, cilt 2, sayı 2/5.
- [45] Boukelia, T. ve Mecibah, M. S. (2013). Parabolic trough solar thermal power plant Potential, and projects development in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **21**, 288-297.
- [46] Cárdenas, B. ve León, N. (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **27**, 724-737.
- [47] Pinel, P., Cruickshank, C. A., Morrison, I. ve Wills, A. (2011). A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 3341-3359.
- [48] NREL. (2000). Survey of thermal storage for parabolic trough power plants. *Report prepared for National Renewable Energy Laboratory*, Pilkington Solar International GmbH.
- [49] Barton, N. G. (2013). Simulations of air-blown thermal storage in a rock bed. *Applied Thermal Engineering*, **55**, 43-50.

- [50] **Drake Landing Solar Community.** Borehole thermal energy storage (BTES). <http://www.dlsc.ca/borehole.htm>, alındığı tarih: 22.02.2014
- [51] **Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R. ve Buddhi, D.** (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 318–345.
- [52] **Orò, E., Gracia, A., Castell, A., Farid M. M. ve Cabeza, L. F.** (2012). Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Applied Energy*, **99**, 513-533.
- [53] **Pardo, P., Deydier, A., Anxionnaz-Minvielle, Z., Rougé, S., Cabassud, M. ve Cognet, P.** (2014). A review on high temperature thermochemical heat energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **32**, 591-610.
- [54] **Khartchenko, NV.** (1997). Advanced energy systems. Berlin: Institute of Energy Engineering & Technology University.
- [55] **Zondag, H., Kikkert, B., Smeding, S., Boer, R. ve Bakker, M.** (2013). Prototype thermochemical heat storage with open reactor system. *Applied Energy*, **109**, 360-365.
- [56] **Kipouros, G. J. ve Sadoway, D. R.** (2001). A thermochemical analysis of the production of anhydrous MgCl<sub>2</sub>. *Journal of Light Metals*, **1**, 111-117.
- [57] **NREL** [http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=71](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=71), alındığı tarih: 21.05.2014.
- [58] **Url-2** <http://www.energystorageexchange.org/projects/921.pdf>, alındığı tarih: 21.05.2014.
- [59] **Url-3** <http://archive.iea-shc.org/publications/task.aspx?Task=32>, alındığı tarih: 21.05.2014.
- [60] **NREL** [http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=23](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=23), alındığı tarih: 21.05.2014.
- [60] **Saxena, A. ve Goel, V.** (2013). Review Article; Solar Air Heaters with Thermal Heat Storages. *Chinese Journal of Engineering*, Sayı 2013, Makale No: 190279.

- [61] Kintner-Meyera, M. ve Emeryb, A. F. (1995). Optimal control of an HVAC system using cold storage and building thermal capacitance. *Energy and Buildings*, **23**, 19–31.
- [62] Plataforma Solar de Almeria (PSA) (1997). PSA solar thermal technology 1997 milestones and international cooperation in solar power development, Bölüm 1.
- [63] Plataforma Solar de Almeria, Euro-Energy.Net <<http://www.euro-energy.net/infrastructures/25.html>>, 22.05.2014.
- [64] Concentrating solar power projects (2011). National Renewable Energy Laboratory, <[http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by\\_technology.cfm](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by_technology.cfm)>, alındığı tarih: 22.05.2014.
- [65] Dunn, R. I., Hearps, P. J. ve Wright, M. N. (2012). Molten-salt power towers: newly commercial concentrating solar storage. *Proceedings of the IEEE*.
- [66] Xu, E., Yu, Q., Wang, Z. ve Yang, C. (2011). Modeling and simulation of 1 MW DAHAN solar thermal power tower plant. *Renewable Energy*, **36**, 848–85.
- [67] Wua, J., Lenga, G., Xua, X., Lia, K., Laoa, X., Zhou, C. (2013). In-situ synthesis of a cordierite-andalusite composite for solar thermal storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **108**, 9-16.
- [68] Url-4 <[http://www.ferroceramic.com/Cordierite\\_table.htm](http://www.ferroceramic.com/Cordierite_table.htm)>, alındığı tarih: 15.10.2013.
- [69] Url-5 <[http://www.insulationexpress.co.uk/documents/Rockwool%20RockLap\\_H\\_V\\_pipe\\_sections.pdf](http://www.insulationexpress.co.uk/documents/Rockwool%20RockLap_H_V_pipe_sections.pdf)>, alındığı tarih: 15.10.2013.



## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Hakan ESGEL

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Kastamonu, 1989

**E-Posta:** hesgel@gmail.com

**Lisans:** Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği